

UNIVERSITE LOUIS PASTEUR
STRASBOURG I
UFR DE GEOGRAPHIE

*Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques
URA 95 CNRS*

**RECHERCHES SUR L'ALTERABILITE
ET LES CARACTERISTIQUES GEOMECHANQUES
DES MARNES NOIRES DE LA COULEE DE SUPER-SAUZE.**



Présenté par

Sébastien KLOTZ

Jury :

M. Olivier MAQUAIRE : Directeur de mémoire
M. Jean-Claude FAGEOLLET : Professeur

Invités :

M. Paul URSAT : Laboratoire régional des ponts et chaussées de Strasbourg
M. Sébastien HERVE : Laboratoire régional des ponts et chaussées de Strasbourg

Octobre 1998

UNIVERSITE LOUIS PASTEUR
U.F.R DE GEOGRAPHIE

JCF
—

CEREG - URA 95 du CNRS
Centre d'Etude et de recherche Eco-Géographiques

**RECHERCHES SUR L'ALTERABILITE ET SUR LES CARACTERISTIQUES
GEOMECANQUES DES MARNES NOIRES DE LA COULEE DE SUPER-SAUZE.**

Sébastien KLOTZ

MEMOIRE DE MAITRISE DE GEOGRAPHIE PHYSIQUE

Jury

M. Olivier MAQUAIRE :
M. Jean-Claude FLAGEOLLET

Directeur de mémoire
Professeur

Invités

M. Paul URSAT :
M. Sébastien HERVE :

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg

Octobre 1998

REMERCIEMENTS

Enfin une page où l'on peut laisser libre cours à son imagination car, tout comme les essais de laboratoire qui comportent des protocoles bien spécifiques, la recherche traîne son lot de règles très strictes souvent difficiles à assimiler pour un cerveau pas encore formé ...

Sans l'aide et le soutien des personnes citées ci-dessous, les membres du jury ici présent et les éventuels lecteurs égarés, m'auraient certainement dit : « Monsieur Klotz, vous devriez être poursuivi pour atteinte à la dégradation de la recherche ! ».

Merci à :

- Monsieur Olivier MAQUAIRE pour son précieux suivi, son perfectionnisme et surtout pour son professionnalisme. C'est un professeur qui ne se contente pas seulement de tenir un discours d'érudit face à une assemblée mais il sait aussi soutenir et orienter les étudiants ambitieux. Je le conseil à toute personne assoiffée de connaissances ...

- Martine TRAUTMANN, de m'avoir supporté et aidé dans mes «galères de laboratoire» ;

- Monsieur Paul URSSAT et Monsieur Sébastien HERVE, de m'avoir fait l'honneur d'accepter l'invitation à cette soutenance. Leurs compétences m'ont été utiles tout au long de ce travail. Je tiens aussi à remercier toute leur équipe, franchement sympathique, du L.R.P.C de Strasbourg et de Colmar ;

Monsieur Jean Claude FLAGEOLLET, indispensable dans ce Jury. Les quelques jours passés avec lui sur le terrain m'ont été très enrichissants ;

- Monsieur REGENAS et Stéphane de l'ENSAIS, d'avoir accepté de me prêter leurs locaux et leurs connaissances face à des essais complètement nouveaux pour moi ;

- Myriam SCHMUTZ et Jean Philippe MALLET pour leurs précieux conseils.

- Mes ami(e)s qui ont souvent su tourner mes moments de galères en grands moments d'éclats de rires.

- Mes parents toujours là quand on en a besoin (la tune, la bouffe, les grandes philosophies de la vie ...) et tout particulièrement merci à mon mécanicien de Père !.

« Faut pas jouer au riche quand on a pas le sou. »
Brel, ces gens là.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	8
<i>PREMIERE PARTIE : UNE APPROCHE SUR LE GLISSEMENT-COULEE DEJA BIEN INTRODUITE.</i>	10
CHAPITRE I : RAPPEL DU CONTEXTE GENERAL DU SECTEUR ETUDIE.	11
1. Contexte géographique, géologique et hydrographique de la vallée de Barcelonnette.	11
2. Vue lithostratigraphiques des marnes noires.	17
2.1. Aspect général.	17
2.2. Une vallée affectée par de nombreux mouvements de terrain.	18
3. Le glissement-coulée de Super-Sauze.	19
3.1. Description morphologique de l'amont vers l'aval.	19
3.2. Description des matériaux rencontrés.	24
3.3. Condition de déclenchement et évolution des matériaux d'amont en aval.	24
CHAPITRE II : LES ACQUIS ET LES OBECTIFS.	27
1. les acquis et les questions en suspens.	27
2. Des investigations géotechniques déjà bien engagées.	28
2.1. En aval des réalisations géotechniques.	28
2.2. Les travaux in situ.	28
CHAPITRE III : LES CAMPAGNES DE PRELEVEMENT.	32
1. Mode de prélèvement des échantillons et nomenclature.	32
2. Description des fosses.	33
2.1. Description des fosses du transect E.	33
2.1.1. La fosse de Juillet 1997.	33
2.1.2. La fosse d'Octobre 1997.	34
2.2. La fosse CF du transect C.	36
3. Conclusion de la première partie.	39
<i>SECONDE PARTIE : QUELQUES NOUVEAUX RESULTATS AU LABORATOIRE.</i>	40
CHAPITRE I : QUELQUES RESULTATS COMPLEMENTAIRES DES ESSAIS DEJA EFFECTUES.	41
1. Les teneurs en eau.	41
2. Les poids spécifiques.	44

2.1. Poids spécifiques des matériaux de la coulée.	44
2.2. Poids spécifiques sur les blocs marneux de la coulée.	44
3. Les limites d'Atterberg.	46
CHAPITRE II : L'INFLUENCE DE L'ALTERABILITE DES MARNES NOIRES SUR LEURS CARACTERISTIQUES PHYSIQUES.	51
1. Généralités sur la compréhension de l'altération et de la fragmentation des marnes noires en place.	52
1.1. Description de l'altération des marnes en place : génèse de la couverture détritique et du régolite.	52
1.1.1. Description succincte de la couverture détritique.	52
1.1.2. Description succincte du régolite.	52
1.2. Génèse de la fragmentation des marnes noires.	53
1.2.1. Présentation sommaire du rôle joué par la tectonisation dans la fragmentation.	54
1.2.2. L'importance du cortège minéralogique et chimique vis à vis de la fragmentation des marnes noires.	54
1.2.3. Le processus de décompression.	58
2. Les observations in situ de l'évolution de la fragmentation des panneaux marneux.	58
2.1. Evolution de l'altération des panneaux marneux en surface, de l'amont vers l'aval.	59
2.2. L'état d'altération des blocs en profondeur.	60
2.3. Description des fragments issus de l'altération des panneaux marneux.	65
2.4. Le foisonnement des panneaux marneux.	69
3. Etude de la désagrégation et de l'altération des marnes noires en laboratoire.	71
3.1. La porosité des marnes noires de la coulée.	71
3.2. L'hydroclastie des marnes noires de la coulée.	75
3.2.1. Quelques généralités.	75
3.2.2. Présentation de l'essai.	76
3.2.3. Observations et interprétations des résultats.	77
3.3. L'importance des alternances gel/dégel sur les marnes noires de la coulée.	79
3.3.1. Présentation de quelques généralités.	79
3.3.2. Présentation des essais cryoclastiques.	80
3.3.3. Observations et interprétations des résultats.	81
3.3.4. Quelques remarques par rapport au protocole.	83
3.4. Détermination du coefficient d'altérabilité pour les marnes noires de la coulée de Super-Sauze.	85
3.4.1. Présentation du mode opératoire.	85
3.4.2. Résultats et interprétations.	86

3.5. Détermination d'un coefficient de dégradabilité des marnes noires de la-coulée.	87
3.5.1. Principe de l'essai.	87
3.5.2. Réalisation de l'essai et interprétation des résultats.	88
CHAPITRE III : REFLEXION SUR UN NOUVEAU PROTOCOLE ADAPTE AUX ANALYSES GRANULOMETRIQUES.	91
1. Rappel des résultats obtenus.	91
2. Les problèmes rencontrés.	91
3. Les premiers résultats d'une méthode adaptée.	93
3.1. Description de la méthode.	93
3.2. Les granulométries réalisées.	97
4. Conclusion sur la méthode.	100
TROISIEME PARTIE : VERS DE NOUVELLES INVESTIGATIONS GEOMECHANQUES EN LABORATOIRE.	102
CHAPITRE I : DEGRE DE COMPACTITE ET DE COMPRESSIBILITE DES MARNES NOIRES DE LA COULEE DE SUPER-SAUZE.	103
1. Degré de compacité des marnes de la coulée : l'essai Proctor.	103
1.1. Principe de l'essai.	103
1.2. Détermination de l'optimum Proctor normal OPT des marnes noires de la coulée de Super-Sauze.	107
1.2.1. Déroulement des essais.	107
1.2.2. Les résultats et leurs interprétations.	107
1.2.3. Eléments de comparaison.	108
1.2.4. Degré de compacité des marnes noires de la coulée pour différents optimum Proctor.	110
2. La compressibilité des marnes noires : l'essai oedométrique.	114
2.1. Rappel de quelques notions indispensable sur la compression des sols.	114
2.1.1. La constitution d'un sol.	114
2.1.2. La consolidation d'un sol.	115
2.2. La compressibilité des marnes noires : l'essai oedométrique.	115
2.2.1. Principe de l'essai.	116
2.2.2. Mise en place des échantillons.	121
2.2.3. Interprétation des résultats.	123
2.2.4. Quelques éléments de comparaison.	124
CHAPITRE II : LES CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES DES MARNES NOIRES DE LA COULEE DE SUPER-SAUZE.	126
1. Quelques généralités ...	126

2. Le cisaillement rectiligne direct. _____	128
2.1. Principe de l'essai. _____	128
2.2. Réalisation des essais. _____	131
2.2.1. Préparation des éprouvettes. _____	131
2.2.2. Présentation et discussion des résultats. _____	133
3. Le comportement des marnes noires au cisaillement triaxial. _____	139
3.1. Principe de l'essai. _____	139
3.1.1. Définitions des contraintes. _____	139
3.1.2. Les différents types d'essais possibles. _____	140
3.1.3. Quelques renseignements sur la préparation des éprouvettes. _____	142
3.2. Réalisation de l'essai. _____	142
3.3. Présentation des résultats. _____	142
3.4. Quelques éléments bibliographiques de comparaison et discussion. _____	147
4. La résistance au cisaillement résiduel des marnes noires. _____	149
4.1. Principe de l'essai et mode opératoire. _____	149
4.1.1. Qu'est-ce-que la résistance résiduelles ? _____	149
4.1.2. Principe du cisaillement alterné. _____	150
4.2. Essai sur les marnes noires de la coulée. _____	151
5. Conclusion. _____	153
conclusion générale. _____	155
BIBLIOGRAPHIE. _____	158

ANNEXES

Annexe 1.	_____	Teneurs en eau.
Annexe 2.	_____	Poids spécifiques.
Annexe 3.	_____	Limites d'Atterberg.
Annexe 4.	_____	Schémas des blocs répertoriés dans les ravines.
Annexe 5.	_____	Schémas des blocs étudiés pour le foisonnement.
Annexe 6.	_____	Norme granulométrique.
Annexe 7.	_____	Essai Proctor.
Annexe 8.	_____	Essai oedométrique.
Annexe 9.	_____	Cisaillement rectiligne à la boîte de Casagrande.
Annexe 10.	_____	Essai triaxial.
Annexe 11.	_____	Cisaillement alterné.

Photographie de couverture : Surface du glissement de la coulée de Super-Sauze.

INTRODUCTION

De nombreux glissements-coulées affectent les marnes noires callovo-oxfordiennes du bassin de Barcelonnette. Ces formations géologiques sont propices à ce type de mouvement de terrain dont la complexité réside dans l'association d'un glissement *stricto-sensu* à l'amont et d'une coulée de débris à l'aval. Tel est le cas par exemple du plus vaste, à savoir le glissement-coulée de La Valette qui intéresse près de 9 millions de m³ (Colas G. & Locat J., 1993) mais aussi celui de Poche ou encore, de moindre importance, celui de Super-Sauze.

Ce dernier, malgré son accès difficile, a été choisi comme site d'étude car «il réunissait les conditions les plus intéressantes pour les recherches envisagées». Ses dimensions (800 mètres de long), ses pentes modérées (30° en moyenne), son ancienneté (une quarantaine d'années) et son caractère, resté entièrement naturel depuis son déclenchement, en fait un objet d'étude intact et naturel.

De nombreux travaux de recherche sont menés depuis 1991 sur le site par l'équipe strasbourgeoise «Risques naturels» du CEREG, dans le but d'évaluer le risque de transformation de la coulée boueuse en lave torrentielle et de modéliser son comportement en relation avec les conditions hydroclimatiques. Pour ce faire, la structure tridimensionnelle de la coulée et la paléotopographie du bassin torrentiel devaient être précisées. Des investigations géotechniques, géomorphologiques, topométriques, et géophysiques ont donc été conduites pour connaître la nature et l'épaisseur des différentes couches du glissement-coulée, la présence ou non d'eau et si possible la localisation de nappes afin d'en étudier les variations piézométriques et enfin, les caractéristiques géomécaniques d'échantillons en laboratoire.

C'est dans ce dernier volet que s'intègre le présent mémoire qui se situe en aval de recherches, déjà bien engagées, sur les caractéristiques géomécaniques des terres noires en laboratoire par D Herrmann (1997).

C'est à travers la réalisation d'essais bien définis, qui font suite à ces travaux, que nous tenterons de répondre à plusieurs questions, à savoir :

- sous quels processus majeurs d'altérabilité et d'érodabilité les marnes noires évoluent-elles et alimentent-elles en pied de versant une coulée boueuse ?

- Quel est le devenir des panneaux marneux détachés de l'amont et descendant, plus ou moins noyés dans la coulée, vers l'aval ?

- Quelles sont les caractéristiques intrinsèques (cohésion et angle de frottement) des matériaux de la coulée ?

- en parallèle à ceci, comment évolue le degré de compacité des marnes remaniées de la coulée avec la profondeur, autrement dit, quelle est l'influence de la teneur en eau et de la contrainte verticale sur la compacité des marnes remaniées ?

- enfin, par quels biais peut-on aider à la compréhension des mécanismes hydro-dynamiques des matériaux remaniés ?

Dans une première partie, après une brève présentation du site d'étude, nous développerons le travail effectué sur le terrain et les études géomécaniques envisagées.

Une seconde partie s'attachera à montrer le caractère altérable des marnes noires et son évolution sur la coulée d'amont en aval. De ce constat, il paraît nécessaire d'intégrer de nouveaux résultats aux essais déjà effectués par D. Herrmann en 1997 en mettant l'accent sur une nouvelle méthode mieux adaptée aux analyses granulométriques.

Une troisième et dernière partie présentera les résultats des nouveaux essais portant sur la détermination du compactage des marnes noires et sur la caractérisation de la résistance à la rupture de celles-ci.

Première Partie :

**UNE APPROCHE SUR LE GLISSEMENT-COULEE DE SUPER-SAUZE DEJA BIEN
INTRODUITE.**

CHAPITRE I

RAPPEL DU CONTEXTE GENERAL DU SECTEUR ETUDIE.

Avant d'introduire véritablement les études géomécaniques faites sur les marnes noires du glissement-coulée de Super-Sauze, il semble indispensable d'esquisser une présentation géographique, hydrogéologique et lithostratigraphique du secteur d'étude, tant à l'échelle du bassin de Barcelonnette qu'à l'échelle du glissement-coulée de Super-Sauze.

1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE, GEOLOGIQUE ET HYDROGRAPHIQUE DE LA VALLEE DE BARCELONNETTE.

Le bassin de Barcelonnette est situé dans les préalpes du sud. Serré entre l'Embrunais et le Queyras au nord et le Mercantour au sud-est, il s'étend sur une longueur d'une douzaine de km pour une largeur maximum de 15 km. Un verrou à 1100 mètres d'altitude constitue sa terminaison aval (Les Thuiles).

Il est limité de tous les cotés par des massifs culminant souvent à plus de 3000 mètres : Grand Bérard au nord (3046 m), tête du Siguret à l'est (3031 m), Chapeau du gendarme au sud (2682 m) et la Grande Séolane (2909 m) qui arrête la vue sur l'ouest (Figure 1).

Le Bassin de Barcelonnette est drainé sur 22 km par l'Ubaye qui étire son large lit torrentiel tout en collectant les eaux souvent intermittentes des torrents tel que le Rioux Bourdoux, le Bachelard et le torrent de Poche.

Les versants présentent une topographie similaire (Figure 2) avec des pentes escarpées (le Brec Second) de plus de 45 % sur la moitié supérieure des versants puis des pentes de 25 % en moyenne sur la moitié inférieure des versants (jusque vers 1800-2000 mètres). Cette moitié inférieure présentent cependant de multitudes ruptures de pente compte des nombreux torrents (Torrent de Faucon, des Galamonts ...) qui prennent leurs sources vers 2000 mètres (source de la Goutta à 2077 mètres).

L'orientation de la vallée est-ouest est propice à la classique opposition entre l'adret ensoleillé et l'ubac frais et ombré. Il en résulte donc des différences au niveau des températures, des précipitations, de la végétation et des implantations humaines.

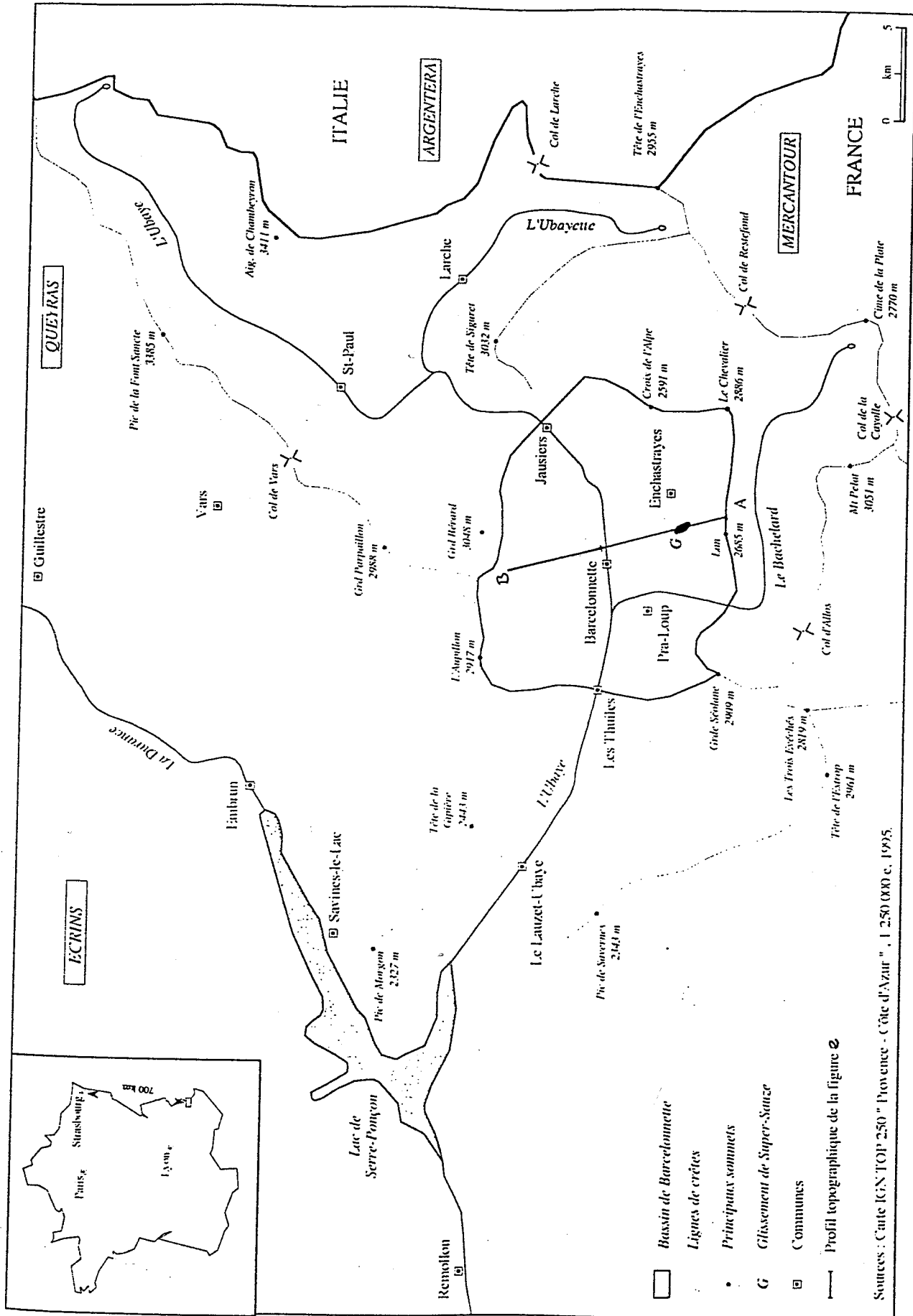


Fig 1 : Localisation du Bassin de Barcelonnette (in Genet J & Mallet J.P., 1997).

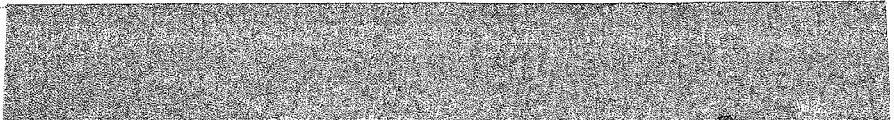
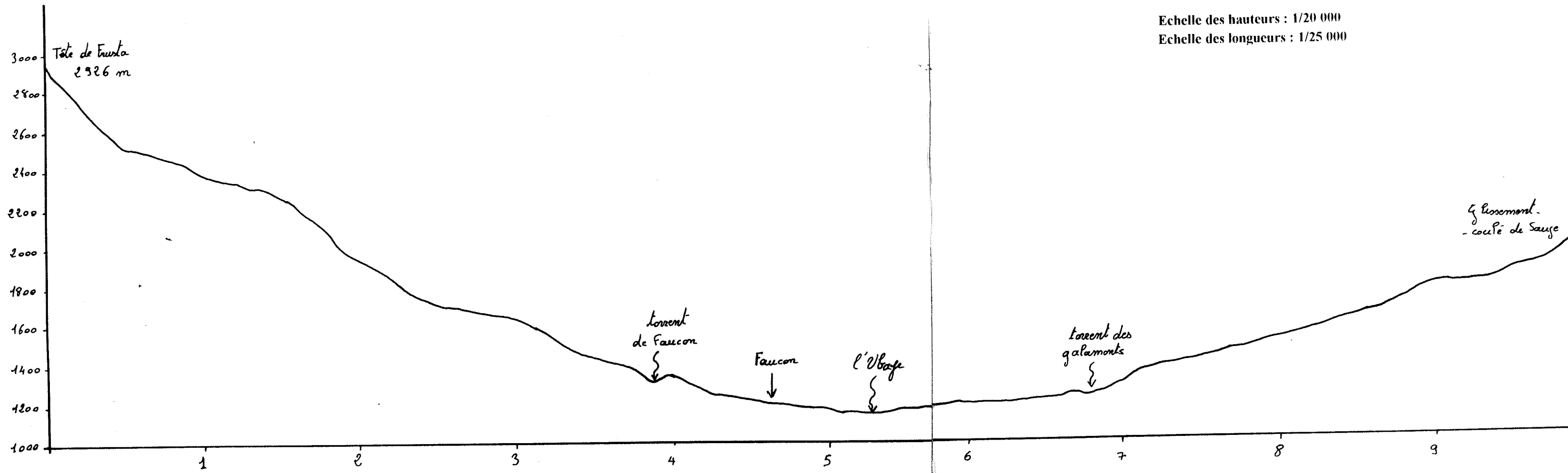


Fig 2 : Coupe Topographique nord-sud au 1/25000 de la vallée de Barcelonnette.

PROFIL TOPOGRAPHIQUE AU 1/25 000
DE LA VALLEE DE BARCELONNETTE

N

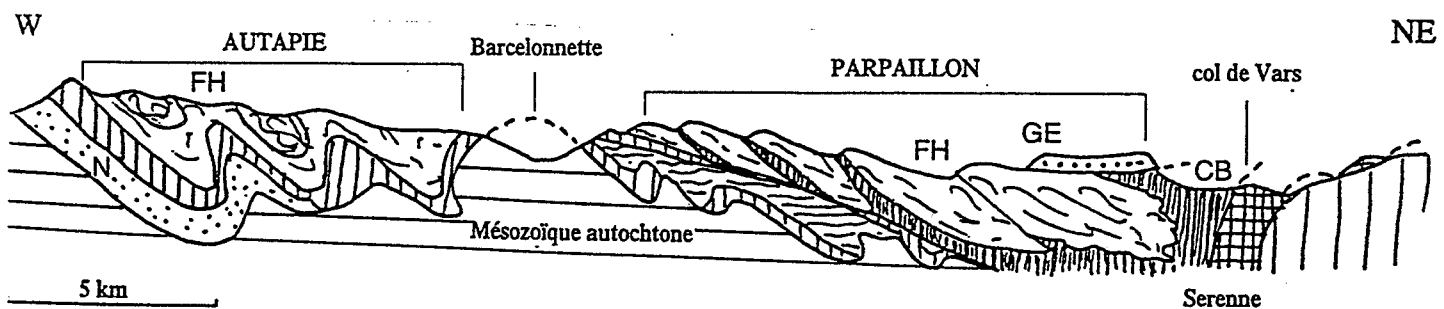
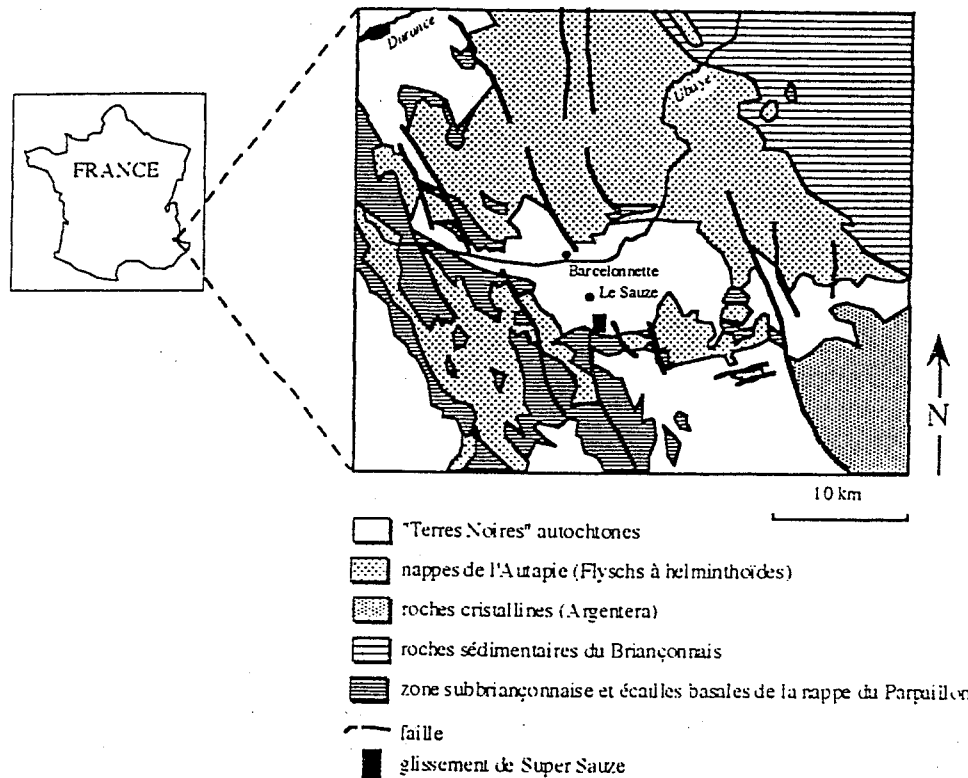
Echelle des hauteurs : 1/20 000
Echelle des longueurs : 1/25 000





Ces aspects topographiques et hydrologiques bien particuliers sont le reflet d'une géologie complexe dominée par le charriage des nappes dites de « l'Embrunais-Ubaye ». L'effacement du socle cristallin externe entre l'Oisans et le Mercantour a permis aux nappes de charriage, issues de la zone interne, de s'étaler sur le domaine sédimentaire externe sur plus de 30 km (Mottet G., 1993). La géologie offre donc la succession suivante (Figure 3 et 4):

- les matériaux autochtones composés des marnes noires callovo-oxfordiennes ;
- les nappes sub-briançonnaises, essentiellement formées de calcaires jurassiques, sont constituées par la nappe de l'Autapie (Flyschs à Helminthoïdes), elle même surmontée par le charriage terminal du Parpaillon. (Evin M., 1994).

Fig 3 : Schéma structural du Bassin de Barcelonnette (Kerchkove in Herrmann D., 1997).



. Autochtone :

-  Nummulitique (N), première moitié du Tertiaire.
-  Mézoïque, ère secondaire.

2. Nappe du flysch à Helminthoïdes
FH, flysch à helminthoïdes
GE, grès de l'Embrunnais
CB, complexe de base.
3. Fenêtre de Barcelonnette : les terrains du Mésozoïque autochtone apparaissent en fenêtre

sous les nappes du flysch (Autapie et Parpaillon).

4. A l'est du col de Vars on trouve les nappes briançonnaises dont on ne voit que l'amorce.

Fig 4 : Coupe géologique de la région de Barcelonnette (Evin M., 1994).

L'érosion glaciaire a affecté le charriage jusqu'à creuser profondément dans les marnes noires autochtones et ouvrir cette « fameuse » fenêtre de Barcelonnette. Ces formations marneuses, encore appelées « terres-noires », sont ravinées sur la moitié inférieure des versants. Des cônes de déjection plus ou moins vastes viennent coiffer en fin de course ces formations marneuses. La conséquence physique en est un aspect en ravines ou « badlands » localement appelées « roubines » (Photo 1). Ce paysage, à la fois mou et abrupt, contraste harmonieusement avec les lambeaux des matériaux allochtones (appelés Klippes) qui reposent sur ces terres noires. Citons notamment le klippe de grès et de calcaires crétacés du Chapeau de gendarme ou encore les klippes de flyschs sénoniennes des sommets du nord (Legier A., 1977).



Photo 1 : Les roubines de la vallée de Barcelonnette ...

La structure géologique de détail des marnes noires laisse apparaître une multitude de plis et de failles résultant d'une microtectonique intense. Cette caractéristique est un facteur essentiel pour l'organisation du réseau hydrographique (Figure 5). Le ruissellement intensif attaque facilement les versants pour y former un réseau dense de ravins à écoulement intermittents. Les sources jaillissent du contact entre les charriages allochtones et les marnes imperméables. Tel est le cas du torrent du Sauze prenant sa source à la Goutta (2077 m), juste en dessous du sommet du Brec second.

Les terres noires à vif sont en effet sujet à une érosion torrentielle intense. Dans ces régions, l'activité torrentielle a longtemps été la préoccupation majeure de la population locale. La cause en est une canalisation systématique des torrents à grands dangers.

SCHEMA OROGRAPHIQUE ET LOCALISATION DE QUELQUES GLISSEMENTS.

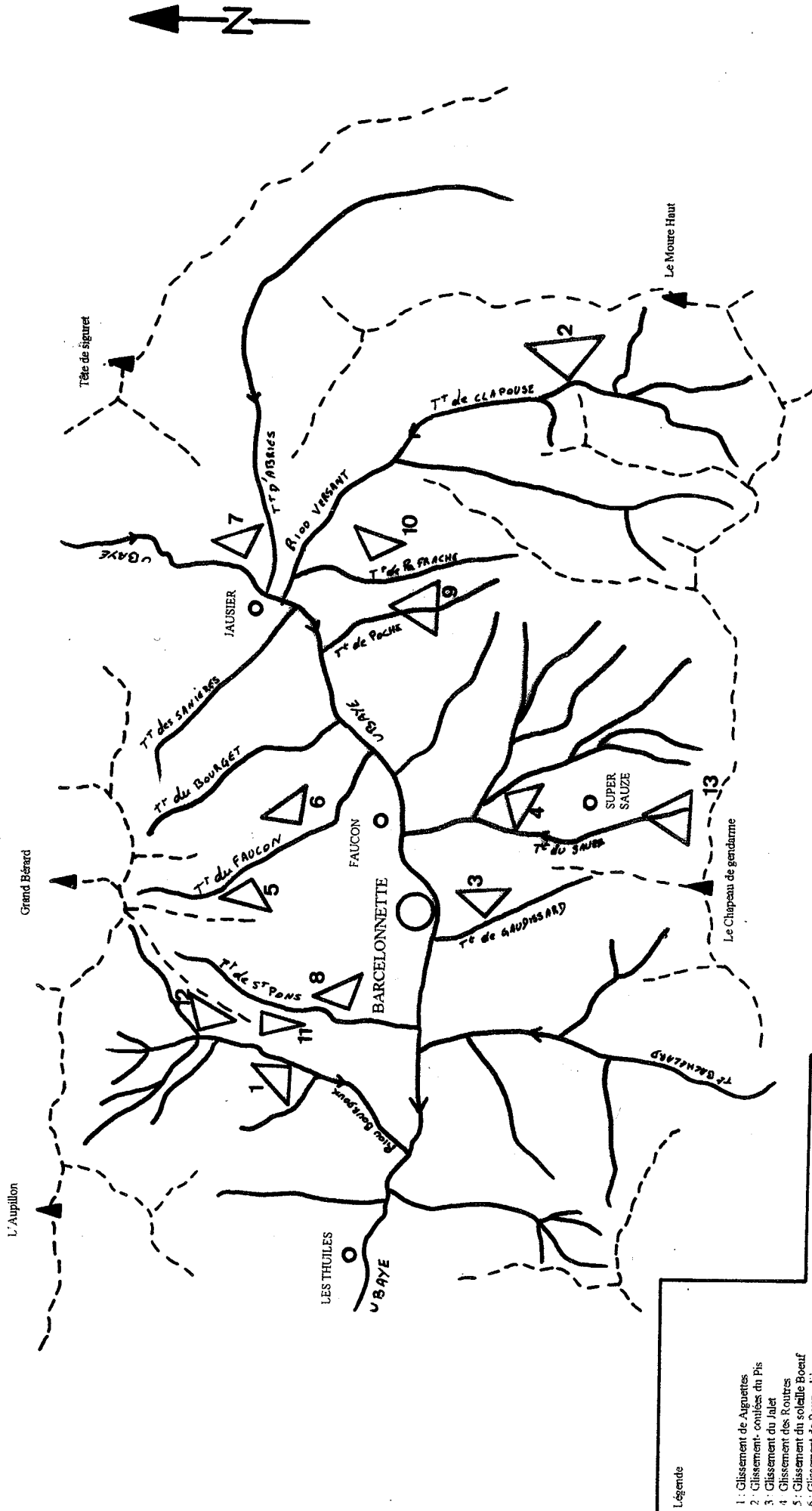


Fig 5 : Réseau hydrographique de la vallée de Barcelonnette et localisation de quelques glissements et coulées.

2. VUE LITHOSTRATIGRAPHIQUE DES MARNES NOIRES.

2.1. Aspect général :

Les marnes noires affleurent sur une grande partie du sud-est de la France. Plusieurs études lithostratigraphiques (Artru P., 1972) et sédimentologiques (Awongo M.L., 1994) ont été menées sur ces formations.

Au Bajocien supérieur, plusieurs bassins marins se sont formés suite à une intense activité tectonique. Les dépôts s'amoncellent en une puissante formation marneuse de couleur noire allant du Bajocien supérieur à l'oxfordien moyen et pouvant atteindre un développement vertical de 1000 mètres.

P. Artru (1972) distingue trois ensembles au sein des marnes noires à l'échelle régionale. Une stratigraphie simplifiée les présentent ci dessous (Figure 6):

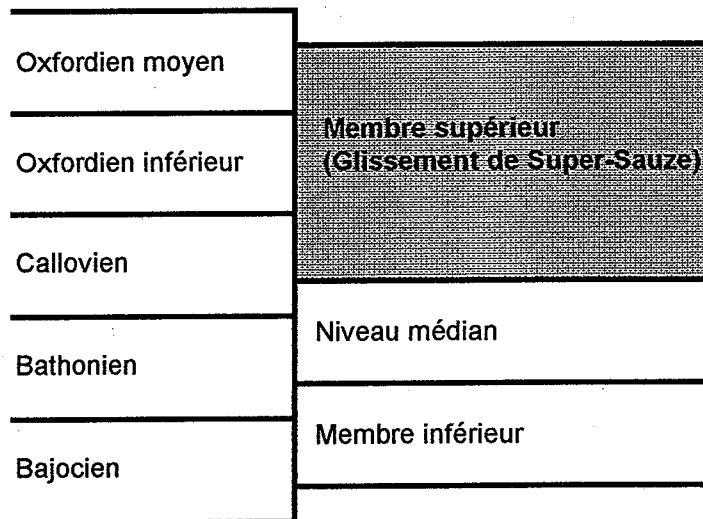


Fig 6 : Coupe stratigraphique simplifiée des marnes noires (Artru, 1972 in Phan, 1993).

La lithologie du bassin de Barcelonnette (Figure 7) met en évidence une couche de marnes noires callovo-oxfordiennes d'environ 200 à 300 mètres d'épaisseur (50 à 60 m pour l'oxfordien et 100 à 200 m pour le callovien). Ces marnes se présentent sous forme de schistes argileux, lités en feuillets bien parallèles (conséquence de la microtectonique), de couleur allant du bleu au noir. Ces teintes sombres sont à attribuer à la fraction argileuse et non à la matière organique qui est peu abondante (Awongo M.L., 1985). On peut y déceler la présence de quelques fossiles (Ammonites) souvent broyés. Les bancs de calcaire sont parfois épais d'une dizaine de centimètres et les nodules de calcaire voir quartzeux ont un diamètre parfois supérieur à 10 centimètres.

Les matériaux morainiques ne sont pas rares, d'une épaisseur pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres, elles alourdissent la silhouette des versants.

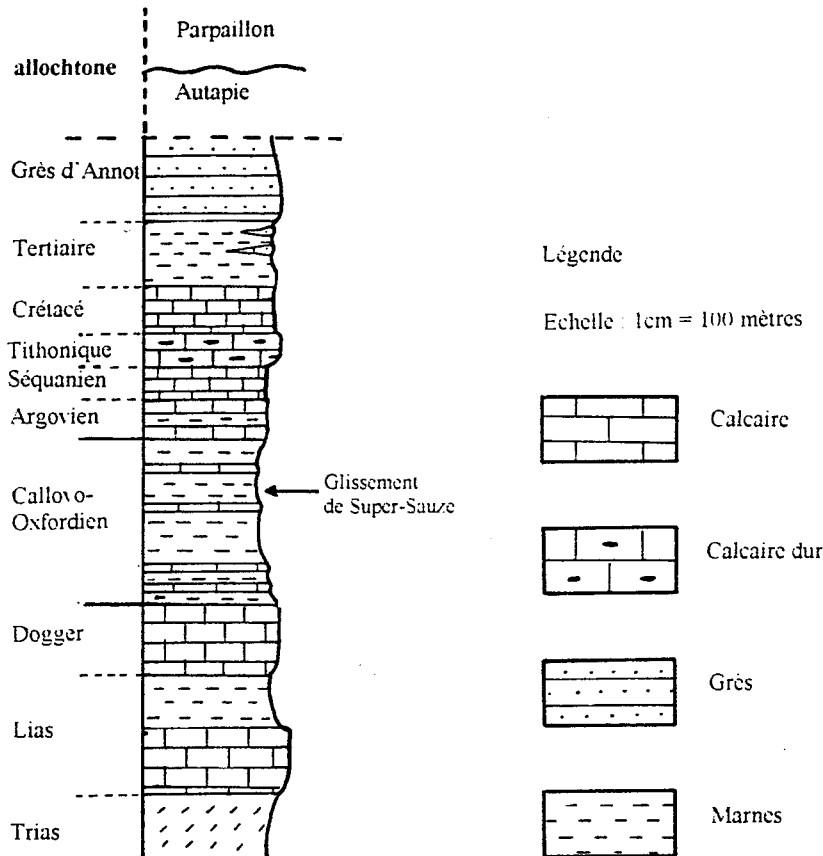


Figure 7 : Colonne lithostratigraphique simplifiée de l'autochtone de la vallée de Barcelonnette (d'après Legier, 1997)

2.2. Une vallée affectée par de nombreux mouvements de terrain.

Les informations géographiques, lithostratigraphiques et hydrogéologiques décrites ci-dessus sont donc propices au déclenchement de mouvements de terrain. Les terres noires de Barcelonnette possèdent une tranche d'altération pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur (Al Hayari M, 1988). On observe essentiellement deux types de mouvements :

- la « solifluxion » superficielle de la tranche altérée, qui entraîne ou associe souvent des terrains de couvertures quaternaires ;

- des glissements le long d'une ou plusieurs surfaces de rupture de formes diverses (circulaires, elliptiques, planes...). Le résultat est en fait, variable selon que le mouvement se produit dans une roche saine ou dans sa couverture altérée. Souvent, la surface de rupture se développe à la limite substratum altéré/roches saines, et les glissements se produisent sur des pentes faibles (15° à 25°). Ils évoluent généralement en coulées boueuses (ex : glissements et coulées du torrent de poche) (Al Hayari, 1989).

A. Legier (1977) décrit plus de 100 glissements et coulées dans la vallée dont 37 ont un degré d'activité moyen à rapide. Cependant, il faut différencier les glissements anciens que l'on peut repérer par leurs formes caractéristiques, des glissements-coulées plus récents et actifs comme celui de La Valette, survenu en 1982 et de Super-Sauze (figure 5).

3. LE GLISSEMENT-COULEE DE SUPER-SAUZE.

La morphologie du glissement-coulée de Super-Sauze a fait l'objet de nombreuses analyses détaillées (Flageollet J.C. et al, 1996; Genet J. & Malet J.P., 1997; ...). Il est nécessaire d'en reprendre les points principaux afin de mieux comprendre les problématiques présentées dans ce mémoire.

3.1. Description morphologique de l'amont vers l'aval.

Situé sur l'ubac de la vallée, le glissement-coulée de Super-Sauze affecte les formations callovo-oxfordiennes du bassin torrentiel des Roubines, directement en amont de la station de ski de Super-Sauze (Figure 8).

Actuellement, les caractéristiques morphologiques principales sont rappelées dans le tableau ci-dessous (tableau 1)

Altitude maximale = couronne.	2105 m
Altitude minimale = confluence des torrents.	1740 m
Dénivelée entre le haut de la niche d'arrachement et le pied.	365 m
Longueur maximale de la masse glissée.	800 m
Largeur moyenne de la masse glissée.	120 m
Angle de la pente moyenne.	25°
Surface estimée de la masse glissée.	70 ha ?
Date déclenchement du glissement.	entre 1956 et 1971
végétation environnante.	pins sylvestres, mélèzes, pelouse

Tableau 1 : caractéristiques morphologiques du glissement-coulée de Super-Sauze (Genet J & Malet J.P, 1997).

Le glissement-coulée se développe selon un axe nord-sud (Photo 2 et figure 9), sa pointe est très effilée (20 mètres de large). Il est dominé par les silhouettes massives du chapeau de gendarme (2682 m) et des Brechs premier (2560 m) et second (2596 m). Le torrent de Sauze, qui prend sa source à La Goutta (2077 m) à quelques mètres seulement de la couronne, contourne le glissement par l'ouest.

• Deux zones peuvent être caractérisées :

- la zone d'ablation : elle incorpore la couronne (Photo 3) qui s'étire sur 360 mètres et délimite l'escarpement principal taillé dans une couverture morainique (épaisse par endroit de 10 mètres) et dans

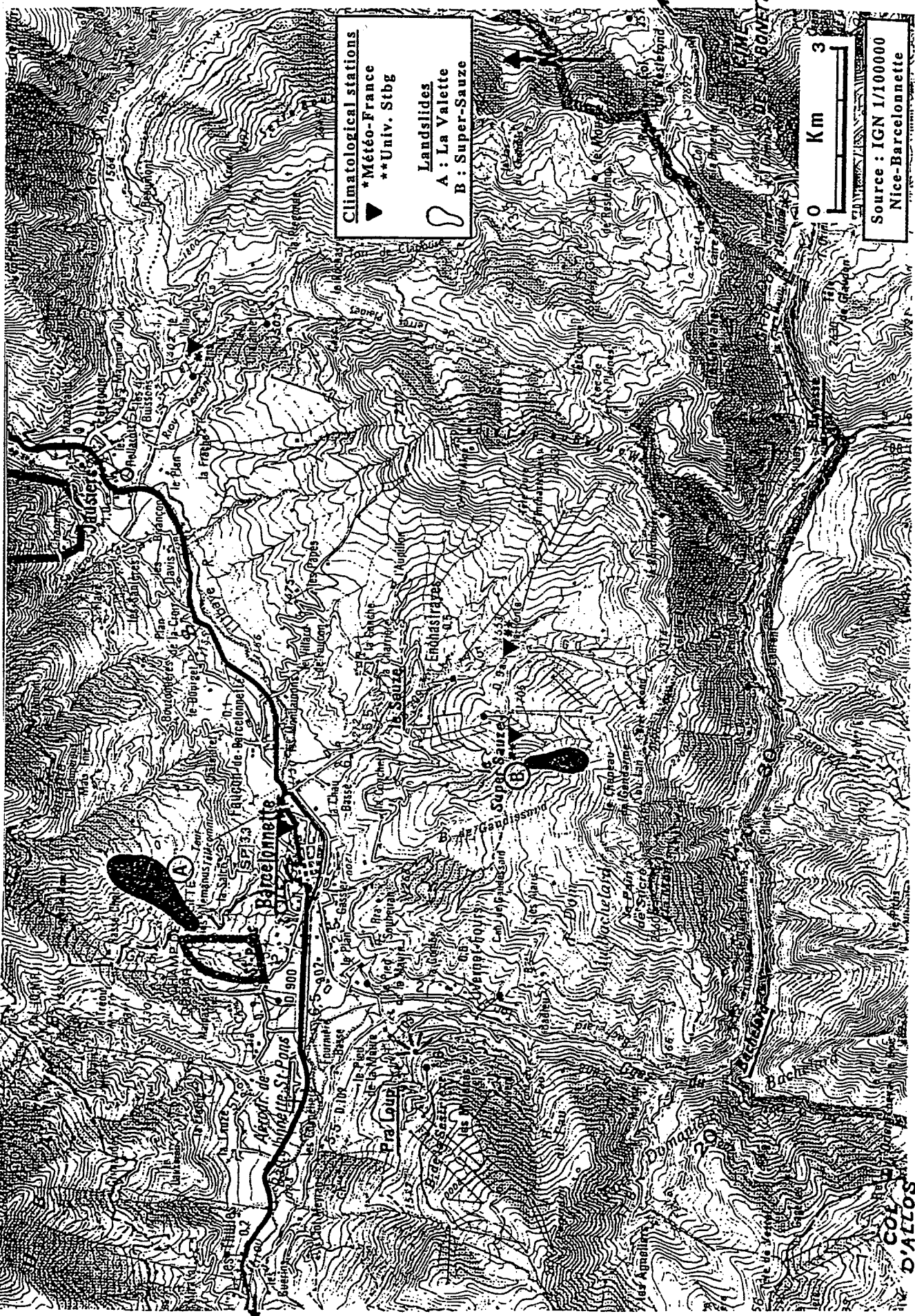


Fig 8 : Localisation du glissement-coulée de Super-Sauze.

les marnes noires in situ. Cette escarpement de 100 mètres de haut pour une pente de 60° surplombe le replat supérieur (transect A). Cette zone présente un aspect de surface très chaotique où s'enchevêtrent des panneaux marneux d'apparences saines pouvant atteindre 10 m³ et des débris pluricentimétriques (plaquettes marneuses) ;

- *la zone d'accumulation* : en contrebas du replat supérieur, après une rupture de pente convexe, débute la coulée qui constitue le corps principal du mouvement de terrain. Elle présente une pente grossièrement rectiligne de 20 à 25° (Coupe topographique de la figure 9) mais sa surface reste très chaotique. Des blocs de marnes plus ou moins désagrégés sont enfouis dans une gangue composée de débris marneux et de matériaux argileux. Ceci a pour conséquence la formation de zones bosselées ou **chaque bosse correspond à un bloc en voie de désagrégation**. Une succession de **plusieurs bourrelés** semblent venir recouvrir le replat légèrement bombé au niveau du transect E (Photo 4). Ce replat marque la fin de la coulée. Petit à petit les zones bosselées s'estompent pour laisser place, en aval du replat inférieur (transect E), à une masse boueuse dans laquelle est enchâssée des éclats marneux. La pointe terminale est très effilée (20 mètres de large) et présente des versants raidis par les torrents adjacents.

Il est à noter que dans la partie amont de la coulée, deux échines encore en place émergent de la masse remaniée.



Photo 2: Vue du glissement à partir de la couronne.



Photo 3 : Vue sur la couronne et sur l'épaisseur de la couverture morainique.

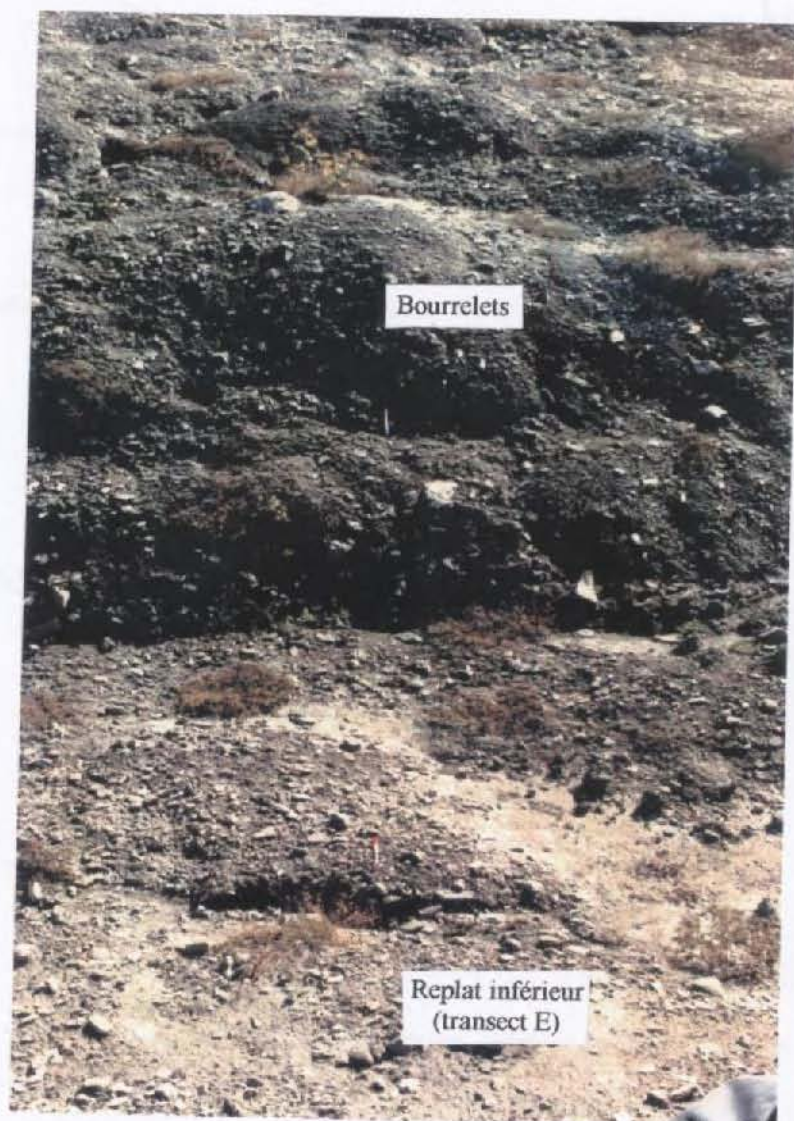


Photo n° 4 : Succession des bourrelets venant recouvrir le replat inférieur (Transect E).

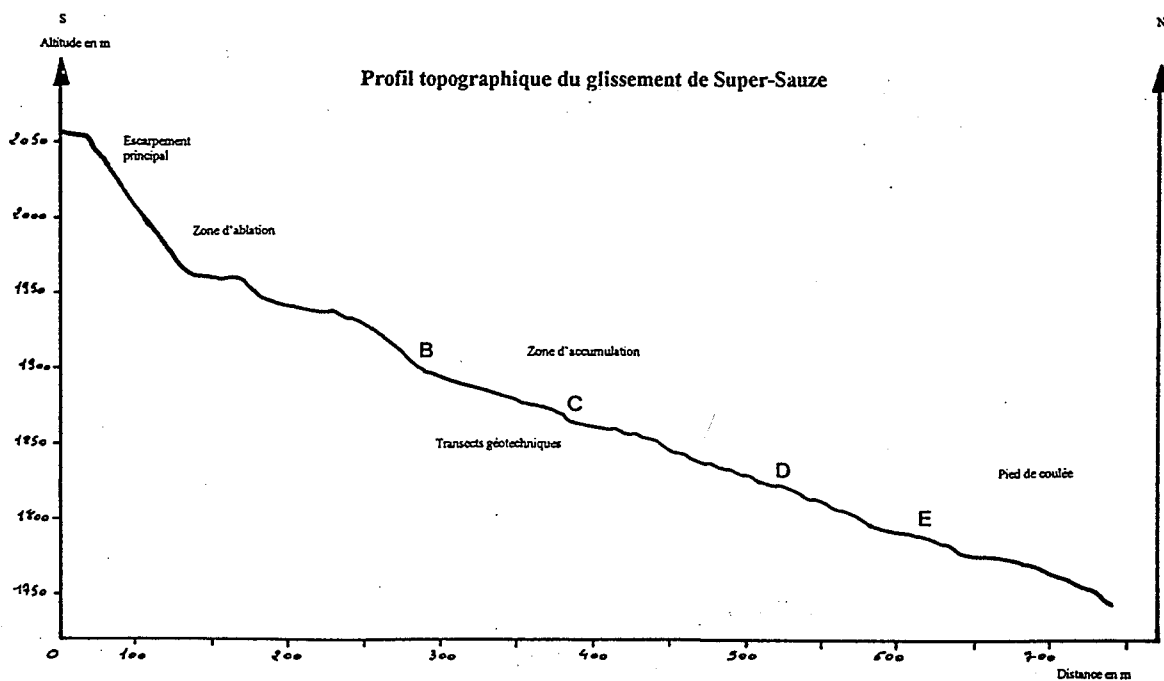
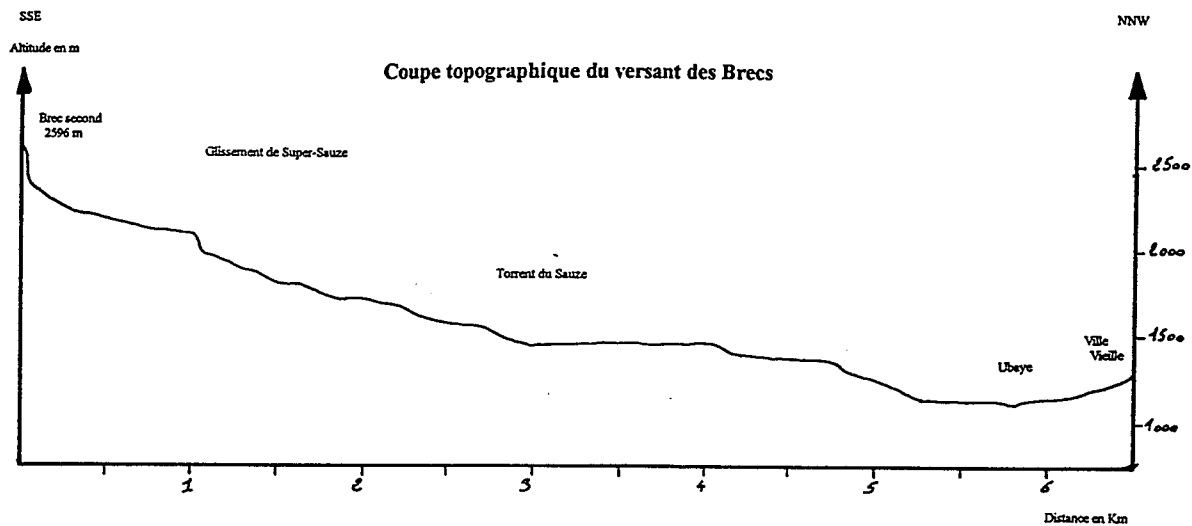
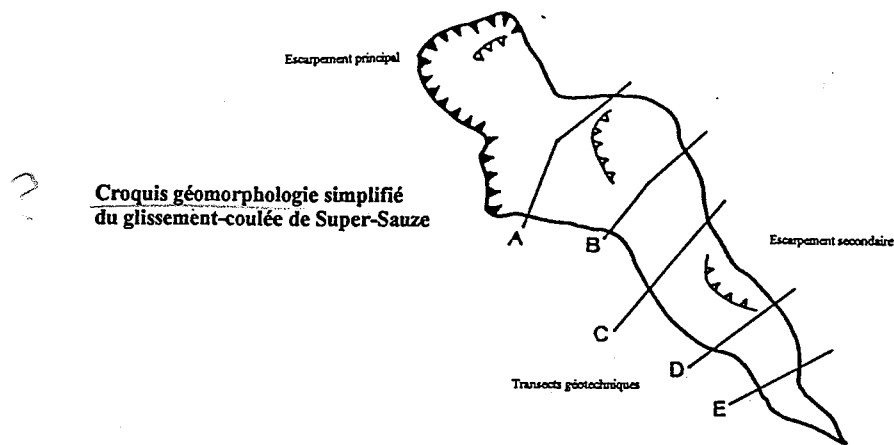


Fig 9: Coupes topographiques et croquis géomorphologiques du glissement-coulée de Super-Sauze (Genet J. & Malet J.P., 1997).

3.2. Description des matériaux rencontrés.

Ce point très important sera plus largement approfondi dans la suite de ce mémoire car il ouvre la problématique de l'altération des marnes noires. Il est cependant nécessaire de rappeler, à travers les observations faites en surface et sur les coupes naturelles (escarpement principal, ravines centrales, bords de la coulée, ...), les différents matériaux rencontrés de la profondeur vers la surface et de l'amont vers l'aval.

- *Les marnes structurées* : Elles sont compactes et d'apparence résistante mais, elles présentent une structure finement litée et schisteuse qui découpe la roche en plaquettes pluricentimétriques. Les plans de fracturation et les diaclasses débitent le massif en panneaux marneux volumineux que l'on peut observer sur l'escarpement principal, sur des échines en place et sur les flancs du glissement-coulée.
- *Une matrice argilo-marneuse très hétérogène* : Cette matrice qui constitue l'essentiel du corps de la coulée comprend des débris marneux de toutes tailles : clastes décimétriques, plaquettes et frites pluricentimétriques, paillettes de 1 centimètre de longueur pour quelques millimètres d'épaisseur et une matrice argileuse. Des blocs de marnes plus ou moins altérés parsèment la coulée en surface et en profondeur.
- *Les dépôts morainiques, les tabliers d'éboulis et les dépôts alluviaux* : ils s'observent en surface du glissement-coulée dans les torrents et les ravines.

3.3. Conditions de déclenchement et évolution des matériaux d'amont en aval (Flageollet J.C., 1996; Malet J.P., 1998).

La zone d'ablation est le résultat de l'évolution du versant par **glissements structuraux bancs sur bancs** qui sont la cause de l'intense déformation et fracturation du massif marneux (les plans de fracturation sont encore visibles actuellement sur l'escarpement principal). Les blocs et les panneaux marneux détachés se retrouvent plus ou moins noyés dans des débris de tailles diverses (plaquettes, frites, paillettes et limons). Une illustration de glissements structuraux bancs sur bancs nous est fournie par l'évolution d'une ravine à l'ouest de la coulée (Photo 5). A une échelle plus réduite, le décollement de cette ravine qui a commencé pendant l'été 1997 peut être la réplique de ce qui s'est produit lors du déclenchement du glissement-coulée de Super-Sauze.

Pendant que les glissements structuraux, commencés vers 1960, sont maintenus jusque dans les années 1970, la coulée de débris progresse vers l'aval. Cette coulée très hétérogène charrie des débris de toute taille. Actuellement, elle n'est plus alimentée que par de petites chutes de blocs et plaquettes issues de l'escarpement. Ainsi le bilan morphogénique du glissement-coulée devient négatif et entraîne un démaigrissement de la zone d'accumulation. Cependant, cette tendance pourrait être inversée dans le cas d'une rupture importante déterminant l'arrivée de matériaux et le recul de l'escarpement, de plus une vidange soudaine de la coulée sous de très fortes pluies n'est pas à écarter (Malet J.P., 1998).



Photo 5 : Génèse du décollement de panneaux marneux sur l'échine ouest du glissement-coulée.

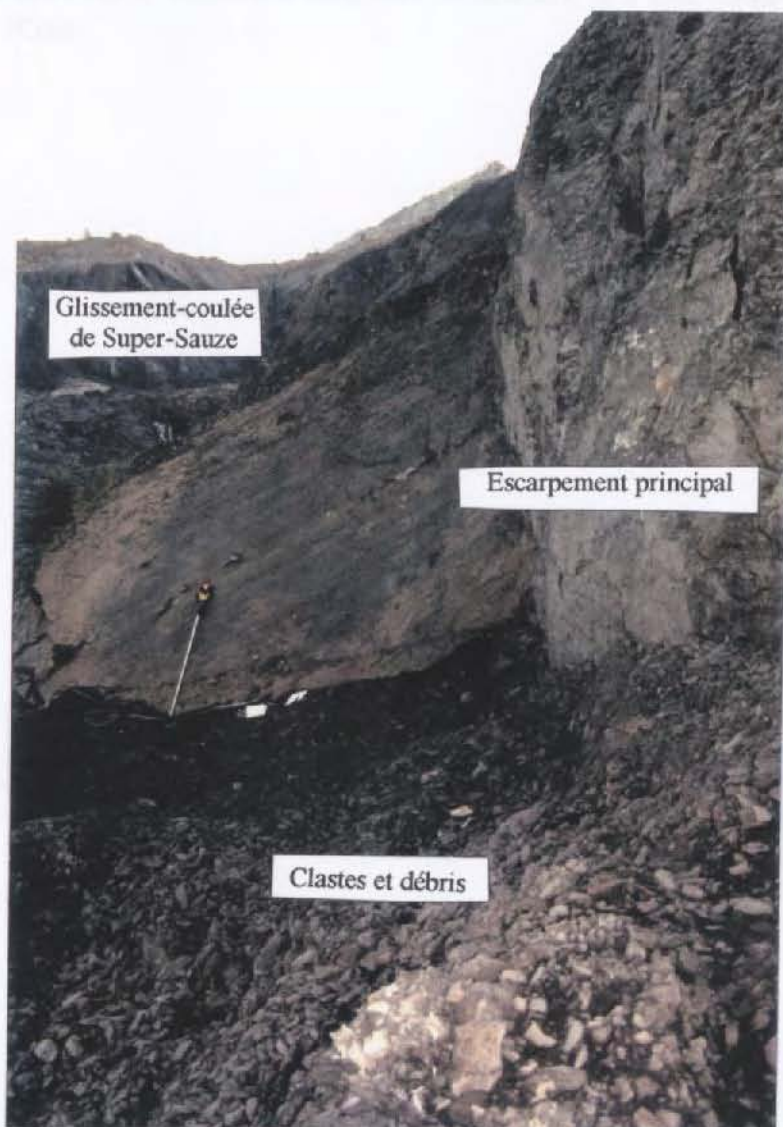
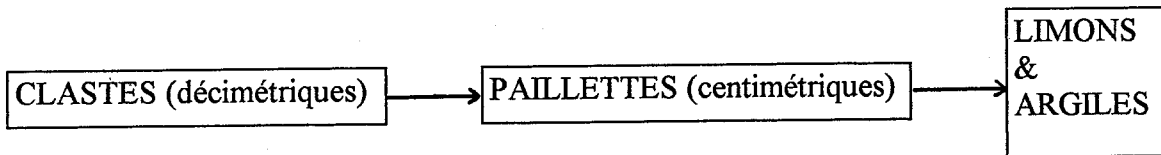


Photo 6 : Escarpement principal de l'échine ouest.

- *Conclusion du chapitre*

Il semblait important de replacer le glissement-coulée de Super-Sauze dans son contexte général afin de bien pouvoir cerner les problématiques qui seront exposées dans le prochain chapitre. Une brève présentation morphologique permet notamment de constater qu'un des faits marquant de l'observation de surface est l'hétérogénéité et la désagrégation apparente des marnes d'amont en aval qui fournissent dans l'ordre d'altérabilité, les débris suivant :



L'évolution et la désagrégation des blocs marneux d'amont en aval paraissent somme toute logique mais une observation plus approfondie amène à une réflexion quant à cette évolution. Ce point très important sera développé par la suite car il mérite une attention particulière. Il s'agit maintenant de présenter les objectifs de la présente étude.

CHAPITRE II

LES ACQUIS ET LES OBJECTIFS ...

Nous nous attacherons à présenter les objectifs de ce mémoire, tout en nous appuyant sur les travaux déjà effectués sur le glissement depuis de nombreuses années.

1. LES ACQUIS ET LES QUESTIONS EN SUSPENS.

Ce travail fait suite aux travaux de recherches engagés par D. Herrmann (1997) sur les caractéristiques géomécaniques des marnes noires du glissement-coulée de Super-Sauze. Ce dernier a effectué les caractérisations et les essais géomécaniques suivants :

- poids spécifiques et teneurs en eau à différentes profondeurs ;
- limites d'Atterberg pour caractériser les propriétés des marnes noires selon leur teneur en eau ;
- taux de carbonate ;
- analyses granulométriques afin de déterminer la distribution dimensionnelle des marnes noires ;
- valeur au bleu de méthylène (VBS) afin de mesurer la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans les marnes noires ;
- analyse minéralogique afin de déterminer le cortège minéralogique des marnes noires. X

A la suite de ces travaux, complétés par les résultats trouvés dans la littérature, de nombreux points restent à éclaircir. Ils concernent en particulier :

- *Les besoins de résultats complémentaires pour :*
 - teneurs en eau, poids spécifiques et limites d'Atterberg.
- *Réflexion sur un nouveau protocole granulométrique adapté.*

Les pourcentages de fines données par D. Herrmann semblent être contraires aux observations faites en surface de la coulée et dans les ravines intra-coulée à savoir que les éléments grossiers (débris marneux) occuperaient un pourcentage non négligeable. Il reste à proposer de nouvelles solutions en passant par des essais de faisabilité...

- *Le compactage des marnes du glissement-coulée.*

Les observations in situ, grâce aux tranchées creusées, font apparaître que, même proche de la surface, les marnes ont un degré de compacité élevé. Ces observations, d'abord visuelles et tactiles (creusement des fosses), peuvent être mis en évidence par la réalisation d'essais en laboratoire tel que l'essai Proctor et l'essai oedométrique.

- *Les caractéristiques intrinsèques des marnes noires.*

La détermination des angles de frottement et de la cohésion des marnes noires du glissement est essentielle dans les calculs de stabilité. Ces paramètres peuvent être connus par la réalisation d'essai de cisaillement en laboratoire, à savoir :

- le cisaillement rectiligne à la boîte de Casagrande ;
- le cisaillement triaxial ;
- le cisaillement alterné (détermination des caractéristiques résiduelles).

- *La perméabilité des marnes noires.*

Elle peut se faire en laboratoire à travers des essais de perméabilité et des essais Ksat.

- *La quantification de l'altérabilité et de l'érodabilité des marnes noires*

L'évolution de la dégradation des marnes noires, en surface et en subsurface, amène à s'interroger sur l'influence des agents météoriques tel que l'hydroclastie et la cryoclastie. Des essais d'alternances gel/dégel et humectation/dessiccation, de dégradabilité, d'altérabilité et de porosité peuvent donner une première approche sur l'influence de ces processus météoriques.

2. DES INVESTIGATIONS GEOTECHNIQUES DEJA BIEN ENGAGEES (FIGURE 10).

En complément des essais géomécaniques réalisées par D. Herrmann, de nombreux travaux de recherche ont été effectués depuis plusieurs années. Pour permettre de bien situer nos travaux dans un contexte scientifique de recherche plus large, nous rappellerons assez brièvement les différentes actions engagées sur ce site.

2.1. En aval des réalisations géotechniques :

- **le levé morphologique** : une carte géomorphologique du glissement-coulé de Super-Sauze (figure 10) a été réalisée par J.C. Flageolet, O. Maquaire, et D. Weber. en 1995. Le suivi des déplacements est assuré par D. Weber. Le réseau de points de surveillance topométrique est représenté sur la figure 10 ;

- **connaissance et interprétation des paramètres climatologiques et hydrologiques** : une station climatologique a été installée à proximité du glissement en 1995. Elle s'avère indispensable quand on sait l'importance des facteurs Pmm et T°C sur les déclenchements des mouvements de terrains. Même si les données ne peuvent pas encore être fiables car elles n'enveloppent pas une normale climatique complète, elles permettent déjà de recueillir d'importantes informations quant au caractère agressif de ce climat (Sommen Y., 1995). E. Jung (1998) poursuit actuellement le traitement des données.

2.2. Les travaux in situ.

Ils permettent la reconnaissance du phénomène dans sa troisième dimension et furent l'objet des campagnes de 1996 et 1997. Ils se poursuivent encore actuellement où ils se font sur cinq transects définis d'amont en aval : A; B; C; D et E.(Figure 10). Le tableau 2 présente les différents types d'investigations et leur nombre.

GLISSEMENT DE SUPER-SAUZE
 COMMUNE D'ENDESSEVADRES (ALPES DE HAUTE-PROVENCE)
 Carte géomorphologique au 1/1000 ème
 (fin de 20 Août 1952)
 Carte dressée au CIRD par J.C. FLACELLER, B. PERRIN, B. MERER

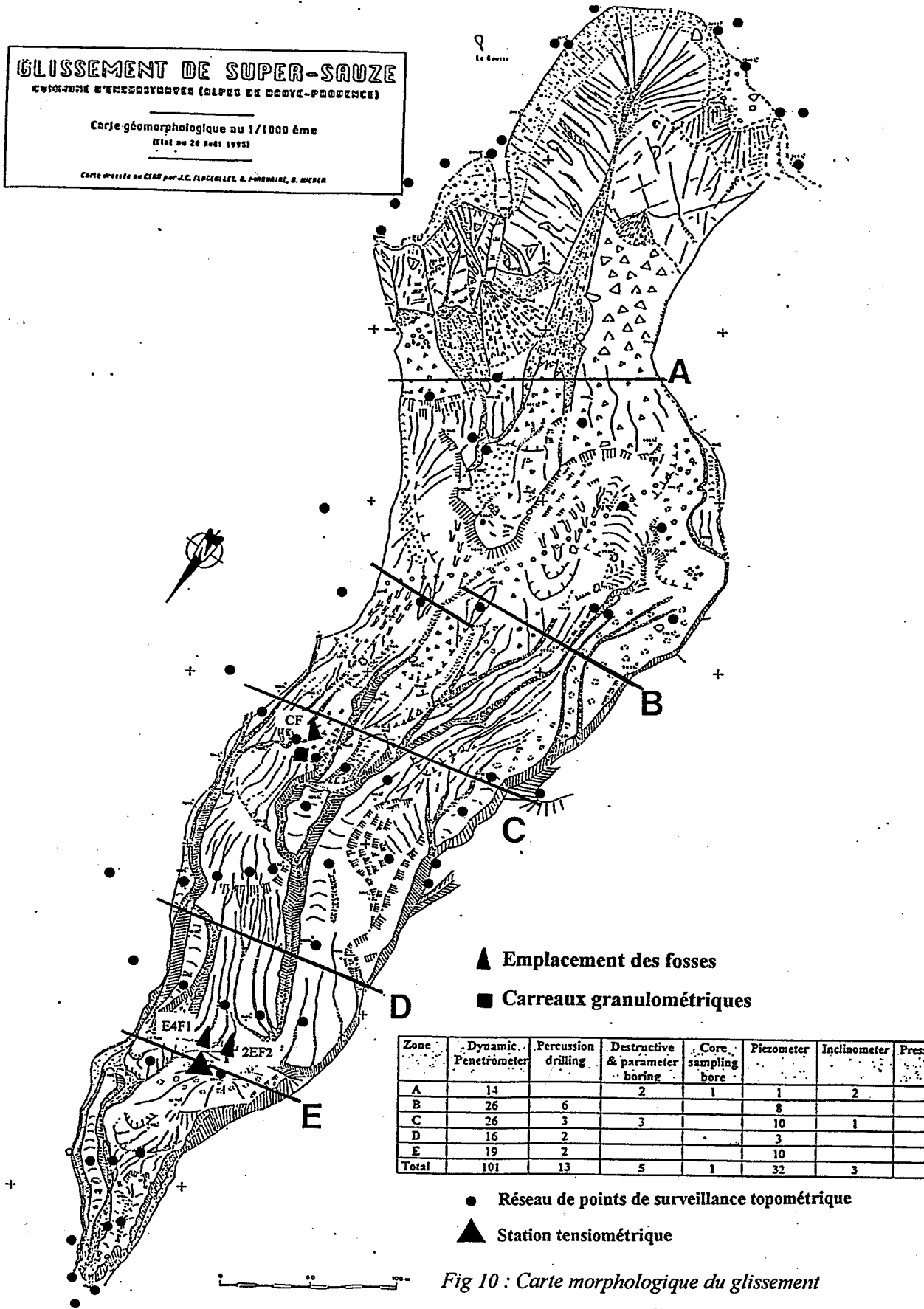


Fig 10 : Carte morphologique du glissement

Fig 10 : Carte morphologique du glissement et suivi topométrique.

Transect	sondages pénétrométriques*	sondages vibropercuteur*	sondages destructifs**	sondage carotté**	piezo- mètres*	helino- mètres**	pressio- mètres
A	14		2	1	1	2	11**
B	26	6			8		3
C	26	3	3		10	1	
D	16	2			3		
E	19	2			10		
Total	101	13	5	1	32	3	14

Tableau 2 : Types d'investigation et nombre (Genet J. & Malet J.P., 1997).

- **Les essais pénétrométriques** : Il détermine la résistance de pointe unitaire appelée Qd. De ces essais, 4 couches ont pu être décrites dans le corps du glissement. (tableau 3) ;

	description géotechnique	épaisseur (m)	Qd (MPa)	Pf (MPa)	PI (MPa)	EM (MPa)	vitesse sismique (m/s)	vitesse d'avancement V (m/h)
1 a	argile très molle (boue)	0 à 3 m	< 1	non mesurable	non mesurable	non mesurable	400 à 750	> 125
1 b	argile molle	0 à 4,70 m	1 < Qd < 3	< 0,25	< 0,3	< 5		
2	argile raide et compacte	0 à 5 m	3 < Qd < 8-10	0,25 < Pf < 2,5	0,3 < PI < 4	5 < EM < 15	1000 à 1800	10 < V < 125
3	argile très compacte ou marnes non remaniées (in-situ)	atteintes entre 0 et 20 m	> 8 - 10	> 2,5	> 4	> 15	2000 à 3200	< 10

Tableau 3 : Caractéristiques géomécaniques des couches du glissement-coulée (Genet J. & Malet J.P., 1997).

- **les essais inclinométriques** : 3 essais inclinométriques ont été réalisés. Ils ont montré que les mouvements les plus importants s'opéraient au contact de la couche argileuse remaniée et très compactée et non à l'interface entre les matériaux remaniés et les marnes in situ. (Genet J. & Malet J.P., 1997) ;

- **Le pressiomètre** : Cet essai s'attache à identifier les caractéristiques mécaniques des marnes in situ tel que le module de cisaillement (tableau 3) ;

- **Les sondages** : 13 sondages par vibro-percussion et 1 essai carotté ont donné la répartition verticale suivante :

* Une couche entre 0 et 2 m constituée d'une matrice argileuse et de paillettes marneuses.

* Une couche intermédiaire entre 2 et 4.5 m où l'on rencontre une formation beaucoup plus hétérogène car il y règne des blocs volumineux.

* *Au delà de 5 m*, les argiles sans éléments grossiers prennent place (Genet J. & Malet J.P., 1997).

- **Les caractérisations hydrodynamiques** (Velcin S., 1997): 32 piézomètres, réparties sur les différents transects, ont été installés pour situer le niveau de la (ou des) nappe(s) phréatique(s). Des essais d'eau in situ (essais Lugeon, essais Lefranc, essais Porchet) ont permis de caractériser le comportement des marnes du glissement à savoir :

* Les marnes in situ sont imperméables ($K = 10^{-11} \text{ ms}^{-1}$) néanmoins, certaines fissures et diaclases peuvent engendrer un écoulement préférentiel.

* L'ensemble du corps de la coulée apparaît comme relativement imperméable (10^{-9} à 10^{-11} ms^{-1}) avec cependant certaines formations semi imperméables (10^{-5} à 10^{-9}).

* La surface apparaît comme relativement perméable (10^{-2} à 10^{-5} ms^{-1}).

L'existence de couloirs de circulation préférentielle au sein de la coulée, la forte hétérogénéité de celle-ci et les fortes variations latérales et verticales de la perméabilité, rendent le comportement hydrodynamique de la coulée très complexe.

Une station tensiométrique a été installée sur le replat inférieur (transect E). Les premières mesures indiquent l'existence d'une infiltration de la surface vers la nappe (après saturation progressive de la zone de rétention) et un écoulement significatif de la nappe d'amont en aval.

- **La prospection électrique** (Schmutz M., 1995 & 1996) : A ce jour, 3 campagnes ont été réalisées sur la résistivité apparente des matériaux et la sismique réfraction. La vitesse sismique est d'autant plus élevée que le terrain présente une densité et un coefficient d'élasticité plus élevé, c'est à dire qu'il est plus compact.

Même si les résultats sont difficiles à interpréter à cause de l'hétérométrie du corps de la coulée, Ils tendent à rejoindre les essais géotechniques en distinguant les mêmes couches (voir tableau 3).

tentent de !

• *Conclusion :*

Ces rappels très succincts sont ici indispensables afin de bien avoir à l'esprit les caractéristiques in situ des matériaux de la coulée. En effet, les essais en laboratoire se doivent d'être un complément d'information aux essais in situ.

Le contexte d'étude étant rappelé et les objectifs à poursuivre étant définis, nous devons maintenant aborder les travaux réalisés sur le terrain.

CHAPITRE III

LES CAMPAGNES DE PRELEVEMENTS.

Se fut l'occasion de compléter quelques observations de terrain et surtout de prélever des échantillons complémentaires afin de poursuivre, et de compléter, les investigations engagées en laboratoire.

Contrairement aux campagnes de prélèvements précédentes (D. Herrmann, 1997; J. Genet & J.P. Malet, 1997), aucun outil de forage permettant le prélèvement en profondeur n'a été utilisé (type vibropercuteur ou autres). Les échantillons ont été prélevés en surface ou en subsurface et dans des fosses creusées jusqu'à une profondeur de l'ordre de 1.50 mètres. Il est donc nécessaire de présenter maintenant les modes de prélèvement des échantillons et la description des fosses creusées.

1. MODE DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS ET NOMENCLATURE.

Les modes de prélèvement utilisés sur le terrain sont :

- **Les carottiers métalliques** pour les teneurs en eau, les poids spécifiques, les essais de cisaillement et autres ... Des carottiers de 251.3 cm³ (8 cm de diamètre pour 5 cm de hauteur) et de 211.7 cm³ (7 cm de diamètre pour 5.5 cm de hauteur) ont été utilisés. Il est important de connaître le poids vide de chacun d'entre eux avant de faire les prélèvements. Les carottiers doivent être délicatement enfoncés dans le sol par leur coté tranchant puis, emballés soigneusement afin d'éviter toutes décompressions (photo 7). Il est nécessaire de bien choisir le lieu où se feront les prélèvements. En effet, le sol doit être homogène et sans trop d'éléments grossiers. Nos échantillons étaient donc exposés à deux obstacles :

- l'hétérogénéité de la coulée. Des éléments solides supérieurs au centimètre (débris de marnes et de calcites) pouvaient, soit interférer l'enfoncement du carottier, ce qui, dans ce cas, nous obligeait à changer d'emplacement soit, dans le pire des cas, s'intégrer dans le carottier et fausser ainsi les essais prévus (par exemple, les teneurs en eau et les poids spécifiques sont différents pour des particules solides)

- le volume limité des carottiers utilisés augmentait la nécessité de ne pas avoir d'éléments grossiers supérieurs au centimètre. Dès lors, se posait le problème de la représentativité du milieu caractérisé par son hétérogénéité. Pour cela, il serait nécessaire dans l'avenir, de prélever dans des carottiers métalliques plus volumineux (diamètre de 15 cm pour une hauteur de 10 cm, voir plus).

- **Les pots en verres** pour le prélèvement d'échantillons remaniés dans le but de faire des teneurs en eau. Il est aussi nécessaire de connaître le poids de chacun des pots vides, avant le prélèvement des échantillons.

- **Les sacs** pour des limites d'Atterberg, des granulométries, des teneurs en eau et autres... Il faut remarquer que le prélèvement dans des sacs pour la détermination des teneurs en eau est déconseillé pour ce type de matériaux. En effet, la condensation sur les sacs peut sous-estimer les mesures et les débris marneux, souvent anguleux, peuvent percer les sacs. Les carottiers et les pots en verres présentent donc l'avantage d'être un prélèvement plus fiable.



Photo 7 : Emballage des échantillons prélevés dans des carottiers métalliques.

Pour correctement identifier la provenance des échantillons, la nomenclature suivante a été adoptée:

- une première lettre majuscule indiquant le transect où s'est effectué le prélèvement ;
- une seconde lettre majuscule indiquant le mode de prélèvement : F pour fosse ou tranchée ;
- un chiffre pour indiquer le numéro du sondage (F1 pour la fosse n°1).

2. DESCRIPTION DES FOSSES

2.1. Description des fosses du transect E.

Ce transect est très intéressant car il est situé au contact entre le replat inférieur qui termine la coulée et une succession de bourrelets superposés en amont qui semblent venir le recouvrir. C'est au niveau de ce contact que les fosses ont été creusées.

2.1.1. La tranchée de juillet 1997 : E4F1.(Figure 11 et photo 8)

Elle a été creusée à la pelle et à la pioche sur une profondeur de 80 cm et une longueur de 1 m. Elle se situe en amont du point E4 d'où sa nomenclature. Le terrain était relativement humide suite à des pluies prolongées.

- plusieurs teneurs en eau (onze) ont été prélevées à trois profondeurs différentes, dont cinq sous le niveau initial du replat (figure 11) ;
- quatre séries de trois carottiers ont été prélevées à quatre niveaux différents.

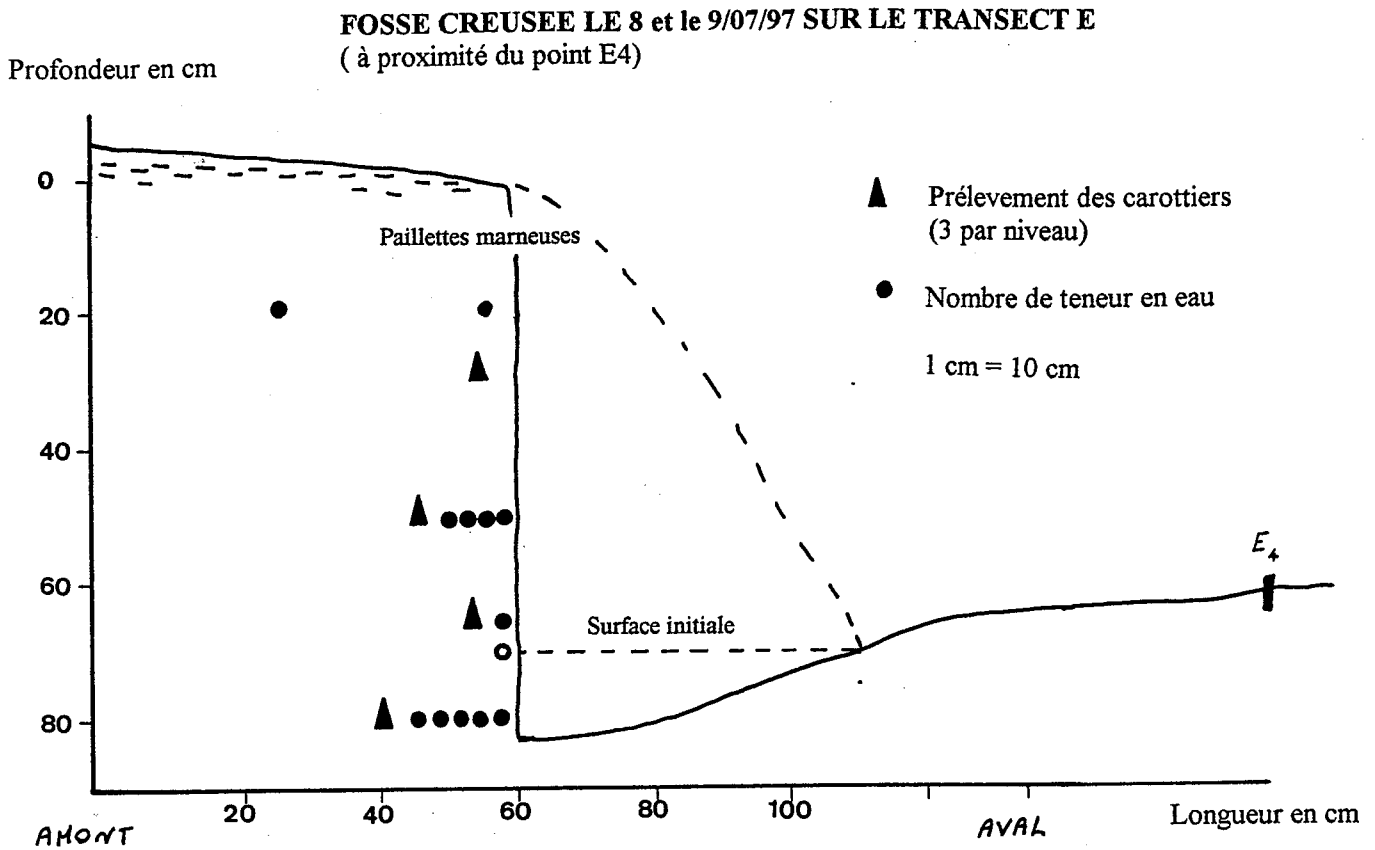


Fig 11 : Fosse E4F1.

2.1.2. La fosse d'octobre 1997 : EF2 (figure 12 et photo 8)

Elle à des dimensions plus grandes : 3.10 m de longueur, 60 cm de largeur et 1.5 m de profondeur. Le but de cette coupe transversale est de recouper la succession des bourrelets (photo 4), s'avancçant sur le replat inférieur, afin de voir si on distingue différents horizons et notamment les surfaces de recouvrement.

- *les observations :*

Sur les 5-10 premiers centimètres de profondeur, l'aspect du sol était « sec ». L'humidité du sol et sa compacité semblaient augmenter jusqu'à 40 cm puis, le creusement à la pioche s'est avéré franchement difficile entre 40 cm et 1 mètre car le matériau était compact, argileux et collant. Au-delà de 1 mètre, il est devenu plus « mou » et plus facile à creuser.

Seul un amas d'humus, décelé au niveau du bourrelet n°3, et une lame de rizhomes s'étendant sur 50 cm, entre le bourrelet 3 et le bourrelet 2 (figure 12), peuvent constituer la preuve d'un recouvrement successif. Mais aucune surface nette de recouvrement ne se distingue en aucun point.

- *Les échantillons prélevés:*

- sept teneurs en eau à des profondeurs régulières (tous les 20 cm) ;
- un grand sac de matériaux, amassés à 80 cm, de profondeur dans le but de faire une nouvelle limite d'Atterberg ;
- 4 séries de 3 carottiers, prélevées à différentes profondeurs, afin d'en déduire des poids spécifiques.

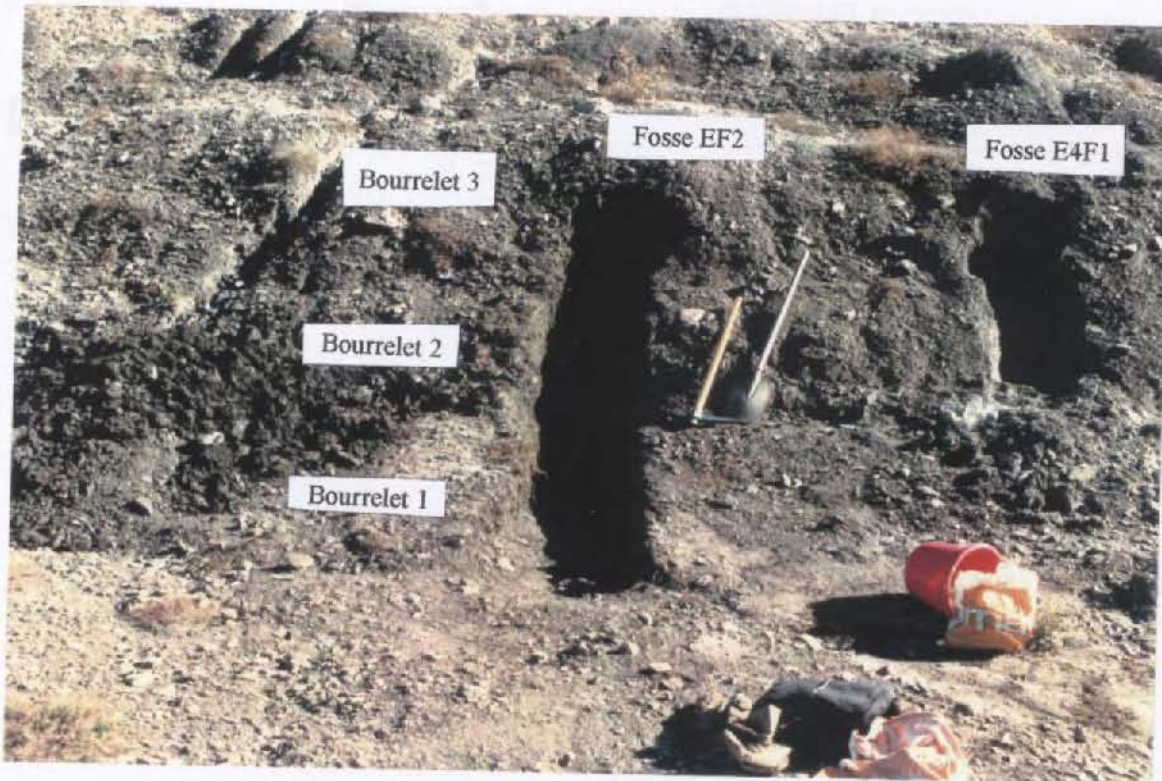


Photo 8 : Fosse EF2 et E4F1.

FOSSE CREUSEE LE 3/10/97 SUR LE TRANSECT E

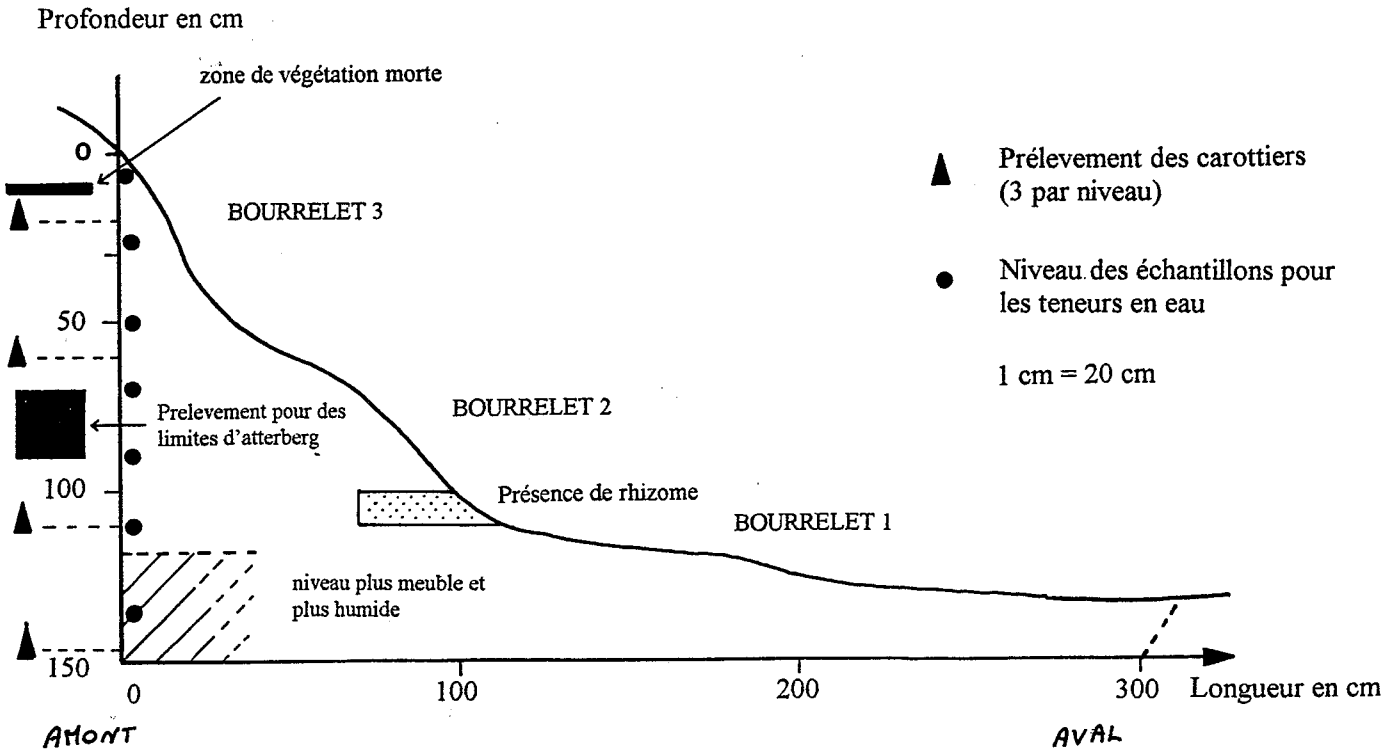


Figure 12 : fosse EF2.

Nota : Une campagne, en mai 1998, à permis de prélever à nouveau 4 séries de 3 carottiers, de 211.7 cm³, dans cette fosse. Les échantillons porteront donc comme nomenclature 2EF2.

2.2. La fosse CF du transect C (figure 13 et photo 9).

Cette fosse, de 80 cm de longueur, 1 m de profondeur et 80 cm de largeur, a été creusée afin de mieux se rendre compte de l'état des blocs marneux en profondeur. Sur les 5 à 10 premiers centimètres de profondeur le sol était composé de paillettes marneuses centimétriques.

- *Les observations :*

Sur le profil, on distingue 2 blocs marneux (figure 13) :

- le premier, de 5 à 50 cm de profondeur, est constitué de plaquettes relativement grandes (pouvant atteindre 10 centimètres de longueur et plusieurs centimètres de largeur et d'épaisseur) mais, sans cohésion;

- le deuxième, de 40 à 90 cm de profondeur, est d'apparence plus cohérente mais, il est formé de clastes plus fines (plusieurs centimètres de longueurs et de largeur pour une épaisseur de l'ordre du centimètre).

Au fond, on observe une masse boueuse très humide et peu compacte où sont enchâssés des clastes de toute taille.

- *Les échantillons :*

- 3 teneurs en eau ont été prélevées dans la matrice fine ;

- 3 échantillons représentatifs des différentes clastes (paillettes de surface, clastes du premier bloc et du deuxième bloc).



Photo 9 : fosse CF.

FOSSE CREUSEE LE 5/10/1997 SUR LE TRANSECT C

1 cm = 10 cm

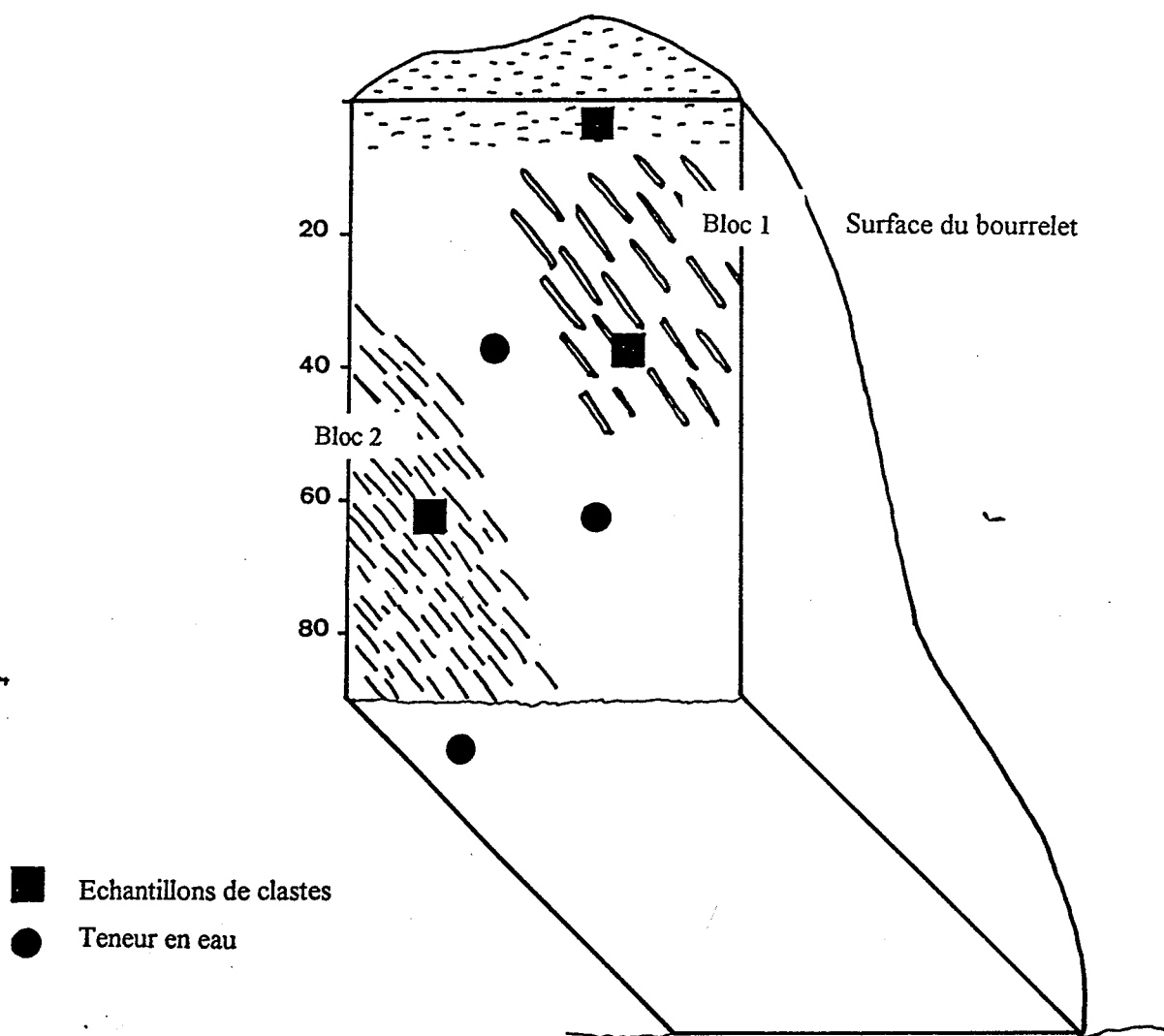


Figure 13 : fosse CF.

Trois autres échantillons ont été prélevés (Surtout des clastes de différentes tailles et 3 gros pavés cohérents pris au coeur de panneaux marneux) dans l'objectif de pouvoir réaliser quelques essais permettant d'expliquer, et de quantifier, l'altération des marnes noires.

3. CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Le glissement de Super-Sauze affecte donc les formations marneuses très répandues dans la vallée de Barcelonnette. Il associe un glissement stricto sensu à l'amont et une coulée de débris à l'aval. La frontière, entre les deux, reste encore assez floue, mais les conditions de déclenchement et l'évolution des matériaux semble de mieux en mieux cernées (Flageollet J.C., 1996; Genet J. & Malet J.P., 1997; Malet J.P., 1998).

Les blocs et les compartiments marneux qui se sont détachés par glissements structuraux s'accumulent en se déformant progressivement (perte de cohésion, foisonnement...) puis ils constituent une coulée de débris. Les échantillons prélevés essentiellement en subsurface de la coulée serviront, d'une part, à compléter les caractéristiques géomécaniques des marnes noires du glissement et, d'autre part, à apporter des éléments complémentaires à ces caractéristiques.

Nous avons aussi fait part, dans la description morphologique du glissement-coulée, de la rapidité avec laquelle les blocs marneux semblent se désagréger d'amont en aval (tout du moins en surface et en subsurface). Dès lors, l'altérabilité des marnes noires peut-elle avoir des conséquences sur certaines caractérisations géotechniques ? Nous nous efforcerons d'y apporter quelques éléments de réponse concret dans la prochaine partie.

Seconde Partie :

**L'INFLUENCE DE L'ALTERABILITE DES MARNES-NOIRES DE LA COULEE SUR
LEURS CARACTERISTIQUES PHYSIQUE.**

CHAPITRE I

QUELQUES RESULTATS COMPLEMENTAIRES A DES ESSAIS DEJA EFFECTUES

D. Herrmann (1997) a déjà bien entamé la caractérisation des marnes noires du glissement-coulée de Super-Sauze en laboratoire. Il a notamment déjà défini les poids spécifiques secs et humides, les teneurs en eau, les limites d'Atterberg, le cortège minéralogique et la granulométrie des matériaux. Il a aussi apporté des éléments bibliographiques indispensables à la bonne continuité des investigations de laboratoire.

Avant d'évoquer certaines modifications sur les essais granulométriques et les nouveaux essais réalisés sur les marnes noires, il est important d'apporter quelques résultats complémentaires sur les teneurs en eau, poids spécifiques et limites d'Atterberg.

1. LES TENEURS EN EAU.

C'est un essai classique dont les principes, données par la norme NF P 94-050, ne seront pas rappelées ici (annexe 1).

Les échantillons ont été prélevés à faible profondeur principalement sur le transect E (Dans les deux tranchées) et trois sur le transect C. Les résultats sont présentés sur le tableau 4 et la figure 14).

Afin d'améliorer la précision des résultats, il serait souhaitable dans l'avenir de disposer d'une balance de précision au 1/10e de gramme avec une batterie. Cette balance permettrait de peser sur place les échantillons, aussitôt après le prélèvement.

Les résultats obtenus par D. Herrmann (1997) sont rappelés dans le tableau ci dessous:

	Wn (%)			
	2 campagnes (juillet et septembre 1996)	Campagne juin-juillet 1997	Campagne septembre 1996	échantillons groupés
Nombre	88	17	71	21
Minimum	3.6	9.5	3.6	4.2
Moyenne	12.6	13.7	12.4	12.3
Maximum	17.6	16.4	17.6	17.3
Variation	21.5	14.0	22.8	23.1

Tableau 4: analyses statistiques des teneurs en eau prélevées par D.Herrmann (1997).

Campagne juillet 1997				Campagne octobre 1997				Campagne mai 1998			
n° échantillon	Profondeur en m	Wn (%)	Echantillons groupés	n° échantillon	Profondeur en m	Wn (%)	Echantillons groupés	n° échantillon	Profondeur en m	Wn (%)	Echantillons groupés
E4E1*	surface	12,7	12,7	E12*	0,15	7,9	7,9	2EF2	0,4	13,1	13,1
E4E1*	0,3	11,8	12,6	E12*	0,3	11	11,8	2EF2	0,4	11	12,1
E4E1*	0,3	13,3		E12*	0,3	12,7		2EF2	0,4	12,2	
E4E1*	0,5	15,5		E12*	0,35	9,5	9,5	2EF2	0,7	13,7	14,1
E4E1*	0,5	15,7		E12*	0,6	12,9		2EF2	0,7	13,6	
E4E1*	0,5	15,5	15,5	E12*	0,6	13	12,3	2EF2	0,7	15	
E4E1*	0,5	15,3		E12*	0,6	11,1		2EF2	0,9	14,2	
E4E1*	0,5	15,7		E12*	0,8	12,8	12,8	2EF2	0,9	13,5	13,8
E4E1*	0,65	14,8		E12*	1	13,5		2EF2	0,9	13,7	
E4E1*	0,65	14,4	15	E12*	1,2	15,1	15,1	2EF2	1,1	16,1	
E4E1*	0,65	15,9		E12*	1,45	16,3	16,3	2EF2	1,1	14,3	15,2
E4E1*	0,8	15,9		E12*	1,5	15,5	15,5				
E4E1*	0,8	16,4	16,4	CF	surface	3,4	3,4				
E4E1*	0,8	16,6		CF	0,35	6,7	6,7				
E4E1*	0,8	16,7		CF	0,6	8,6	8,6				
				CF	1	13,2	13,2				
Moyenne		15,1	14,4			11,4	11,3			13,7	13,8

	Analyse statistique globale			
	3 campagnes	Campagne juil-97	Campagne oct-97	Campagne mai-98
Nombre	42	15	16	22
Minimum	3,4	11,8	3,4	3,4
Moyenne	13,4	15,1	11,4	13,2
Maximum	16,7	16,7	16,3	16,4

* Prélèvement dans des pots en verre

° Prélèvement dans des carottiers métalliques

Tableau 5: Teneur en eau de tous les échantillons et analyses statistiques.

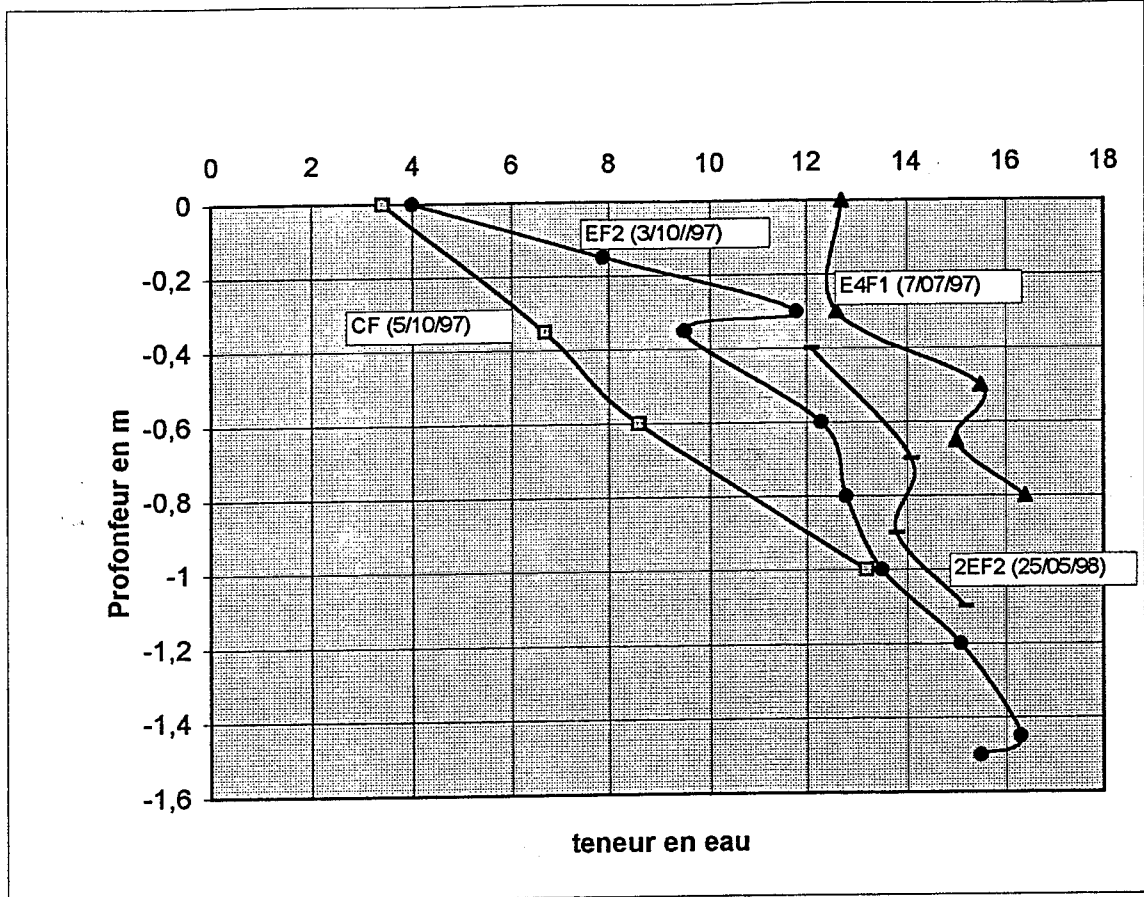


Fig 14: Gradient vertical des teneurs en eau

- *Comparaison des résultats et discussion :*

La teneur en eau naturelle des terres noires reste basse, entre 13 et 13.5% en moyenne et elle n'excède pas 17%. Ces résultats sont bien corrélés avec ceux présentés par D. Herrmann (1997).

Deux points témoignent de l'hétérogénéité de Wn dans la coulée:

- le prélèvement de plusieurs échantillons, à des profondeurs identiques, révèle des différences de teneur en eau de 2%, ce qui n'est pas négligeable compte tenu de la proximité des prélèvements. Ces écarts peuvent être attribués à la plus ou moins grande présence d'éléments grossiers dans les matériaux prélevés.

- il n'y a pas de corrélation entre les gradients verticaux (Figure 14) : la croissance est irrégulière avec la profondeur. De plus, pour des mêmes profondeurs, les gradients varient d'un sondage à l'autre.

Les échantillons de la campagne de juillet 1997 ont été prélevés pendant une période de précipitation, ce qui explique une moyenne de 14.5%.

Il est intéressant de comparer les teneurs en eau mesurées dans la fosse E4F1, après une période de précipitation, avec celles mesurées dans la fosse conjointe, en octobre 1997, pendant une période de sécheresse (EF2). La teneur en eau maximale, de 16.4%, est atteinte dès 0.80 m dans la fosse E4F1 pendant la période humide, alors que cette même valeur n'est obtenue qu'à 1.40 m dans la fosse EF2 pendant la période sèche.

Une remarque importante peut aussi être faite sur la relation entre la sensation de compactage des marnes, sous les coups de pioche pendant le creusement des fosses, et les teneurs en eau : les marnes paraissaient compactes entre 0.40 et 0.80 m soit une teneur en eau de 10 à 13% alors qu'au-delà, les marnes semblaient plus molles (teneur en eau > 14%).

2. LES POIDS SPECIFIQUES.

Des poids spécifiques ont été déterminés sur des matériaux de la coulée et sur des plaquettes marneuses solides prélevées sur des blocs en surface de la coulée.

2.1. Poids spécifiques des matériaux de la coulée.

Les principes de la norme AFNOR NF P 94-053 ne seront pas donnés ici (cf mémoire D. Herrmann et annexe 2). Rappelons juste que :

- Le poids spécifique humide γ_h est le rapport du poids total d'une certaine quantité de sol à son volume;
- Le poids spécifique sec γ_d est le rapport du poids de matériau sec, contenu dans une certaine quantité de sol, au volume de ce même sol. Il définit l'état dans lequel se trouve le matériau : dense ou lâche;
- leur connaissance est indispensable, par la suite, pour des calculs de stabilité.

Vingt-et-un essais ont été effectués sur des échantillons prélevés par carottiers entre 0.30 et 1.10 mètres. A ceci, peuvent s'ajouter les quatre essais effectués par D. Herrmann (1997) (tableau 6).

Sur nos échantillons, les poids spécifiques humides sont, en moyenne, compris entre 21 et 22 KN/m³, avec un maximum γ_h de 22.6 KN/m³ pour 2EF2 0.40 m et un minimum de 20.2 KN/m³ pour EF2 0.30 m. Ce maximum est certainement dû à la présence d'un élément de 120 g. Les poids spécifiques secs sont en moyenne de 18 à 19 KN/m³, avec un minimum de 17.7 KN/m³ pour 2EF2 1.10 m et un maximum de 20.4 pour 2EF2 0.40 m.

La variation des poids spécifiques, pour un même niveau de profondeur, semble d'autant plus grande que la variation de la teneur en eau est élevée. Cette variation peut être accentuée par la présence d'éléments solides, tel est le cas pour les échantillons 2EF2 0.40 m.

2.2. les poids spécifiques sur les blocs marneux de la coulée.

Des poids spécifiques ont été calculés sur six plaquettes marneuses pluricentimétriques, d'apparences cohérentes, prélevées sur des blocs marneux de la coulée. Les principes de l'essai (aussi présentés dans la norme NF P 94-053) sont les mêmes que pour les matériaux remaniés de la coulée. Le volume est déduit après plusieurs pesées, dont une est faite après immersion de l'échantillon dans l'eau par pesée hydrostatique. Les différentes étapes de l'essai sont décrites en annexe 2. Les résultats sont reportés sur le tableau 7.

Echantillons	Profondeur en mètre	γ_h (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	Wn (%)	dispersion de γ_h (KN/m ³)	dispersion de γ_d (KN/m ³)	dispersion de Wn (%)
E4F1	0,3	21,4	19,1	11,8			
E4F1	0,3	21,4	18,9	13,3	0	0,2	1,5
E4F1	0,5	21,7	18,8	15,5			
E4F1	0,65	21,6	18,8	14,8			
E4F1	0,65	22,2	19,4	14,4	0,6	0,6	0,4
EF2	0,3	21,8	19,6	11			
EF2	0,3	20,2	17,9	12,7	1,6	1,7	1,7
EF2	0,6	21,8	19,4	12,9			
EF2	0,6	22,1	19,6	13	0,3	0,4	0,1
EF2	1,5	21,8	18,9	15,5			
2EF2	0,4	21,3	18,8	13,1			
2EF2	0,4	22,6	20,4	11	1,3	1,6	2,1
2EF2	0,4	22,1	19,7	12,2			
2EF2	0,7	21,1	18,5	13,7			
2EF2	0,7	21,3	18,7	13,6	0,6	0,7	1,4
2EF2	0,7	20,7	18	15			
2EF2	0,9	21,3	18,6	14,2			
2EF2	0,9	21,5	18,9	13,5	0,5	0,5	0,7
2EF2	0,9	21	18,4	13,7			
2EF2	1,1	20,5	17,7	16,1			
2EF2	1,1	21,6	19	14,3	1,1	1,3	1,8
BV4	0,5	22,4	20,1	11,9			
IC1	Surface	19,3	17,6	9,6			
TB2	Surface	21,4	19,5	9,3	2,3	3	4,9
TB3	Surface	21,6	20,6	4,7			
Minimum	Surface	19,3	17,6	4,7	0	0,2	0,1
Moyenne	0,6	21,4	18,9	12,8	0,9	1,1	1,6
Maximum	1,1	22,6	20,6	16,1	2,3	3	4,9

Résultats
D. Hermann

Tableau 6 : Détermination des γ_d et γ_h pour les marnes noires du glissement-coulée de Super-Sauze

	Poids secs des plaquettes marneuses (grammes)	γ_d (KN/m ³)
1	107	17.3
2	272.1	17.3
3	227.3	17.6
4	83.8	18.8
5	51	18.2
6	60.5	17.3
Moyenne	133.6	17.8

Tableau 7 : γ_d des des marnes cohérentes prélevés sur des blocs marneux en surface de la coulée.

- Discussion des résultats.

Un nombre de mesure plus important donnerait des valeurs plus fiables mais, les résultats sont en moyenne similaires aux poids spécifiques γ_d obtenus sur les matériaux remaniés de la coulée. La variation des poids spécifiques de ces matériaux remaniés ne semblerait donc pas être due à la présence des débris marneux cohérents, mais à la variation de la teneur en eau. Il serait intéressant d'effectuer des mesures de poids spécifiques secs et humides sur des marnes en place afin de pouvoir comparer les poids spécifiques des plaquettes marneuses, provenant des blocs de la coulée, avec les marnes en place. Cette comparaison permettrait de voir s'il y a eu un phénomène de décompression.

3. LES LIMITES D'ATTERBERG.

Les limites d'Atterberg ont été réalisées, en accord avec la norme NF P 94-051, sur quatre échantillons provenant du transect C et E et, sur lesquels des granulométries ont aussi été effectuées. A ces résultats, il faut rajouter trois essais réalisés à partir des matériaux restant de trois des vingt essais d'Atterberg effectués par D. Herrmann (1997) (tableau 8). La détermination des limites de plasticité et de liquidité (les principes sont présentés en annexe 3) peuvent varier suivant le jugement de l'opérateur. Il peut donc être utile d'avoir, pour un même échantillon, des valeurs déterminées par deux opérateurs différents.

	W _l (%)	W _p (%)	W _l (%)	I _p
Nombre d'échantillon	20	20	19	20
Minimum	26	13	12	10
Moyenne	31.5	16.5	14.5	15
Maximum	39	18	16	23

Tableau 8: Rappel des résultats obtenus par Herrmann (1997).

Echantillons	Wl (%)	Wp (%)	Ip
EF2 0.80 m	35.5	18	17.5
EF2 gr	35	17	18
C1 gr	32	16	16
C2 gr	34	13	21
EVI 0.5 - 1.5*	35	17	18
**	34	14	20
EV3 1.1 - 1.7*	37	17	20
**	36	16	20
BV4 3.5 - 4.8*	30	17	13
**	31	15	16
Nombre	7	7	7
Minimum	31	13	16
Moyenne	34	15.7	18
Maximum	37	18	21

* Résultats obtenues par Herrmann (1997).

** Résultats obtenues par Klotz.

Tableau 9: Limite d'Atterberg des Terres noires.

- *Interprétation et discussion des résultats*

La limite de liquidité, en moyenne de 34%, est plus élevée que celle obtenue par D. Herrmann (1997) et la limite de plasticité Wp, en moyenne de 15.7%, est légèrement inférieure (16.5%).

L'indice de plasticité (Wl - Wp), de 18%, est supérieur à l'indice obtenu par D.Herrmann (15%).

Les limites de liquidité, effectuées sur les mêmes échantillons que D.Herrmann, ne présentent pas une grande différence, alors que les limites de plasticité peuvent présenter jusqu'à 3% d'écart. Ceci est la conséquence de la méthode du rouleau utilisée pour déterminer Wp (annexe 3) car elle fait appel, en grande partie, à l'estimation et à l'expérience de l'opérateur. On ne peut donc pas dire si un résultat est meilleur qu'un autre.

Les couples (Wl, Ip) reportés sur le diagramme de Casagrande (figure 15) définissent un nuage de point autour de 34% pour Wl et 16% pour Ip (contre 32% et 15% sur le Diagramme présenté par D.Herrmann). Ces résultats confirment l'appartenance des Terres Noires au groupe des matériaux argileux **peu plastique** Ap selon la classification de Casagrande.

En conclusion, on peut dire que ces résultats sont bien corrélés avec ceux obtenus par D.Herrmann. Ce dernier ayant réalisé des limites de retrait, conclut que le matériau est **peu sensible au retrait**. Cependant, les teneurs en eau naturelles n'atteignent effectivement jamais la limite de liquidité (D. Herrmann), donc les matériaux se caractérisent par un état proche de l'état solide.

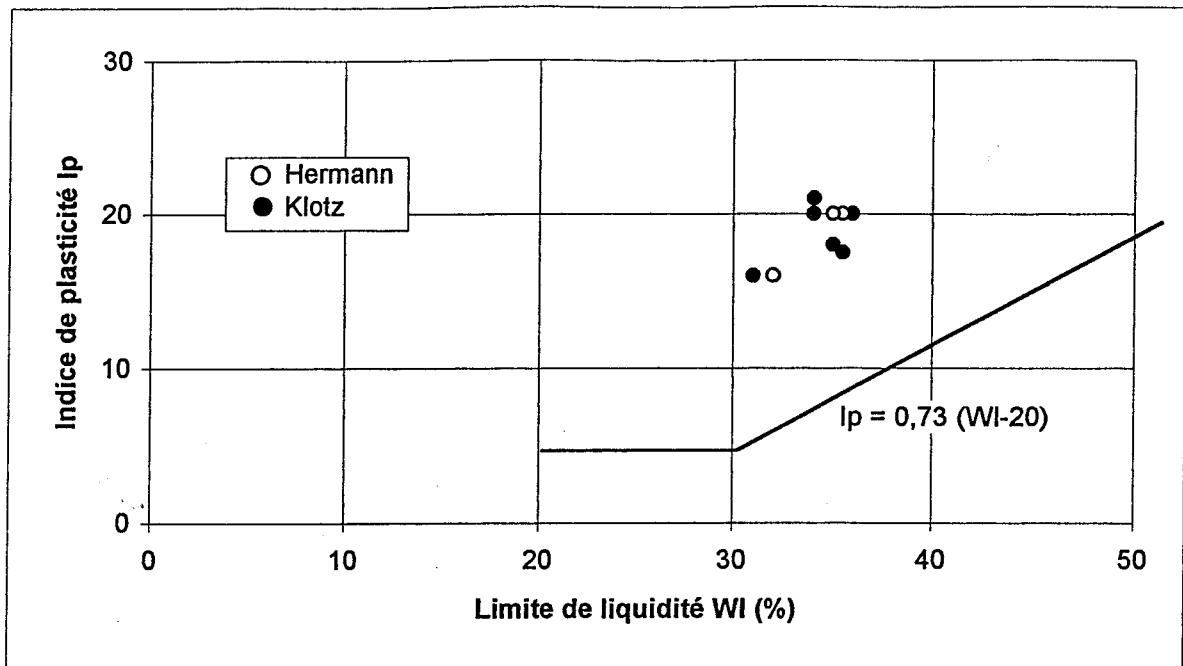


Fig 15 : Diagramme de plasticité de Casagrande

Les figures 16, 17, et 18 proposent une comparaison qualitative du comportement des Terres Noires en fonction de leur teneur en eau. Les divers auteurs cités sont :

- D. Herrmann (1993) pour les terres noires callovo-oxfordiennes du glissement-coulée de Super-Sauze ;
- G. Colas et J. Locat (1993) pour les Terres Noires callovo-oxfordiennes du glissement de La Valette sur le versant opposé du glissement coulée de Super-Sauze ;
- T.S.H. Phan (1993) pour les Terres Noires de la fenêtre de Barcelonnette, du Trièves et du Bassin de Draix ;
- A. Legier (1977) pour les Terres noires du glissement-coulée de Poche, de Lans et de Conche dans la vallée de Barcelonnette;
- M. Al Hayari (1989) pour les Terres Noires de la vallée de Barcelonnette ;
- F. Blanchet (1988) pour les Terres Noires du Trièves ;
- M. Bufallo (1989) pour les Terres Noires du Buëch au nord de Sisteron ;
- B. Gaudin et al (1981) pour les Terres noires Schistosées du Cénomaniens dans l'arrière pays Niçois.

Globalement, les Terres Noires présentent les mêmes caractéristiques et se classent toutes comme peu plastiques selon Casagrande. Les terres noires de Nice semblent toutefois plus plastiques que les autres formations de même nature. Cependant, les limites de plasticité W_p , déterminées sur le glissement-coulée de Super-Sauze, sont plus faibles que les autres limites W_p obtenues dans la vallée de Barcelonnette par T.S.H. Phan, A. Legier et G. Colas & J. Locat. Ainsi les marnes noires du glissement-coulée de Super-Sauze révéleraient **une plus grande aptitude à passer facilement de l'état solide à l'état plastique** sous des teneurs en eau modérées. Ces teneurs en eau correspondent souvent à celles déterminées sur la coulée lors d'épisodes climatiques humides (15 à 17%).

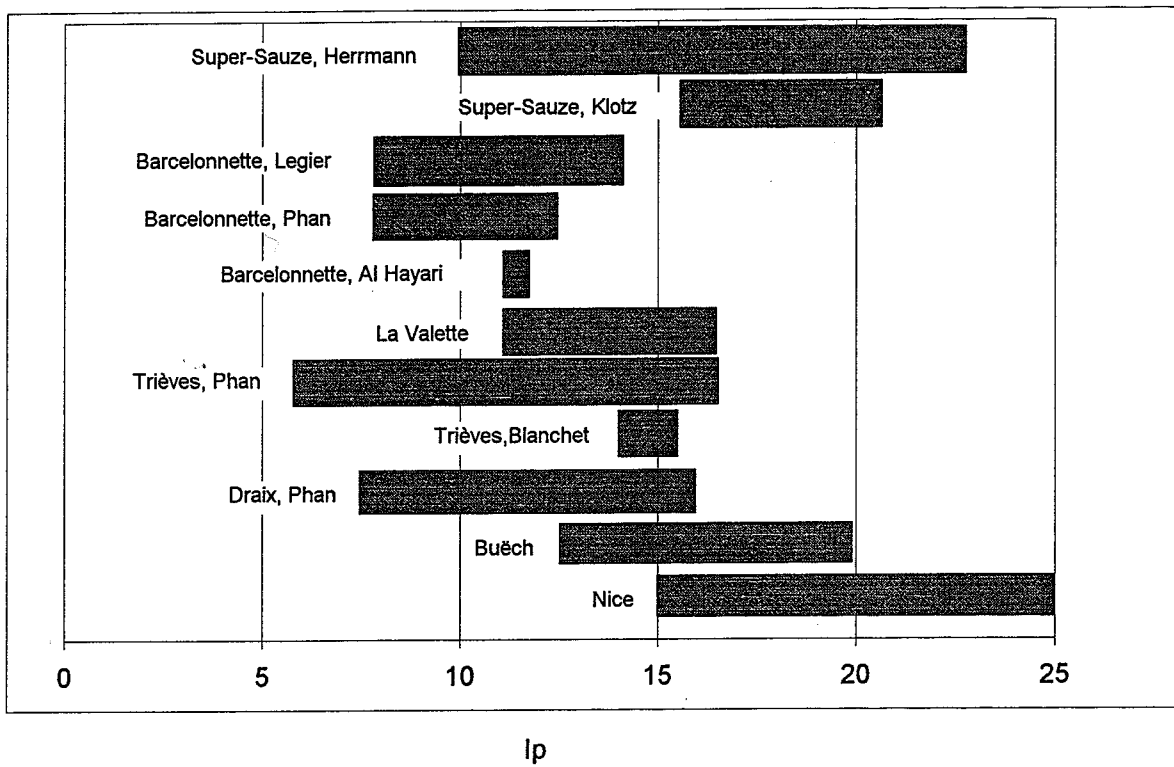


Fig 16 : Indice de plasticité I_p de quelques Terres noires.

WI

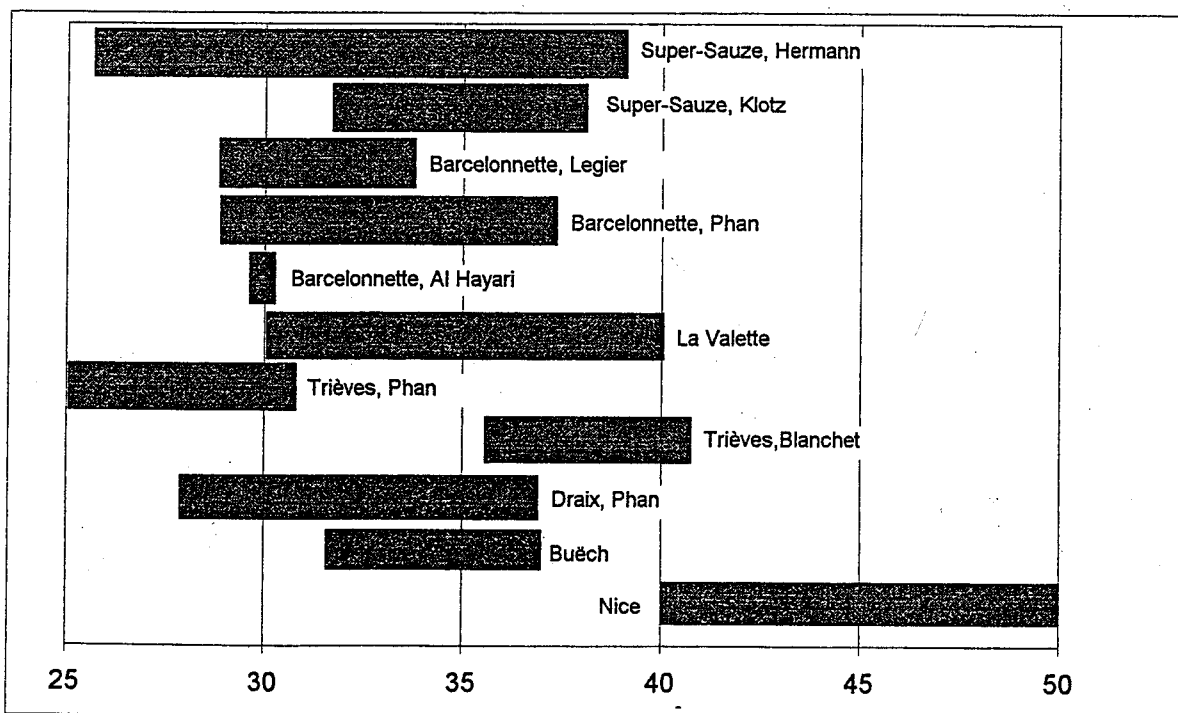


Fig 17: Limite de liquidité WL de quelques terres noires.

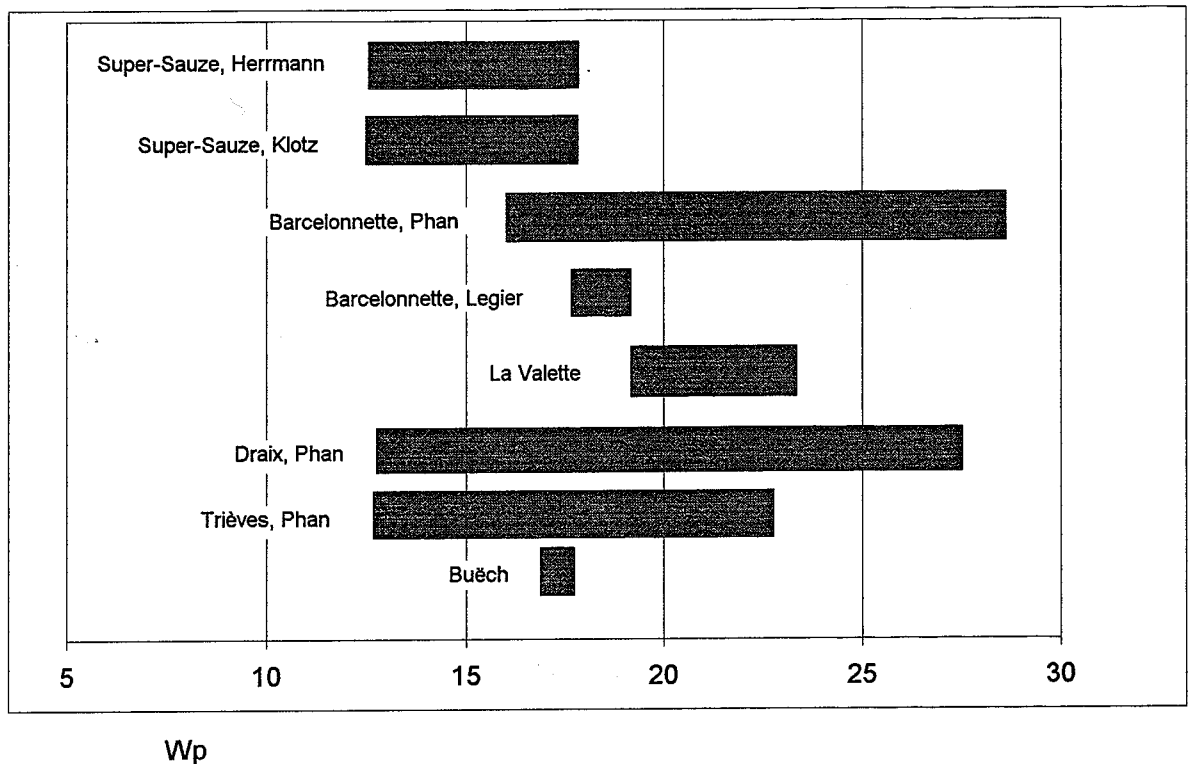


Fig 18 : limites de plasticité W_p de Quelques Terres noires.

• Conclusion du chapitre

Dans l'ensemble, les teneurs en eau, poids spécifiques et limites d'Atterberg corrélaient bien avec ceux déterminés par D. Herrmann (1997). Les résultats obtenus confirment donc :

- des teneurs en eau dans l'ensemble assez faibles même, sous des conditions climatiques très humides mais, variables sur une même profondeur ;
- des poids spécifiques γ_d de 19 KN/m³ et γ_h de 21.4 KN/m³, avec des variations pouvant être importantes pour des prélèvements effectués à une même profondeur. Il ne nous est pas encore permis d'expliquer réellement la variation des poids spécifiques à une même profondeur si ce n'est qu'ils semblent varier en fonction des teneurs en eau et des éléments grossiers. Or les poids spécifiques secs obtenus sur des plaquettes marneuses, provenant de blocs en surface de la coulée, sont de 17.8 KN/m³, ce qui peut paraître assez faible. Il serait donc intéressant dans l'avenir, de déterminer des poids spécifiques sur des marnes en place ;
- les limites d'Atterberg ne diffèrent pas beaucoup suivant l'opérateur et confirme le fait que les terres noires sont très sensibles. Cependant, la limite de liquidité, d'une teneur en eau de 34%, n'est pratiquement jamais atteinte car les teneurs en eau naturelles n'excèdent pas 18%.

Nous allons maintenant aborder le problème de l'altération des marnes noires de la coulée et ces éventuelles conséquences sur certaines caractérisations physique.

CHAPITRE II

L'ALTERABILITE DES MARNES NOIRES DE LA COULEE DE SUPER-SAUZE.

mituration

Les marnes noires sont sujettes à un ravinement intense qui a fait l'objet d'études poussées, depuis une dizaine d'années, pour en cerner et en quantifier les processus d'érosion (Descroix L., 1985 & 1994 ; Bufalo M., 1989 ; Chodzko J. et al, 1992 ; Lhénaff R. & al, 1992 ; Alexandre A., 1995 ; ...). Le glissement-coulée de Super-Sauze est développé dans les marnes noires callovo-oxfordiennes. Ces dernières sont donc directement affectées par ces processus d'érosion et de transport.

Nous avons rappelé la difficulté de fixer la limite entre le glissement proprement dit à l'amont et la coulée de débris à l'aval. Les blocs et les compartiments marneux se sont détachés et se détachent de la couronne pour s'accumuler, se déformer et se fragmenter très fortement avec le temps et dans l'espace d'amont en aval et de la surface vers la profondeur. Ils tendent à se disloquer pour laisser place à une coulée de débris.

Les premières observations ont permis de mettre en avant le caractère fortement altérable de ces panneaux marneux dès qu'ils sont offerts aux agents atmosphériques, en particulier aux alternances gel/dégel et humectation/dessiccation. L'altération est certainement l'une des causes principales de l'évolution de la masse glissée en coulée vers l'aval. C'est ce que nous nous efforcerons de montrer dans la présente étude qui s'articulera sur les points suivants :

- présenter d'une manière générale, par une recherche bibliographique, un aperçu des processus d'altération fondamentaux des marnes en place, afin de mieux comprendre les observations de terrain ;
- décrire l'évolution de la dégradation des panneaux marneux et de la morphologie des débris qui en résultent ;
- déterminer un coefficient de foisonnement qui permettrait de voir l'état de décompressibilité des blocs de marnes ;
- réaliser des essais en laboratoire qui permettront de déduire les agents météoriques dominants responsables de l'altération des marnes. Les essais comprennent :
 - * des alternances humectation/dessiccation
 - * des alternances gel/dégel
 - * des essais de dégradabilité et d'altérabilité.

Les essais ont pour seule ambition de donner un ordre de grandeur à l'altérabilité et, éventuellement de voir l'influence de ce phénomène sur certaines caractérisations physique.

1. GENERALITES SUR LA COMPREHENSION DE L'ALTERATION ET DE LA FRAGMENTATION DES MARNES NOIRES EN PLACE.

Ces observations sont essentiellement basées sur des éléments bibliographiques (Gerits S. & al, 1987; Chodzko J. et Lecompte M, 1992 ; Lhénaff R. et al, 1992 ; Descroix L., 1994; Alexandre A., 1995;...). Elles seront remplacées, par la suite, dans le contexte des observations réalisées sur le glissement de terrain.

1.1. Description de l'altération des marnes en place : génèse de la couverture détritique et du régolite.

Les processus qui conditionnent la génèse de la couverture détritique et du régolite nous intéressent directement dans la compréhension de l'altération des panneaux marneux de la coulée de Super-Sauze.

1.1.1. Description succincte de la couverture détritique (Alexandre A, 1995).

La surface des ravines n'est jamais constituée de marnes saines mais, d'un matériel détritique facilement mobilisable : **la couverture détritique.**

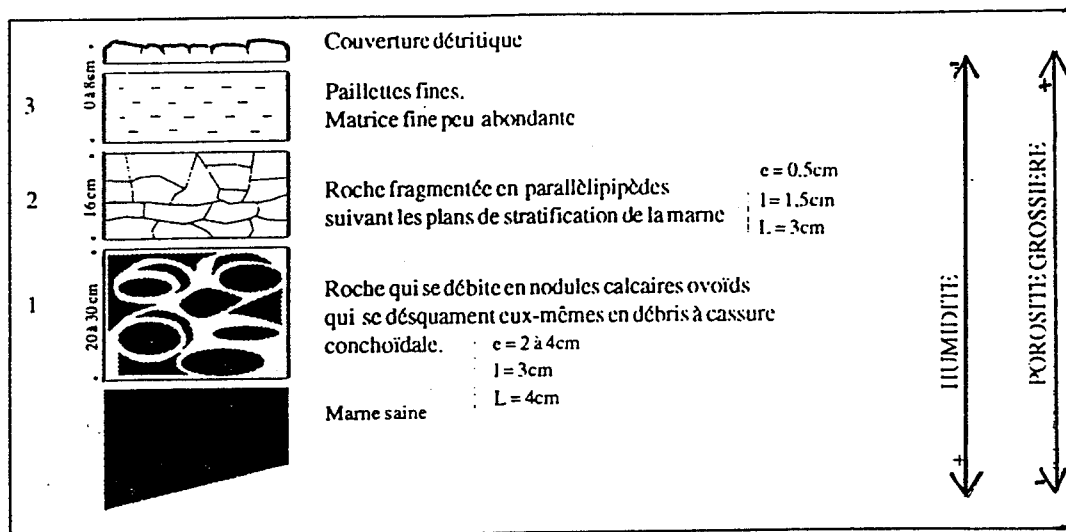
L'épaisseur de cette couche varie suivant la saison (plus épaisse en hiver qu'en été) et suivant la topographie de la ravine (plus épaisse au fond des talwegs que sur les crêtes). Elle n'excède pas 50 à 60 cm (Chodzko J. & Lecompte M., 1992).

Les débris, d'ordre centimétrique, ont été décrits comme étant généralement de formes allongées, anguleux et de faibles épaisseurs. Sa formation est surtout commandée par les agents météoriques et l'ambiance climatique de la région. Les alternances de gel/dégel et d'humectation/dessiccation ont un fort impact sur ces matériaux de surface car, elles les désagrègent en particules plus fines mobilisables par le ruissellement et l'infiltration.

1.1.2. Description succincte du régolite.(Alexandre A., 1995).

Sous-jacent à cette couverture détritique, se trouve le régolite qui est une formation superficielle résultant de la fragmentation de la roche sans que les fragments aient été transportés. Les éléments composant un régolite n'ont pas subi de transformation notable par rapport à la roche mère.

La structure d'un régolite des marnes oxfordiennes dans les Baronnie est présentée sur la figure 19 (Alexandre A., 1995). Cette structure diffère suivant les formations géologiques marneuses.



B. Oxfordien

Fig 19: Structure d'un régolite dans les marnes Oxfordiennes des Baronnies.

Le régolite est donc affecté par une fragmentation de la roche mère dont les principaux processus sont, d'après A. Alexandre (1995) :

- *la cryoclastie* : par les alternances gel/dégel, mais ce facteur est à relativiser car l'onde de gel dans ces régions n'excède pas 20 cm de profondeur (mesures faites par Alexandre, 1995) et ne peut donc intéresser directement la roche mère. D'après Alexandre, la cryoclastie peut créer un effet de pression et de décompression engendré par la glace. C'est ce phénomène qui peut agir sur la fragmentation de la roche en profondeur (effet pneumatique induit) ;

- *l'hydroclastie* : par les alternances d'humectation/dessiccation qui ont un rôle actif suivant la plus ou moins grande proportion d'argiles gonflantes contenues dans les marnes ;

- *la thermoclastie* : Alexandre a effectué des mesures de conductivité thermique dans les marnes noires afin de voir l'influence des variations de température avec la profondeur. Il est apparu qu'à 5 cm de profondeur, l'amplitude thermique n'atteint pas 5°C. La thermoclastie est donc un facteur mineur dans la fragmentation de la roche ;

- *la décompression* : elle est liée à l'ablation de la couverture superficielle. A. Alexandre avance que c'est un des facteurs principaux de la désagrégation de la roche en profondeur.

Cette présentation succincte de l'altérabilité des marnes en place et de ses facteurs dominants est nécessaire à la compréhension des processus qui commandent l'altération des marnes de la coulée. Il est donc important de voir comment se manifeste cette altération sur notre domaine d'étude.

1.2. Génèse de la fragmentation des marnes noires.

Quelques généralités, concernant les processus de la fragmentation des marnes noires, doivent être rappelées afin de mieux comprendre les observations faites sur la morphométrie des clastes issues de la désagrégation des blocs de marnes de la coulée. Ces généralités sont essentiellement basées sur des

éléments bibliographiques. Ils présentent surtout les causes de la fragmentation générale observée sur les formations géologiques marneuses des préalpes.

à schistosité?
Les conditions de sédimentation et de diagenèse des marnes noires, quoiqu'elles soient très importantes pour comprendre les origines de la fragmentation, ne seront pas développées ici car on s'éloignerait trop de la problématique du sujet retenu. Pour de plus amples renseignements, se référer à la bibliographie (Artru P., 1972 ; Awongo M.L., 1985 ; Chamley H., 1988 ; Bréhéret J.G., 1994 ...).

1.2.1. Présentation sommaire du rôle jouer par la tectonisation dans la fragmentation.

9 // Les marnes callovo-oxfordiennes ont subi une importante phase de tectonisation, la preuve en est le charriage des nappes sub-briançonnaises. Cette tectonisation s'observe aussi sur le comportement élémentaire des matériaux tectonisés : la micro-tectonique. C'est un phénomène qui nous intéresse directement car il commande la fragmentation des panneaux marneux de coulée et la morphométrie des clastes qui en résulte. Les marnes noires se délitent suivant une structure préférentielle qui peut être de trois ordres :

- la schistosité (structure planaire et de faible épaisseur) ;
- la linéation (structure allongée, appelée, dans le cas des marnes noires « frites ») ;
- la combinaison des deux.

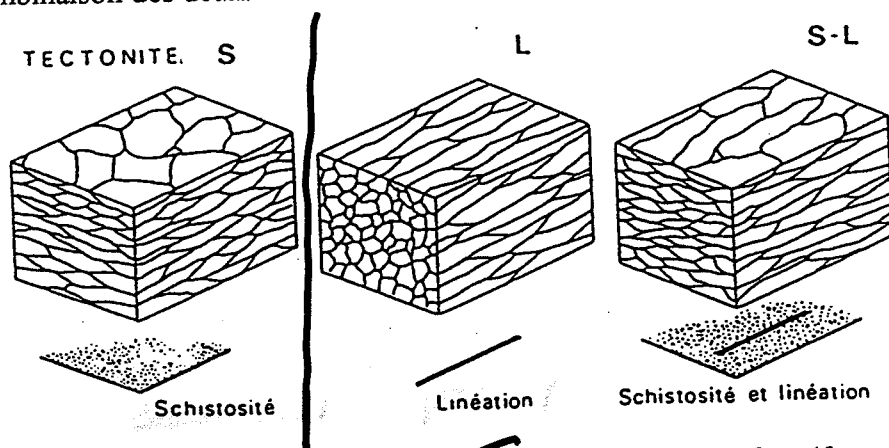


Fig 20 : Principaux types de micro-tectonique (Mercier J.L. et al in Alexandre A., 1995).

Structure

1.2.2. L'importance du cortège minéralogique et chimique vis à vis de la fragmentation des marnes noires.

Plusieurs études menées sur l'altération des marnes noires (Colas G. et Dumolard, 1988, Bufalo M., 1989 ; Descroix L., 1985 & 1994 ; Chodzko J. et al, 1992 ;...) ont mis en évidence le lien direct entre les taux de carbonates de calcium (CaCO_3) et le taux d'argiles (ainsi que les caractères plus ou moins gonflants de celles-ci) avec la vitesse de désagrégation des marnes noires.

* Les variations de carbonate de calcium dans les marnes noires.

D. Herrmann (1997) a calculé le taux de carbonate de calcium pour les marnes callovo-oxfordiennes du glissement-coulée de Super-Sauze. Il a ensuite comparé ce taux avec d'autres résultats

trouvés dans la littérature, Les figures 21 et 22 présentent ces résultats auxquels ont été rajoutés quelques compléments bibliographiques.

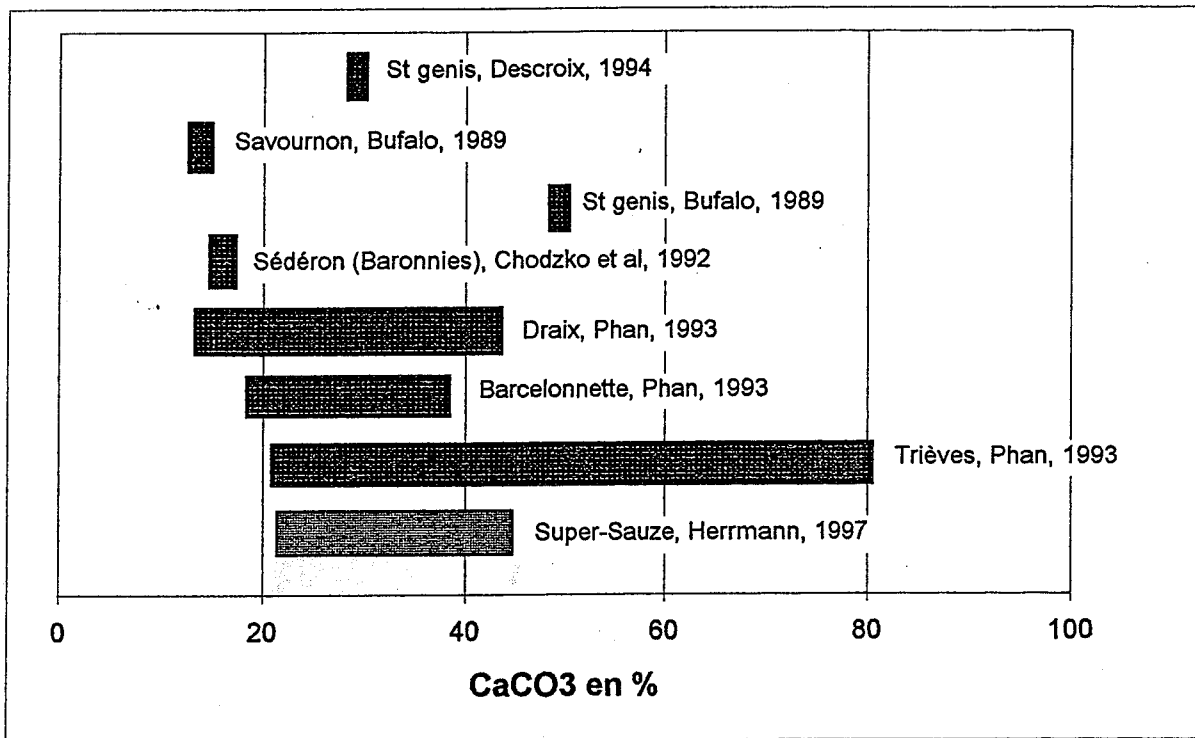


Fig 21 : Taux de carbonate des marnes callovo-oxfordiennes en des lieux différents.

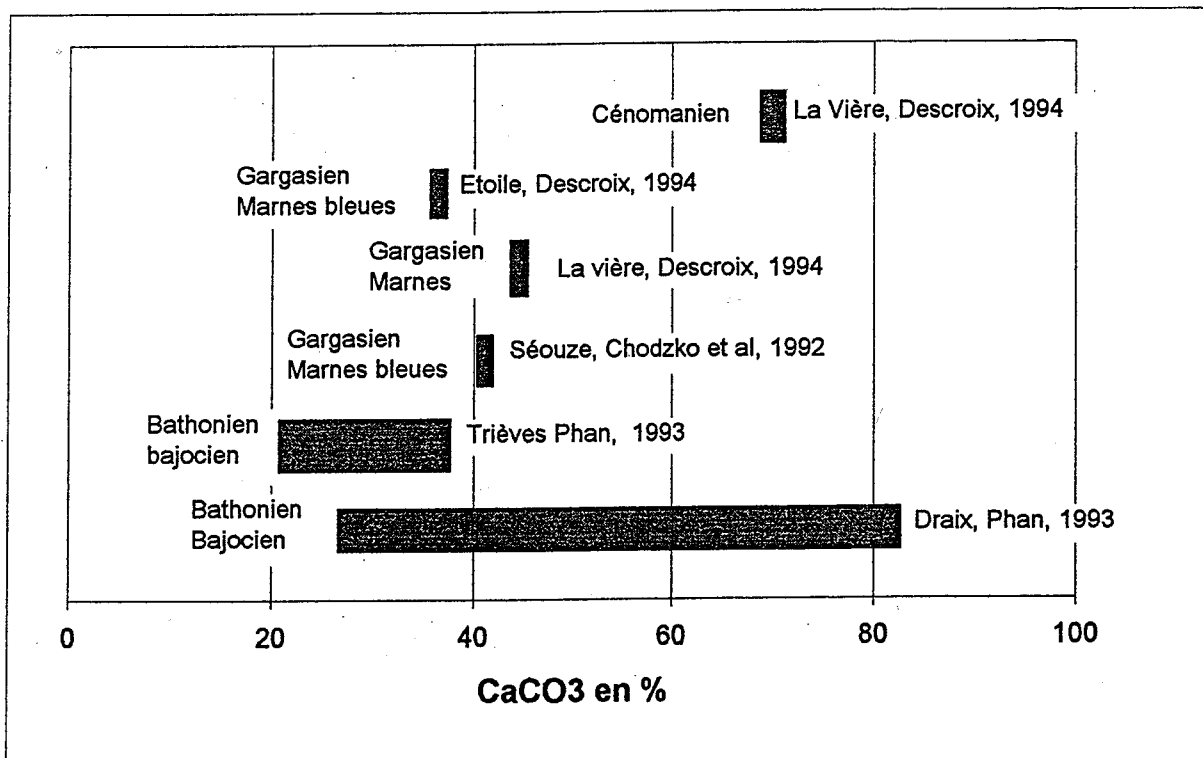


Fig 22 : Taux de carbonate pour d'autre formations géologiques marnieuses.

De ces résultats, M. Bufalo (1989), J.Chodzko (1992), L. Descroix (1994), et A. Alexandre (1995) mettent en avant le **caractère plus fragmentable des marnes oxfordiennes du fait de leur faible taux de CaCO₃ par rapport aux autres formations marneuses**. En effet, plus le taux de carbonate est élevé, plus il contribue à la stabilité structurale des marnes, notamment comme ciment intergranulaire jouant le rôle de « ponts » (Alexandre A., 1995).

Le taux de carbonate calculé par D. Herrmann (1997) pour les marnes callovo-oxfordiennes du de la coulée est de 34% en moyenne. C'est un résultat qui est élevé par rapport aux 15% trouvés pour les marnes oxfordiennes par Chodzko et al (1992) dans les Baronnies et les 13.6% de Bufalo à Savournon (1989), mais il est inférieur à ceux obtenus pour d'autres formations marneuses (40 à 45%).

* Les argiles des marnes noires

D. Herrmann (1997) a aussi défini le cortège argileux des marnes de la coulée, qu'il a comparé avec d'autres formations marneuses préalpines. Les résultats sont rappelés sur la figure 23 auxquels ont été rajoutés quelques compléments d'informations bibliographiques.

Lorsque les argiles gonflantes et les argiles en général sont importantes, les terres noires offrent un plus fort potentiel à la désagrégation, par alternances de gonflements et de rétractions, sous l'effet de l'eau.

Les marnes noires de la coulée ne présentent pas un fort taux d'argiles gonflantes (surtout composées de Illite) et le pourcentage d'argiles déduit des analyses granulométriques, quoique variable, reste inférieur à 50%. Seules les marnes oxfordiennes des Baronnies contiendraient près de 60% d'argiles mais, ces essais ont été faits sur des paillettes complètement déstructurées (Alexandre A., 1995). Les autres formations marneuses présentent des argiles gonflantes souvent plus élevées (80% de smectite pour les marnes noires de Nice).

D'après le pourcentage moyen du taux de carbonate (34%) et la faible proportion argileuse (19%) et d'argiles gonflantes (10 % de smectite), nous ne pouvons pas déduire une influence primordiale de ces facteurs sur l'érodabilité des terres noires de la coulée de Super-Sauze. Pour d'autres formations marneuses, ils peuvent être une cause importante de la fragmentation.

→ Contraires. Il s'agit de argiles "libérées".

Pour avoir la composition minéralogique et chimique
(cortège)

il faut
↳ - de analyses chimiques totales

- " " minéralogique au diffractogramme

(et des lames minces)

Composition des argiles (%)

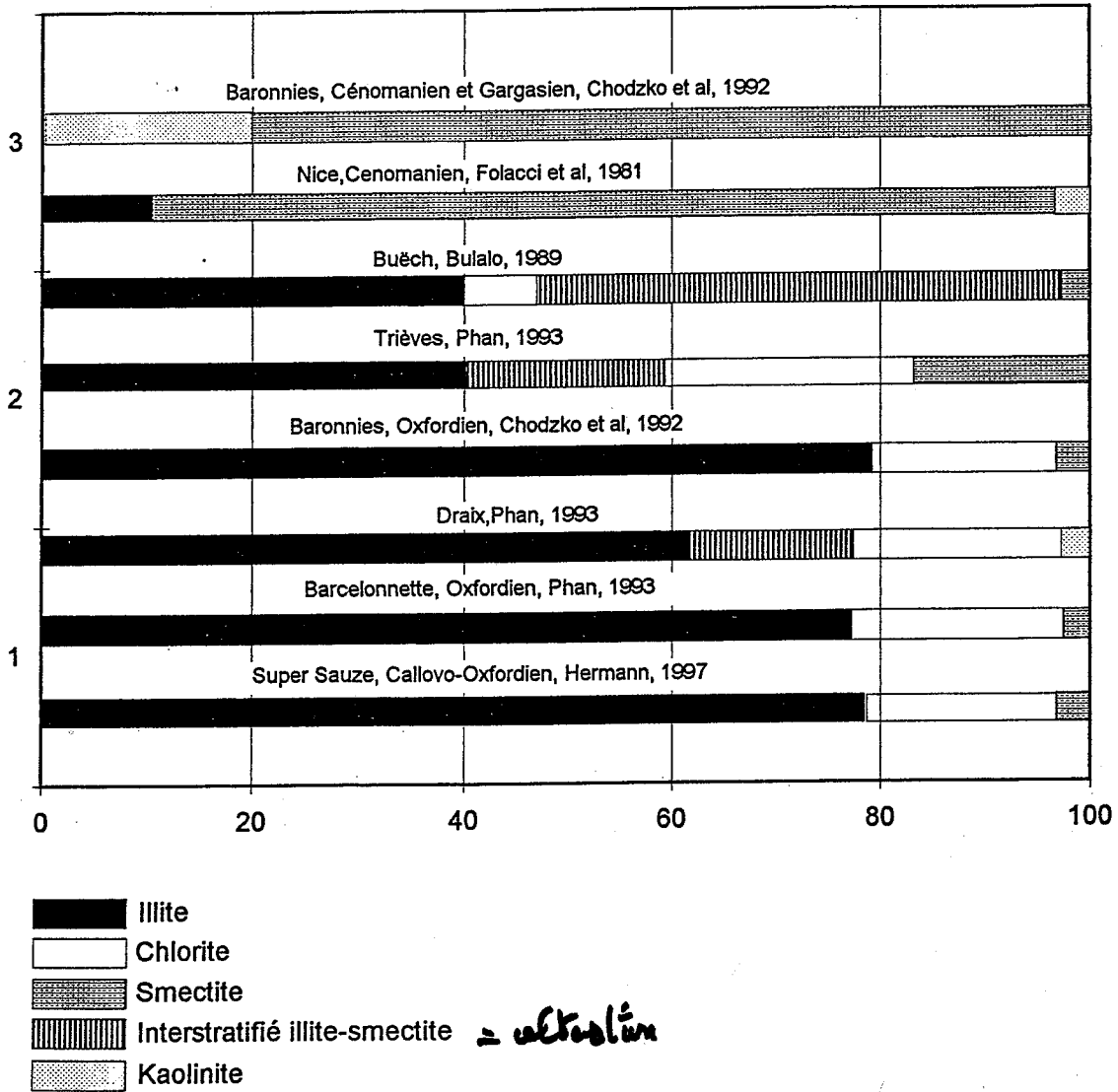


Fig 23 : Cortège argileux de quelques terres noires.

1.2.3. Le processus de décompression.

La décompression peut se faire à deux niveaux d'échelle :

- à l'échelle des temps géologiques : au cours des cycles d'érosion, les roches profondes se rapprochent progressivement de la surface d'où une décompression, elle même à l'origine d'une microfissuration initiale ou primaire (Levêque, 1983 in Alexandre A., 1995). Cette fissuration se produit de préférence dans les zones de faiblesse de la roche, à savoir les plans de schistosité ou de linéation ;

- à une échelle instantanée : Certains phénomènes naturels, tel que les glissements de terrain, peuvent ramener des roches profondes vers la surface et ainsi engendrer une décompression que l'on peut considérer comme brutale à l'échelle des temps géologiques.

Ce phénomène peut être admissible pour le glissement-coulée de Super-Sauze où, lors des glissements structuraux bancs sur bancs, de longs pans entiers de marnes cohérentes et rocheuses ont subi un relâchement soudain qui les a décomprimés. Une deuxième décompression, que l'on peut considérer comme instantanée à l'échelle des temps géologiques, peut se produire sur certains panneaux marneux lorsque ceux-ci, enchâssés dans le corps de la coulée, évoluent progressivement vers la surface.

Cette double décompression a suffisamment fragilisé les panneaux marneux, ce qui à pour conséquence de faciliter la pénétration des eaux le long de leurs plans de rupture (schistosité et linéation), à condition que ceux-ci soient en surface ou en subsurface. De ce fait, les processus d'altérations subaériens, comme la cryoclastie et l'hydroclastie, sont facilités (mêmes attaques que pour la couverture détritique et le régolite).

En conséquence, les marnes du glissement-coulée de Super-Sauze sont donc déjà au préalable fragilisées par :

- la tectonisation qui commande les plans de fracturations élémentaires de la roche (schistosité et linéation) ;
- les décompressions subies à l'échelle des temps géologiques par l'érosion au sens large du terme et à la suite du déclenchement des glissements structuraux ;
- le taux de CaCO_3 qui est à prendre en compte dans la vitesse d'altération des marnes ;
- secondairement, il faut considérer le pourcentage d'argile et le cortège minéralogique.

Il reste donc à présenter le rôle joué par la cryoclastie et l'hydroclastie dont l'efficacité est facilitée par les facteurs décrits ci-dessus. Il s'agit maintenant de décrire les observations faites in situ sur l'état de fragmentation des marnes noires.

2. LES OBSERVATIONS IN SITU DE L'EVOLUTION DE LA FRAGMENTATION DES PANNEAUX MARNEUX.

Les panneaux marneux semblent se désagréger d'amont en aval et de la surface vers la profondeur pour alimenter la coulée en matériaux fins facilement mobilisables. Comment se manifeste cette évolution sur le terrain ? Y-a-t-il une logique dans la morphologie des clastes suivant l'état d'altération des blocs marneux ?

2.1. Evolution de l'altération des panneaux marneux en surface d'amont en aval.

Du replat supérieur, juste en pied de l'escarpement principal, à la langue finale de la coulée, il est possible d'observer:

* Le replat supérieur (tranchet A) présente un grand nombre de panneaux marneux parfois de plusieurs m³. Bien que disloqués, ils sont encore cohérents et structurés (sauf pour les blocs inférieurs à 50 cm de diamètre), même si la fracturation élémentaire est visible (photo 10).



Photo 10 : Fissuration d'un panneau marneux du replat supérieur (tranchet A).

Ce replat supérieur est recouvert de clastes pluricentimétriques provenant à la fois, de la désagrégation des panneaux marneux de surface et de subsurface sous l'action des agents météoriques et, des éboulis continus dus à la fragmentation élémentaire des marnes en place de l'escarpement principal (sous l'effet associé de la gravité et des agents météoriques).

Pendant la genèse du glissement, les panneaux marneux se sont progressivement détachés, sans se disloquer mais, en se décomprimant à la faveur des plans de ruptures liées à la structure des marnes noires (glissement banc sur banc). Ils font donc partie intégrante de la masse en mouvement où ils y subissent un remaniement lent, de l'amont vers l'aval. Les blocs les plus cohérents semblent se situer majoritairement dans la partie amont entre le transect A et D, mais leur taille, et surtout leur cohésion, paraissent diminuer vers l'aval (Flageollet J.C., Maquaire O., Weber D., 1996). Cette désagrégation fournit à la coulée des matériaux fins. Ce chaos de blocs est plus ou moins visible jusqu'au début de la coulée.

* Le transect B ne laisse entrevoir que des blocs de dimensions réduites, alors que les transect C et D présentent des surfaces bosselées à blocs plus ou moins désagrégés.

Le corps de la coulée, entre le transect C et le transect D, présente fréquemment ces surfaces bosselées. La surface de ces bosses est composée de paillettes fines aux diamètres pluricentimétriques. Les observations faites sur le terrain, ainsi que le creusement de la fosse CF et le dégagement manuel de la surface des bosses, ont permis d'affirmer qu'elles correspondent à l'emplacement de panneaux marneux soit dans une phase de désagrégation avancée (photo 11), soit parce qu'ils n'ont pas encore évolué totalement vers la surface. Vu la taille de certaines bosses, on peut aisément imaginer des blocs encore de taille plurimétriques noyés dans la coulée au niveau de cohésion inconnu.

Les zones de blocs ou de bosses ont été relevées sur la carte géomorphologique au 1/1000e en 1995. En octobre 1997, certaines de ces zones avaient évolué. Par exemple, la partie à l'extrême est de la coulée, en aval du transect C, n'est pas cartographiée comme étant une zone à bosse en 1995, alors que les bosses y apparaissent nombreuses et parfois saillantes en 1997. La réciproque est aussi valable, car la zone bosselée, cartographiée au niveau du transect E en 1995, n'est plus si évidente à l'automne 1997 (Voir carte de modification de l'état de surface, figure 24 et 25). Ceci montre bien la double évolution des panneaux marneux : vers l'aval ou vers la surface.

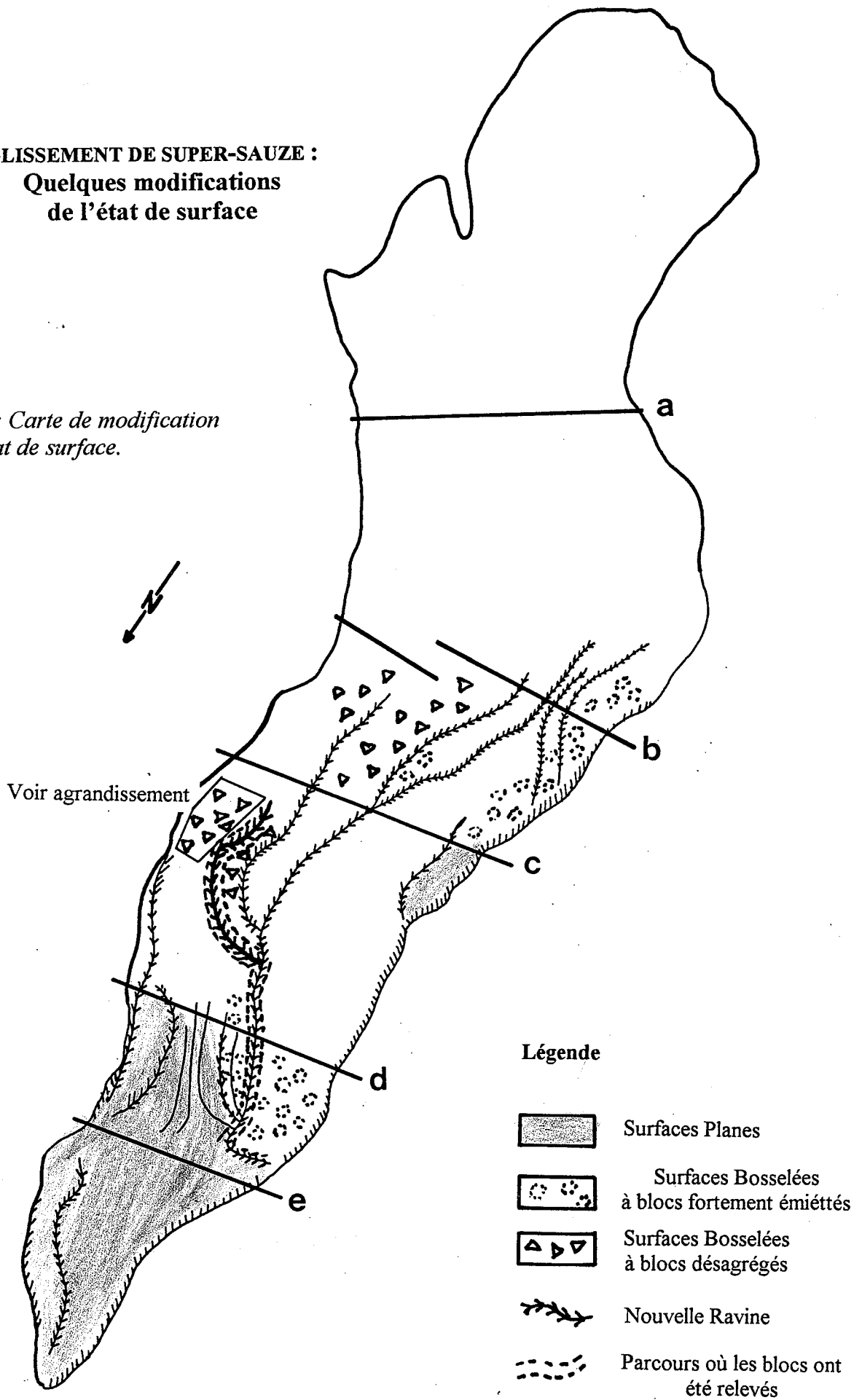
2.2. L'état d'altération des blocs en profondeur.

Les ravines, qui incisent parfois profondément le corps de la coulée, présentent de véritables coupes naturelles. Elles permettent de répertorier les blocs marneux dans le corps de la coulée et de constater leur état de désagrégation d'amont en aval et de la surface vers la profondeur. La plupart des ravines prennent naissance sur le talus, en aval du replat supérieur. Une nouvelle ravine, non répertoriée sur la carte géomorphologique, a été relevée en aval du transect C. Elle se situe exactement à l'est de la ravine centrale, avec laquelle, elle conflue à la côte 1831 m (cf carte de surface modifiée). Les ravines incisent le corps de la coulée sur une profondeur parfois supérieur à 4 m. En octobre 1997, il est donc apparu intéressant de relever le long de chaque ravine la position des blocs marneux sur les versants. Leur état d'altération a été décrit entre la nouvelle ravine et le débouché de la ravine centrale sur le replat du transect E.

La nouvelle ravine incise la coulée de 3.50 à 4.00 m au maximum près de la ravine centrale, qui elle, l'incise de plus de 5 m entre le transect C et D. Les talus de ces deux ravines ont des pentes de l'ordre de 40° avec parfois une dissymétrie assez prononcée : le versant ouest de la ravine centrale est souvent plus élevé de 1 à 2 mètres par rapport à son opposé.

GLISSEMENT DE SUPER-SAUZE :
Quelques modifications
de l'état de surface

Fig 24: Carte de modification de l'état de surface.



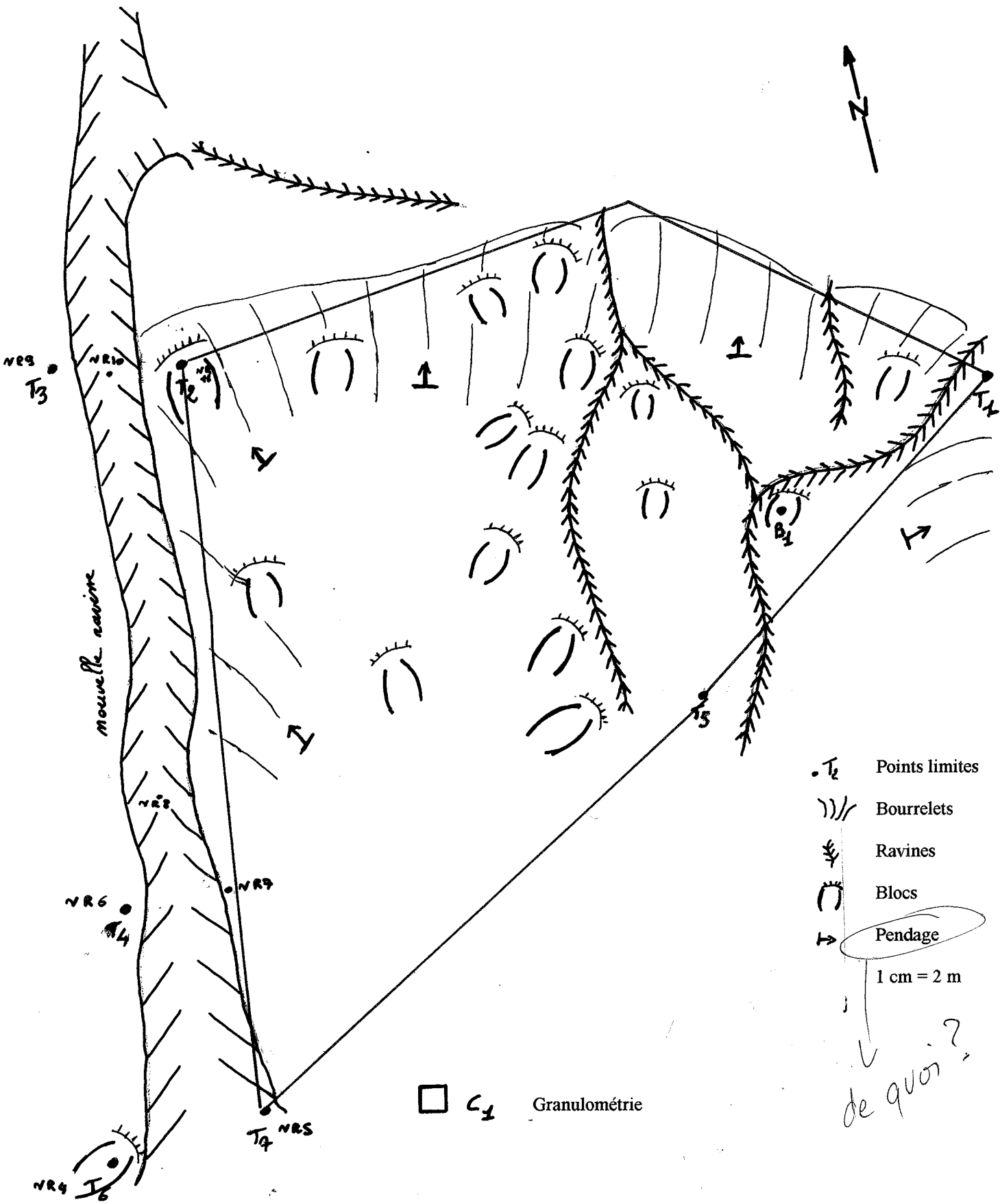


Fig 25 : Agrandissement du champs de blocs au niveau du transect C.

Il est important de remarquer que ce n'est pas une chose facile de déterminer la véritable taille des blocs. En effet, certains blocs, d'apparences moyennes sur la partie visible, s'avéraient beaucoup plus volumineux une fois dégagés à la pioche, sans que l'on puisse parfois en déterminer tous les contours (Figure 26). Mais un tel travail demande beaucoup de temps, nous nous sommes donc fixés comme taille limite tous les blocs dont la partie visible était d'ordre métrique, en ayant bien à l'esprit le risque d'erreur d'estimation. Onze blocs ont été répertoriés (schémas présentés en annexe 4). Leur emplacement et leur description sont résumés dans le tableau 10.

N° du bloc d'amont en aval	Degré de fragmentation	Profondeur du bloc par rapport à la surface du glissement	Altitude du sommet du bloc en m	Taille (partie visible) en m
Bloc 1	Cohérent mais fissuré	Au fond de la nouvelle ravine	1842.9	1 x 0.80
Bloc 2	Peu cohérent avec un chapeau de paillettes marneuses très épais	Au fond de la nouvelle ravine	1838.2	1.20 x 0.50
Bloc 3	Peu cohérent	Au fond de la nouvelle ravine		
Bloc 4	Cohérent	Au fond de la nouvelle ravine	1832.6	1.00 x 1.00
Bloc 5	Peu cohérent	Jonction avec la ravine centrale, 3 m de la surface, versant ouest	1828.9	1.10 x 0.80
Bloc 6	Peu cohérent	Sommet du versant ouest de la ravine centrale	1824.6	1.00 x 1.00
Bloc 7	Peu cohérent	Fond de la ravine	1821.6	1.20 x 0.80
Bloc 8	Peu cohérent	A 3 m en de la surface du versant ouest de la ravine centrale	1817.0	1.20 x 0.70
Bloc 9	Très peu cohérent et fortement fragmenté	Surface du versant est de la ravine centrale	1816.1	1.20 x 0.60
Bloc 10	Cohérent	Fond de la ravine	1812.0	1 x 0.80
Bloc 11	Sans aucune cohérence, en voie de dislocation totale.	Fond de la ravine, versant est.	1809.5	1.20 x 0.50

Tableau 10 : Etat des blocs répertoriés.

Plusieurs observations peuvent être partiellement déduites de ce recensement :

- les panneaux marneux deviennent de moins en moins nombreux vers l'aval alors que leur degré de friabilité est apparemment croissant ;

- les panneaux marneux s'observent sur toute la verticalité des ravines avec une plus forte densité dans le fond. En effet, une fois que les blocs de marnes, enchâssés dans le corps de la coulée, sont dégagés par l'activité érosive du ruissellement, ils glissent sur les pentes raides pour s'accumuler dans le talweg ;

- Au vu de l'incertitude qui règne sur la détermination précise de la taille des blocs, il serait hasardeux de déduire à une diminution de volume de ceux-ci vers l'aval. Cette hypothèse semble cependant fortement corrélée avec le fait que leur friabilité est croissante.

Cette étude peut être complétée par les blocs répertoriés sur lesquels sont venus buter des essais géotechniques (Pénétromètre et carottage). Ce recensement nous donne aussi un aperçu de la présence de ces blocs dans le corps de la coulée. Le recensement a été fait par J. Genet & J.P. Malet (1997), les résultats sont rappelés dans le tableau 17.

Essai	Profondeur du sommet du bloc	Altitude du sommet du bloc en m	Taille verticale minimale en m
A1	4.50 m	1867.7	>1.00
A5	5.80	1954.3	>0.70
A6	4.20	1958.3	>0.30
A8	5.50	1995.1	>0.50
A9	4.10	1955.9	>0.90
F1	6.40	1952.4	>7.00
EP5	6.50	1954.0	>2.50
B _{III}	3.50	1900.1	>0.50
BV5	0.30	1904.8	> 0.90
	3.30	1901.5	> 0.30
BV6	0.60	1905.3	> 0.50
	2.60	1903.3	>0.30
C12	6.60	1869.9	> 1.40
C _{II}	3.50	1862.0	>0.40
CV2	2.30	1873.7	> 0.30
CV3	4.20	1867.7	> 1.00
D3	3.70	1816.7	> 0.90
D6	1.00	1814.0	> 0.60
D7	2.50	1811.7	>1.20
E4	3.20	1795.5	> 0.70
E5	5.50	1793.1	> 0.70
EV1	3.10	1795.5	>3.10
EV2	2.00	1795.6	> 0.20

Tableau 11 : Relevé des blocs marneux lors des essais géotechniques.

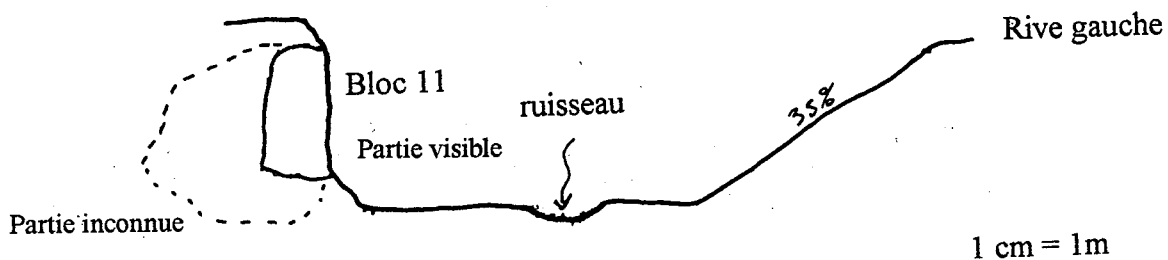


Fig 26 : Estimation des blocs enchâssés dans la coulée.

Ainsi, les observations de surface, associées aux informations fournies par les coupes verticales des ravines et par les essais géotechniques, permettent de mieux cerner l'évolution et la dégradation des blocs de marnes dans le corps de la coulée.

Les mouvements subis par les blocs à l'intérieur de la coulée ne semblent pas être le facteur principal de leur fragmentation. Lorsque l'on dégage la partie des blocs encore enchâssée dans la masse, on s'aperçoit qu'il garde une bonne cohésion. Ainsi, les parties des blocs les plus soumises aux processus de fragmentation, tel que la cryoclastie et l'hydroclastie, sont celles qui se trouvent en surface et sur les flancs des ravines intra-coulée, ou de la coulée elle-même. La conséquence de cette dégradation du bloc est la formation d'une bosse plus ou moins marquée et arrondie, composée de débris de tailles diverses.

Cette réflexion n'a pas la prétention d'être affirmative. Il faudrait, pour cela, effectuer un recensement du degré de désagrégation de tous les blocs le long de toutes les ravines. Il serait aussi nécessaire de préciser les descriptions de surface en dressant une carte détaillée de l'état de surface, comme il a été fait pour la perméabilité par S. Velcin (1997).

2.3. Description des fragments issus de l'altération des panneaux marneux.

Cette partie comporte l'étude de la morphométrie des fragments issus des blocs constituant les surfaces bosselées de la zone d'accumulation.

Il a donc été mis en évidence que les bosses correspondent, pour chacune d'entre elles, à un bloc marneux enchâssé dans la coulée et qui émerge plus ou moins en surface.

Une étude détaillée de l'un de ces blocs, schématisé sur la figure 27 et représenté sur la photo 11, a été effectuée. Ce bloc est coté à 1855.8 mètres d'altitude. Il est situé à l'est de la coulée, en aval du transect C (Bloc B1 sur la figure 25). La photo 11 présente un bloc ayant la même configuration.

Trois échantillons des différentes clastes ont été prélevés, leurs caractéristiques morphométriques sont résumées dans le tableau 12.

Echantillons	Dimensions moyennes (en cm)	Morphométrie	Emplacement sur le bloc
Echantillon 1	$10.5 < L < 14.5 < 22.5$	Plaquettes	Partie verticale du bloc regardant vers l'aval.
	$2 < l < 4.3 < 7$		
	$0.6 < e < 1.4 < 3$		
Echantillon 2	$2 < L < 3.6 < 6$	Frites	Détachée du bloc formant un tablier d'éboulis en aval
	$0.5 < l < 10.9 < 2$		
	$0.2 < e < 0.5 < 1$		
Echantillon 3	$2 < L < 2.8 < 3.5$	Paillettes	Au sommet du bloc et sur sa partie tournée vers l'amont
	$1.1 < l < 2 < 2.6$		
	$e < 0.2$		

L = Longueur
l = largeur
e = épaisseur

Tableau 12 : Morphométrie des différentes plaquettes du bloc.

Les mesures ont été faites sur 20 fragments pour le premier échantillon et sur 40 fragments pour les deux autres. Les angles peu émoussés des différentes clastes attestent un détachement récent des débris du bloc principal.

A partir de la morphométrie des clastes (photo 13), la morphologie de ce bloc peut se diviser en deux parties:

* *La partie amont du bloc et son sommet* : elle est recouverte de paillettes très fines, rectangulaires ou carrés de 1 à 3 centimètres d'arêtes. Ce tapis ne laisse pas entrevoir les formes initiales du bloc et lui confère cet aspect de bosse. C'est cette partie qui est la plus offerte aux agents atmosphériques et au ruissellement, d'où l'état de dégradation avancée.

La partie aval du bloc : Verticale à sub-verticale, elle laisse discerner les contours du bloc (0.90 m de hauteur pour 0.80 m de largeur). Il se débite en larges plaquettes décimétriques qui, malgré les aspects peu cohérents, restent accrochées à l'ensemble du bloc. Moins exposées aux agents atmosphériques et aux écarts de températures importants, cette partie ne se fragmente que suivant un plan de fracturation plus large et plus régulier qui lui permet de garder sa structure. Toutefois, la fragmentation se continue en plaquettes fines et longues de quelques centimètres, plus assimilable à une morphologie en « frites ». Ces clastes ne peuvent plus adhérer à l'ensemble du bloc et alimentent donc un tablier d'éboulis juste en amont (cf figure 27).

Cette logique s'observe sur l'ensemble des blocs formant les bosses. La forme des clastes reste dans l'ensemble la même et, d'après les observations ci dessus, elles dépendent des facteurs suivant :

- la ^{moins} structure interne de la roche marneuse ;
- l'orientation et la position du bloc ;
- les agents météoriques comme la cryoclastie et l'hydroclastie (ces facteurs agissent sur l'ensemble des formations en surface).

Les observations doivent donc être suivies par des essais de laboratoire pour en quantifier les processus météoriques jouant un rôle important dans l'altération des marnes.

schistosité finnaire : plans principaux //
les fissures + ou obliques : dues à l'initiation.
la forme ne dépend pas de "agents" météoriques qui sont
les m³ surtout sur le coulis...

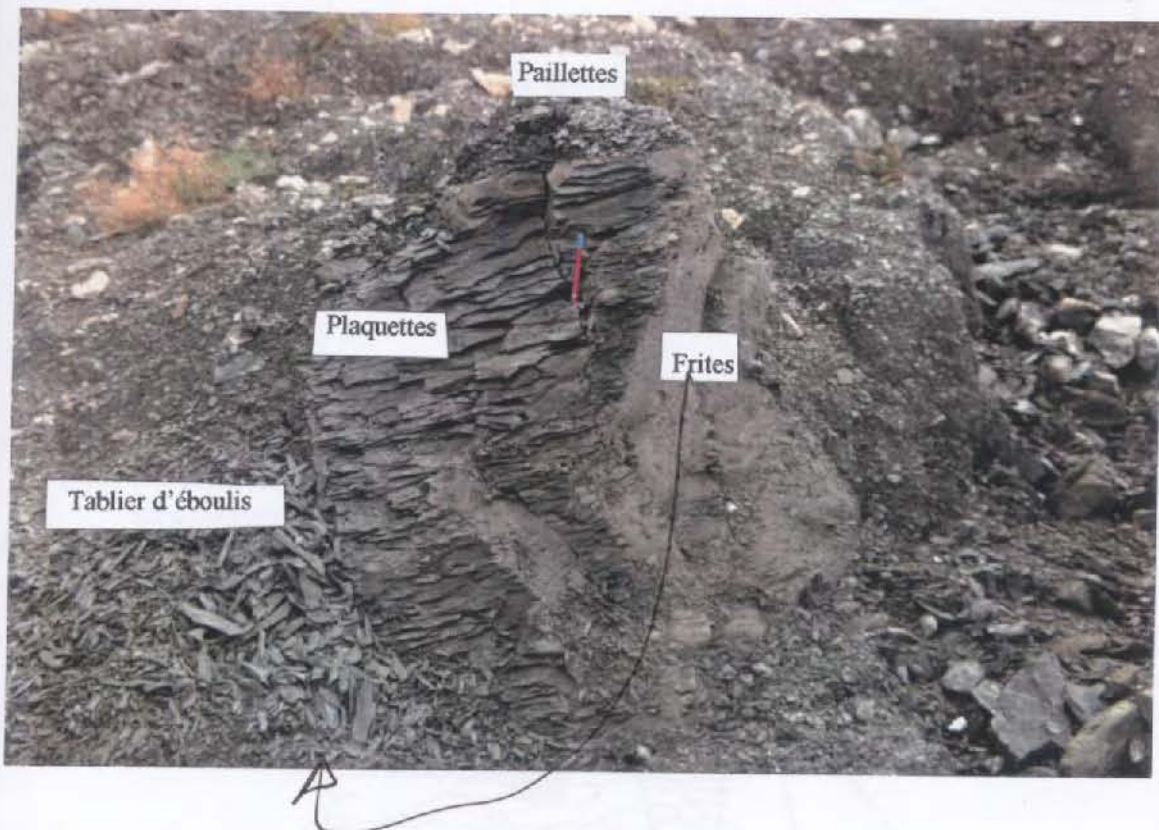


Photo 11 : Bloc correspondant à une bosse (transect C).

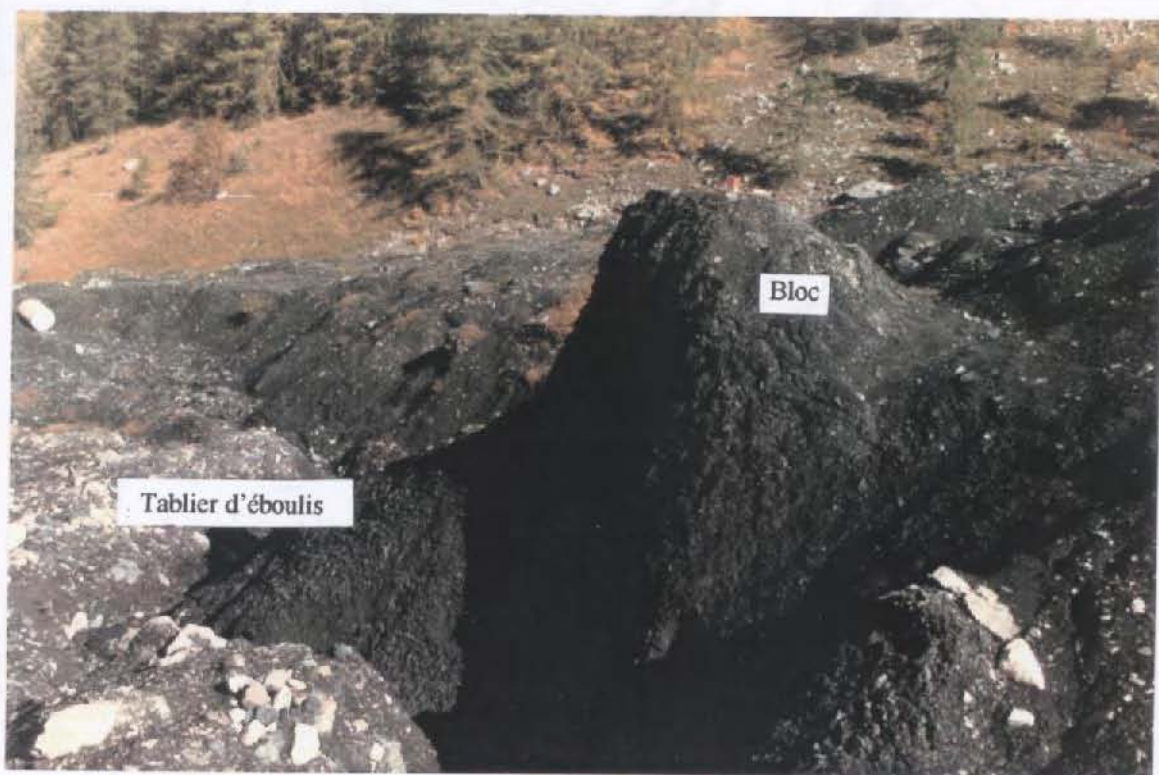


Photo 12 : bloc correspondant à une bosse (en aval du transect C).

ALTERATION D'UN BLOC MARNEUX DE SURFACE
DANS UNE SURFACE BOSSELEE (AVAL TRANSECT C)

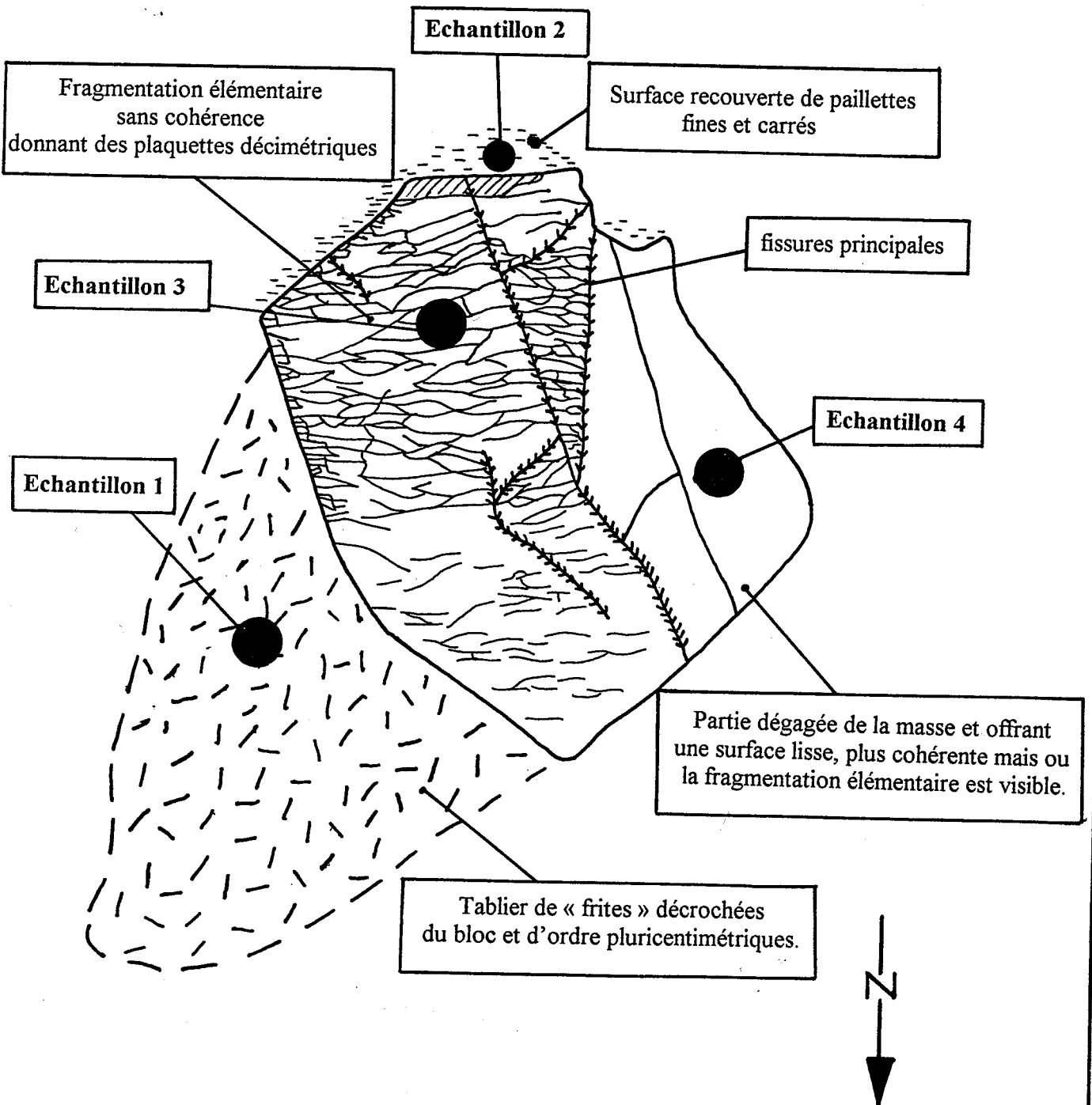


Fig 27 : Schéma du bloc étudié et représenté sur la photo 11.

Echelle :
1 cm = 10 cm

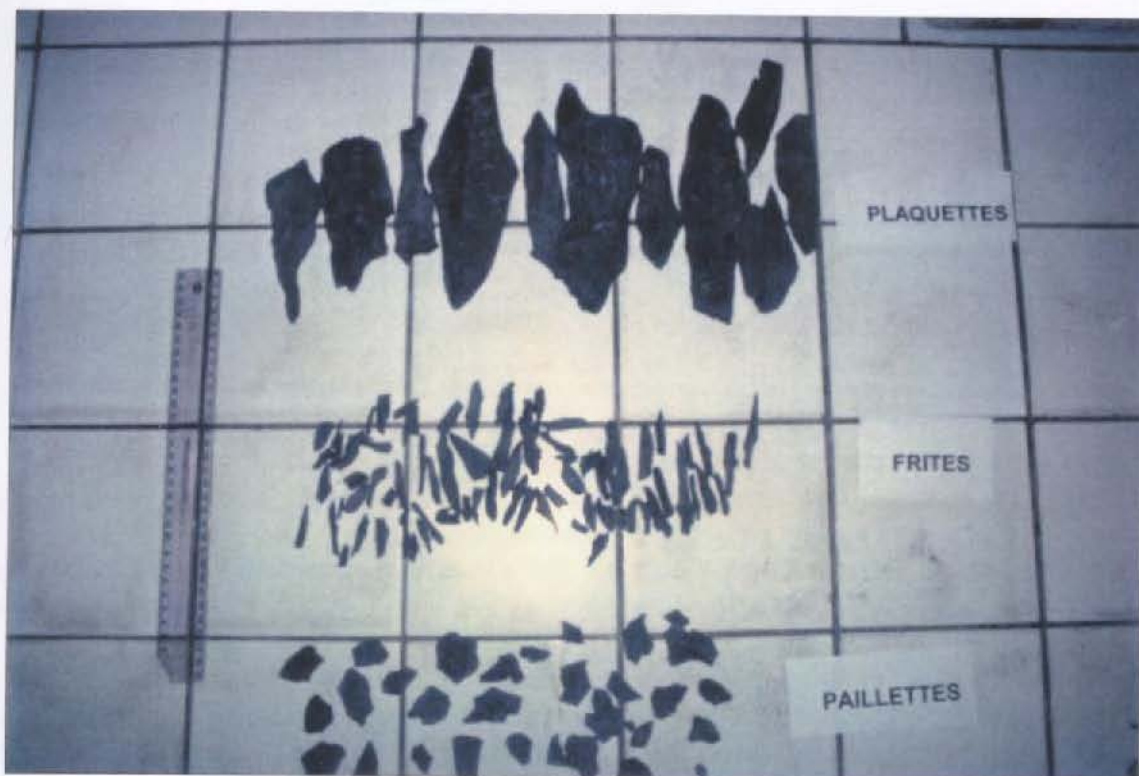


Photo 13 : Les différentes clastes.

2.4. Le foisonnement des panneaux marneux.

Lorsque l'on extrait des matériaux en place, il se produit une plus ou moins grande augmentation de volume, ce phénomène a reçu le nom de **foisonnement**. Le coefficient de foisonnement F est le rapport du volume d'un matériau extrait V_e sur son volume en place V_p . Ce foisonnement va dépendre des contraintes subies en place mais aussi de la nature, de la cohésion des grains et de la teneur en eau du matériau (K. Terzaghi & R.B. Peck, 1965). Le matériau subi donc une **décompression** qui est, comme nous l'avons vu, un phénomène important dans la compréhension de l'altération.

$$F = V_e/V_p$$

Quatre coefficients de foisonnement ont été déterminés à partir de volumes choisis sur différents **panneaux marneux de la coulée en voie de désagrégation** (tableau 13). Les schémas de ces blocs et des volumes choisis sont présentés en annexe 5, sauf pour le bloc 1 présenté sur la figure 28 et sur la photo 14.

Une fois le volume en place déterminé, les débris de toutes tailles (plaquettes, paillettes, frites) sont « lâchés » sur une bâche en nylon afin de les déstructurer sans les casser. Les matériaux sont ensuite repris et placés dans un seau de volume connu (nous avons pris un seau gradué de 10 litres). Le total du nombre de seaux nous donne le volume de matériaux retirés.

	Vp (cm ³)	Ve (cm ³)	Coefficient F
Bloc 1	21 000	29 000	1.4
Bloc 2	26 000	44 000	1.7
Bloc 3	30 000	50 000	1.7
Bloc 4	13 000	28 000	2.15
Moyenne	22 500	37 750	1.7

Tableau 13 : Coefficient de foisonnement.

sons et (ini) fa rapport
aux mms "en place"

• *Interprétation et discussion des résultats.*

Avec une moyenne de 1.7, les matériaux ont un foisonnement important, mais celui-ci dépend beaucoup de la forme des clastes : **plus les débris sont gros, plus les vides sont importants** et donc le coefficient élevé. Le bloc 1 était essentiellement composé de clastes longues de plusieurs centimètres et épaisses d'un centimètre environ (photo 14). Le bloc 4 était composé de clastes décimétriques et plus épaisses.

Les moyens disponibles sur le terrain et le choix des volumes, souvent mal déterminés pour un calcul simple, ne permettaient pas d'obtenir des résultats ds grandes précisions, de plus, peu d'éléments bibliographiques ont été trouvés. Ces valeurs représentent surtout une première approche au problème de décompression (et de tassement) des marnes. Il faudrait déterminer plus de coefficients sur des blocs d'apparences différentes.



deja
"de teneur"
et
foisonne

Photo 14 : Bloc 1 sur lequel un volume a été déterminé pour le calcul du coefficient de foisonnement.

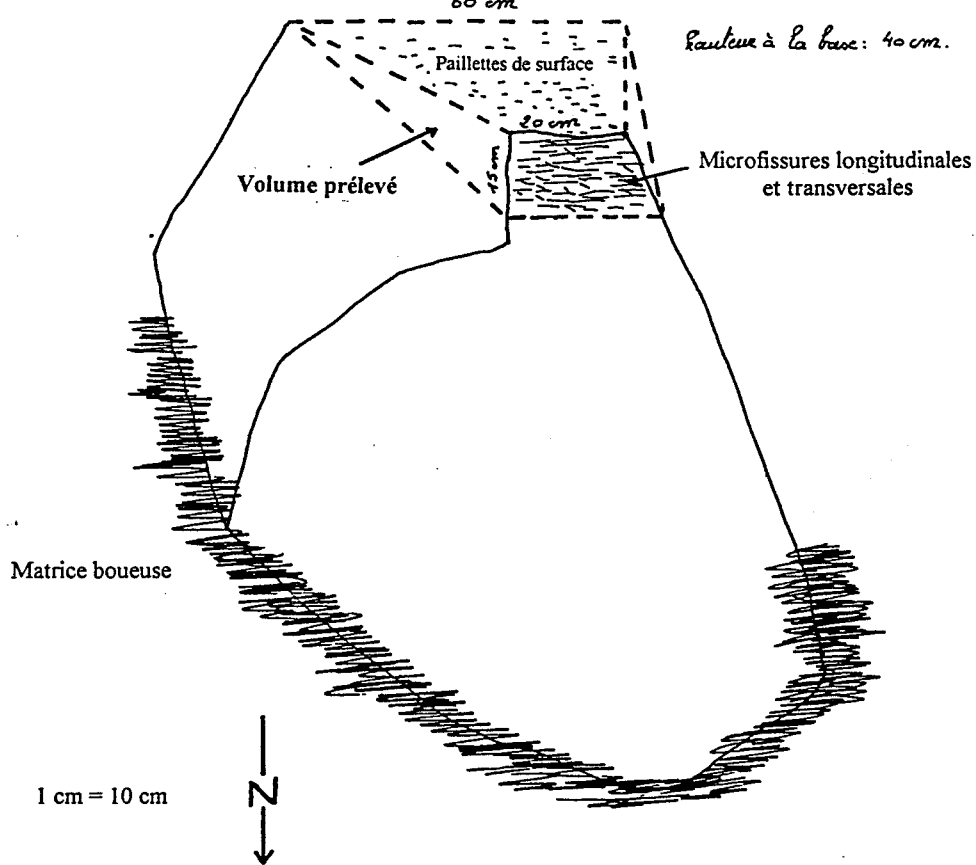


Fig 28 : Coefficient de foisonnement du Bloc 1.

3. ETUDE DE LA DESAGREGATION ET DE L'ALTERATION DES MARNES EN LABORATOIRE.

Les essais vont s'articuler autour de 5 points :

- mesure de la porosité ;
- cycles gel/dégel ;
- cycles humectation/dessiccation ;
- essai de dégradabilité ;
- essais d'altérabilité.)

Ils n'ont pas la prétention de présenter des résultats statistiquement fiables car les instruments normatifs adéquats à certains essais n'étaient pas disponibles, et les échantillons soumis sont trop peu nombreux. Or, le but est de donner une première approche à l'évolution des marnes du glissement-coulée et de voir si les agents météoriques responsables de cette altération jouent un rôle important dans l'évolution du glissement vers une coulée de débris. → oui !

3.1. La porosité des marnes noires de la coulée.

Une fine analyse de la porosité, à travers la connaissance de la structure de la roche, s'avère souvent nécessaire pour mieux comprendre ou prévoir les divers comportements de matériaux naturels (Pellerin, 1980). Ceci permet de mieux cerner les modalités de la circulation de l'eau, qui joue un rôle indispensable dans l'altération des blocs marneux par les effets de gel/dégel et d'humectation/dessiccation.

La porosité se mesure avec un porosimètre à mercure. Nous présenterons ici, les résultats concernant :

- la porosité totale ;
- la répartition des seuils des pores ou des fissures en fonction du volume des vides accessibles par ces seuils ;
- la porosité libre totale (porosité des canaux, essentielle pour les transferts des fluides) ;
- la porosité dite piégée (différente de la porosité fermée).

Deux porosimétries au mercure ont été effectuées sur des échantillons de marnes remaniés, prélevés dans la coulée (à l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydrologie et de Mécanique de Grenoble). En voici les principaux résultats :

	Echantillon 1	Echantillon 2
Poids de l'échantillon (gr)	3.38	2.24
Porosité (%)	16.53	22.78
Densité apparente	2.74	2.82
Volume total de mercure	0.0722 ml/g	0.1044 ml/g
Diamètre médian (μm)	0.38	0.38
Pression maximum (Mpa)	411	413

Tableau 14 : Porosité des marnes de la coulée.

Les courbes cumulatives sont présentées sur les figures 29 et 30, les détails se trouvant en annexe 6.

Interprétation des résultats :

Les histogrammes sont bimodaux :

- un premier mode autour de 0.2 mm pour l'échantillon 1 et de 0.06 mm pour l'échantillon 2 ;
- un deuxième mode autour de 0.3 μm pour les deux.

Ceci différencie donc une macroporosité liée à la circulation dans les fissures et entre les agrégats, à une microporosité liée à la texture silto-argileuse des marnes de la coulée. Le diamètre moyen de 0.38 μm montre l'importance des macropores et résulte de la faiblesse des feuillettes d'argiles.

Les courbes cumulatives présentent une hystérésis assez marquée et donc un volume de mercure resté piégé non négligeable.

Ces observations doivent être complétées par d'autres essais afin d'être plus précis notamment sur le rôle des feuillettes d'argiles, des macropores et du phénomène d'hystérésis.

Dans le cas des marnes, le rapport rayon de pores/rayon d'accès, est élevé et la valeur de la porosité piégée peut éclairer sur la sensibilité du matériau à l'eau (Pellerin, 1980).

L'altération météorique a pour effet d'ouvrir les accès aux pores en diminuant la porosité piégée. A. Alexandre (1995), remarque qu'une succession d'essais porosimétriques selon les variations de profondeur de prise d'échantillon permettrait d'établir un gradient d'altération verticale.

sur des marnes
en place

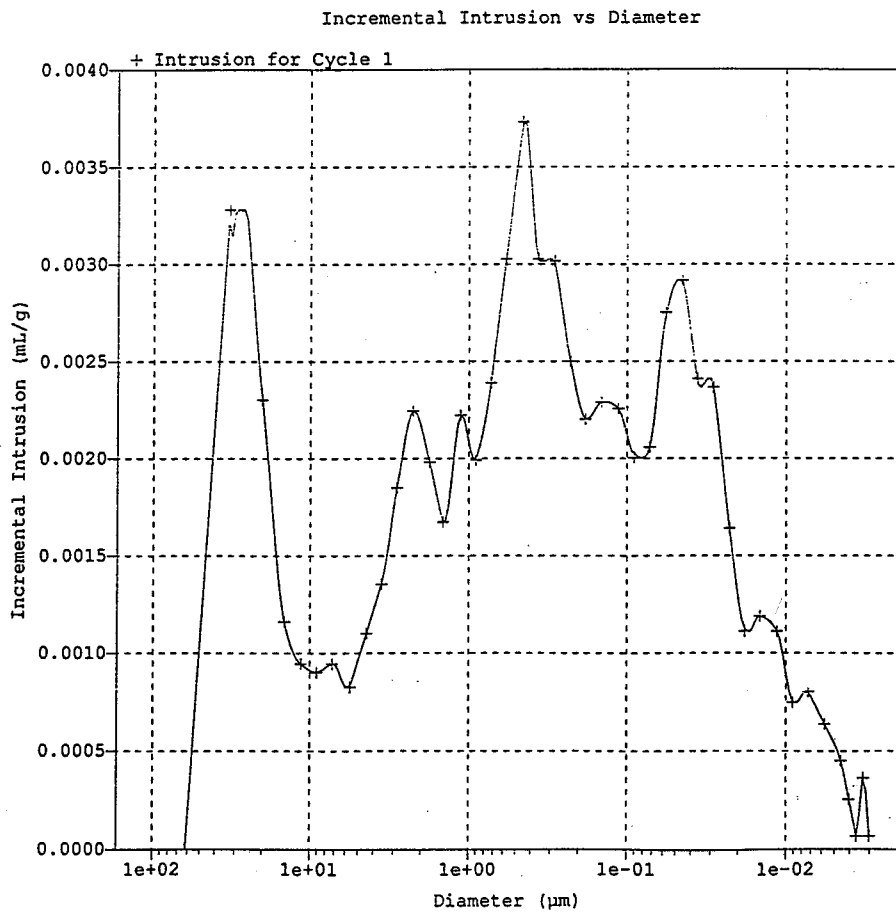
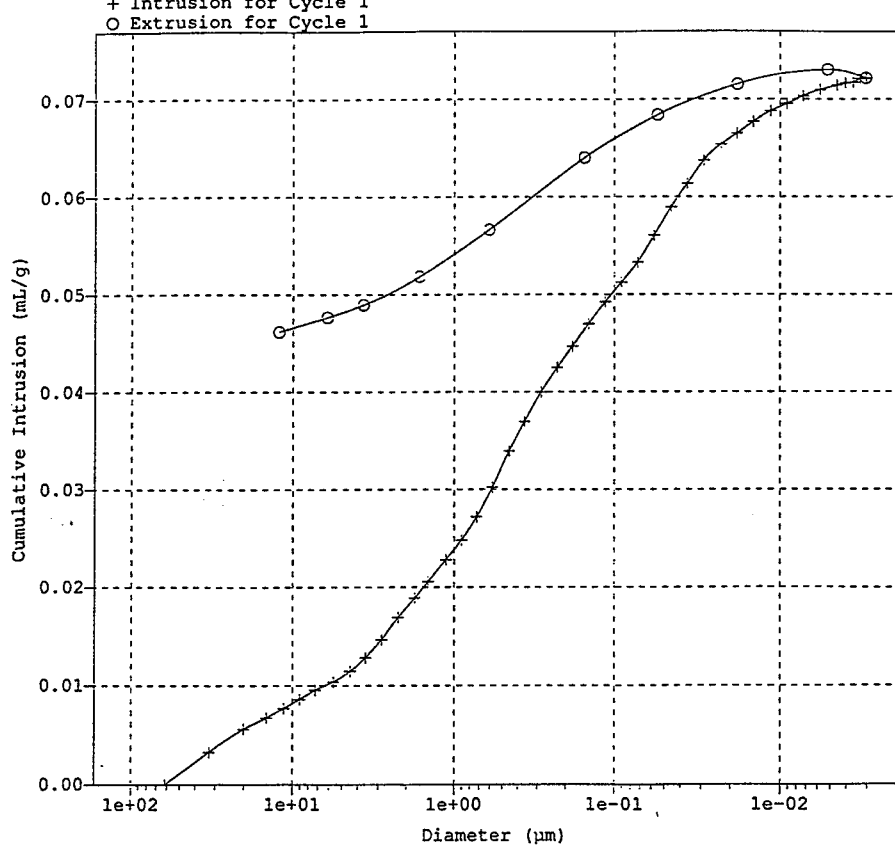
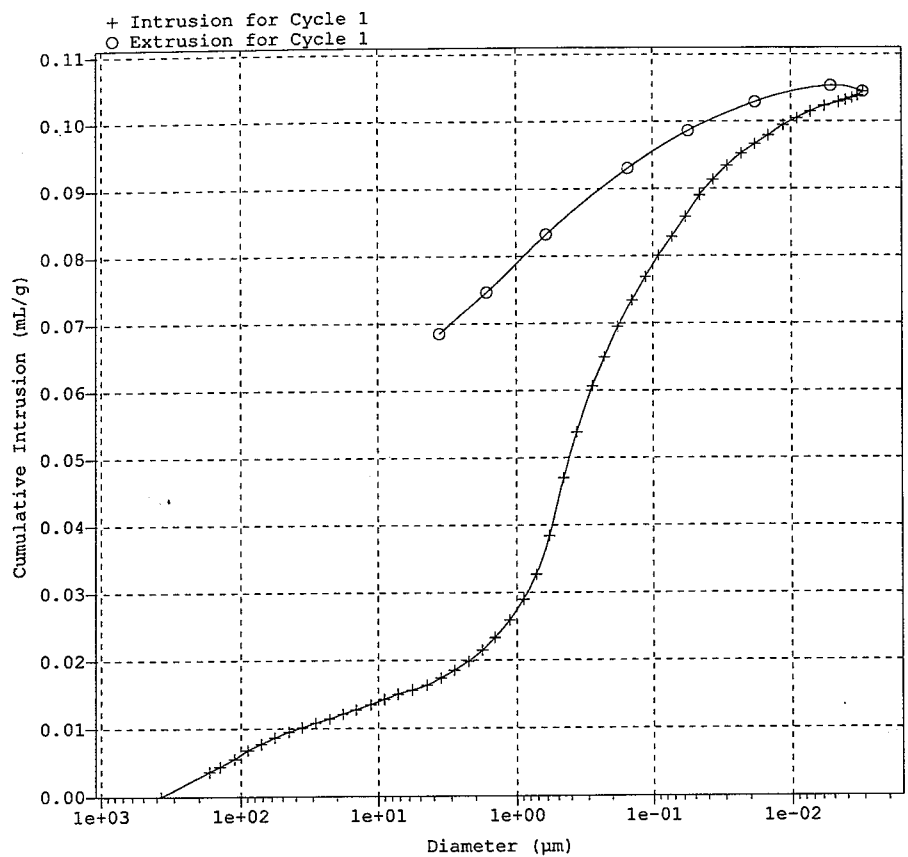


Fig 29 : Courbe cumulative et histogramme de l'échantillon 1.



Incremental Intrusion vs Diameter

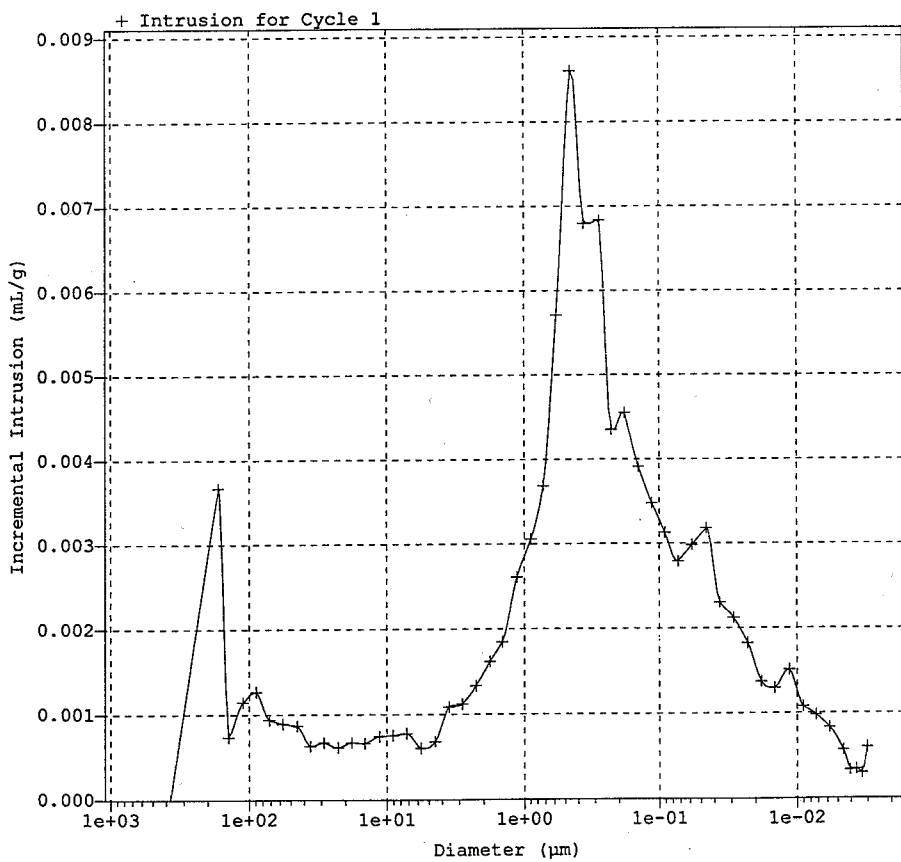


Fig 30 : Courbe cumulative et histogramme de l'échantillon 2.

Plus la structure de la roche est compacte, plus la porosité piégée augmente en valeur relative. Inversement, la valeur relative de la porosité libre est d'autant plus grande que l'assemblage des particules est lâche. On peut en déduire un degré de fissuration (Alexandre A., 1995).

Dans le cas des panneaux marneux, les microfissurations et les macrofissurations vont commander les trajectoires des eaux (libres et par ascension capillaire) indispensables à la cryoclastie et à l'hydroclastie.

L'eau piégée joue un rôle important, surtout pour la cryoclastie qui peut continuer son travail de fatigue sur la roche, même s'il n'y a plus de source d'alimentation en eau.

Des porosités à l'eau ont été mesurées sur des marnes noires, dont voici les résultats :

	Porosité à l'eau (%)	Taux de calcaire (%)
Calcaires marneux (Draix)	5	52.6
Marnes noires (Bathonien ; Draix)	6.5	36.4
Marnes noires (Oxfordien)	6.8	38.4

Tableau 15 : Quelques porosités de marnes noires (Source ?)

La porosité est inférieure à celle mesurée au mercure, mais ce qu'il est important de constater est l'augmentation de celle-ci avec la baisse du taux de calcaire. Les marnes oxfordiennes présentent la porosité la plus élevée pour un taux de calcaire équivalent à celui des marnes de la coulée de Super-Sauze.

3.2. L'hydroclastie des marnes de la coulée de Super-Sauze.

L'hydroclastie est le fractionnement des roches par les alternances d'humectation/dessiccation. Qu'elle est le degré d'importance de ce processus sur la désagrégation des panneaux marneux du glissement-coulée de Super-Sauze ?

3.2.1. Quelques généralités ...

Les alternances humectation/dessiccation jouent un rôle primordial sur la fragilisation des roches : les temps secs favorisent le retrait des roches et renforcent la structure mais leur cohésion est détruite. Ce phénomène est amplifié quand les matériaux contiennent beaucoup d'argiles, comme certaines marnes noires. L'humectation, quant à elle, renforce la cohésion des marnes et détruit sa structure qui devient plus ou moins plastique suivant son importance en argiles (Descroix L., 1994).

Les alternances humectation/dessiccation permettent donc le gonflement et le retrait des divers composants de la roche, et engendrent donc la fragilisation de celle-ci. La dégradation est proportionnelle à la pression de gonflement, et de ce fait, à la nature des argiles gonflantes

(Tableau 15). Le nombre d'alternances d'humectation/dessiccation va avoir plus d'influence que la durée de saturation des roches.

Types d'argiles	P en kgf.cm ²
Montmorillonite Ca ²⁺	120
Illite Ca ²⁺	38
Kaolinite Ca ²⁺	22

Tableau 15 : Pressions de gonflement maximales au contact de l'eau (Biro, 1981).

L. Descroix (1994) observe que même si les argiles gonflantes sont en faible quantité, les alternances fatiguent tout de même la roche. Les marnes noires du glissement-coulée de Super-Sauze présentent une composition minéralogique faible en argiles gonflantes, et les limites d'Atterberg les classent dans les argiles peu plastiques (Herrmann D., 1997). D'autres marnes noires, tels que celles de la région niçoise, sont plus plastiques et présentent un cortège minéralogique d'argiles plus gonflantes. Les marnes de la coulée sont-elles pour cela moins affectées par ce processus ?

Certes, la faible proportion d'argiles gonflantes risque d'atténuer la fragilisation liée à ces alternances. Les conditions hydriques contrastées de ces régions alpines et la fragmentation initiale des panneaux marneux vont cependant faciliter les infiltrations et les alternances, et donc rendre ce processus non négligeable.

3.2.2. Présentation de l'essai.

*pour une offre de
de l'altérabilité*

Une série de cycles humectation/dessiccation a été soumise à sept plaquettes provenant du bloc décrit dans la partie 2 de ce présent chapitre (photo 11).

Les informations générales sur ces plaquettes avant le début de l'essai sont réunies dans le tableau suivant (photo 15) :

Nombre de clastes	7
Poids moyen	257 g
Poids total	1800 g
Longueur moyenne	19 cm
largeur moyenne	6.7 cm
épaisseur moyenne	2.6 cm

Tableau 16 : Données générales des plaquettes soumises à l'essai.

L'essai est d'une relative simplicité : Il s'agit de suivre l'évolution des plaquettes marneuses soumises à 20 cycles journaliers d'imbibition (12 h) et de dessiccation (12h). Une fois le dernier cycle terminé, les débris sont séchés à l'étuve (105°C) et passés dans une colonne de tamis 0.5 - 1 - 2 - 4 - 8 mm.

L'objectif de cet essai est double :

- observer l'évolution de la fragmentation des plaquettes marneuses initialement cohérentes, au fur et à mesure des cycles ;
- décrire la morphoscopie des débris issus de cette fragmentation et les comparer avec celles décrites sur le terrain.

3.2.3. Observation et interprétation des résultats :

La courbe granulométrique (figure 31 et tableau 17) indique une très faible proportion de fine, mais **toutes les plaquettes se sont désagrégées en débris** souvent inférieurs au centimètre. Dès le premier cycle, les fissures apparaissent déjà dans le sens de la longueur mais la forme initiale des plaquettes restent intactes pendant plusieurs cycles avant que les débris ne se détachent de celles-ci. La morphologie des clastes détachés est en forme de frites similaires à celles décrites sur le tablier d'éboulis en aval du bloc étudié dans la partie 2 de ce présent chapitre (Photo 16).

L'ascension capillaire est réellement visible. En effet, lorsque l'on procède à la réimbibition lente des clastes après leur dessiccation, l'eau envahit préférentiellement les fentes macro et microscopiques. La désagrégation se fait uniformément sur l'ensemble des débris, ce qui peut expliquer la répartition des classes granulométriques.

Tableau 17 : Présentation des différentes classes granulométriques de l'essai hydroclastique.

Diamètre du tamis en mm	Poids en gr	%	% cumulé
refus	15	0,8	0,8
0,5	10	0,5	1,3
1	11	0,6	1,9
2	15	0,8	2,7
4	857	47,6	50,3
8	897	49,8	100
Total	1800		

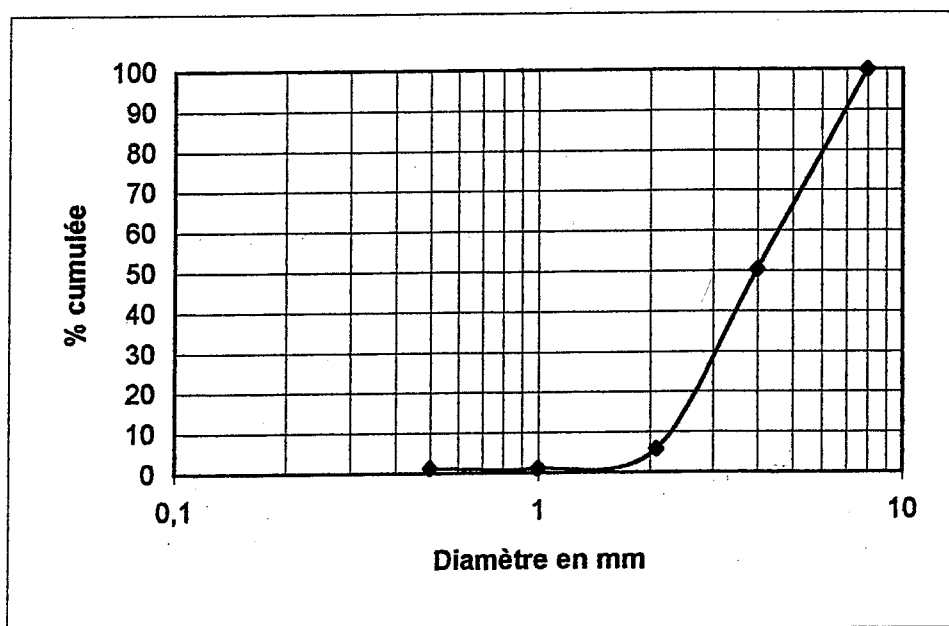


Fig 31 : Courbe granulométrique après 20 cycles humectation/dessiccation.



Photo 15 : Présentation des sept plaquettes avant l'essai.



Photo 16 : Résultat après 20 cycles.

cf h75

Pour résumer, les panneaux marneux de la coulée, initialement fissurés, sont offerts à ce type de dégradation dès qu'ils sont à l'air libre, car l'eau sur un bloc sec provoque l'emprisonnement de bulles d'air dans ses fissures. Les fentes capillaires attirent cette eau par une force de succion qui se traduit par une pression sur ces bulles d'air, provoquant une pression sur les parois dite hydrostatique, et produisant ainsi une contrainte de traction qui tend à prolonger la fissure par écartement des lèvres (observations faites par M. Bufalo, 1989). C'est la répétition des cycles qui fini par détacher les clastes du bloc d'origine.

done pas de gonfl^{mt} de minéraux

Cette action de l'eau est indissociable de l'action du gel que nous allons maintenant présenter.

3.3. L'importance des alternances gel/dégel sur les marnes de la coulée de Super-Sauze.

D'une façon très simple, il s'agit de voir pourquoi ce processus a une telle influence sur la dégradation des roches et en particulier celle des formations marneuses.

3.3.1. Présentation de quelques généralités.

L'action du gel est directement liée à la teneur en eau de la roche, à sa porosité initiale et à la température ambiante. **La résistance mécanique d'une roche face au gel est inversement proportionnelle à la porosité totale.**

Tout comme les alternances humectation/dessiccation, les alternances gel/dégel vont affecter les niveaux de discontinuité de la roche, à savoir les fissures et les pores. Les blocs de dimensions supérieures au cm peuvent subir des désordres dus à ces niveaux de discontinuité (C. Tourencq, 1970).

La dimension des pores de la matrice conditionne l'aptitude qu'a la roche à se saturer en eau. Plus le gel est important sur une roche saturée, plus il pénètre dans les pores les plus fins. A -5°C , le gel affecte les pores inférieurs à $0.1\ \mu\text{m}$, à -10°C , les pores inférieurs à $0.01\ \mu\text{m}$ et à -20°C ceux inférieurs à $0.005\ \mu\text{m}$. Or, ces pores ne sont pas rares dans les roches, 16 % de la porosité totale des marnes noires de Super-Sauze est inférieure à $0.005\ \mu\text{m}$ (porosimètre au mercure).

Les recherches sur la gélivation des roches (Laboratoire de géomorphologie du CNRS à Caen dans les années 1970 et 1980) ont surtout mis en évidence le rôle essentiel joué par la fissuration. La transformation de l'eau en glace s'accompagne d'une augmentation de volume de 9 % et donc une microfissuration progressive de la roche apparaît au niveau des espaces intergranulaire. Elles ont aussi mis en avant **la plus grande vulnérabilité des roches sédimentaires face à cette action, à cause de leur fissuration initiale** (~~due à la tectonique, à la diagénèse et à la décompression~~).

Un gel constant, aussi intense qu'il soit, n'a qu'une action limitée sur la gélivation des roches. **C'est le nombre d'alternances qui fragilise un maximum les roches.**

Les marnes noires du glissement-coulée de Super-Sauze présentent donc les caractéristiques adéquates à une action du gel, efficace à la désagrégation des panneaux marneux en surface (grand nombre d'alternances gel/dégel, fissuration initiale marquée, présence d'eau abondante).

La station climatique installée à proximité du glissement en 1995, donne sur la période de juillet 1996 à juillet 1997, les informations suivantes sur le gel :

Nombre de jours où les températures sont inférieures à 0°C.	113
Nombre de jours où les températures alternent autour de 0°C au moins une fois.	86
Amplitude thermique journalière la plus importante.	15.7°C (+14.3°/-1.4°)
Nombre de jours consécutifs sans gel.	7
Température de gel moyenne.	-3.1°C
Température négative maximum.	-12.2°C
Premier jours de gel.	le 17/10/97
Dernier jour de gel.	le 9/5/97

Tableau 18 : Traitement des données climatiques sur le gel pour l'année 1996/1997.

Cette année nous donne tout de même un aperçu de la fatigue subie par les roches marneuses de la coulée sous l'action de la cryoclastie puisqu'il s'est produit 90 alternances gel/dégel d'octobre à mai. L'efficacité de ce processus est d'autant plus marqué que le plus grand nombre de jours à hauteurs de précipitation élevées se cale sur les mois de septembre octobre et novembre (Y. Sommen, 1996).

L. Descroix (1985) donne, pour quelques régions alpines (Buëch, Baronnies, ...) où les marnes noires affleurent sur de grandes surfaces, un nombre d'alternances gel/dégel journalières annuel souvent supérieur à 100. Cependant, elles varient suivant l'altitude et l'orientation des versants.

Ces quelques données peuvent donc déjà nous renseigner d'une part, sur l'influence de ce processus sur les marnes de la coulée de Super-Sauze, et d'autre part, sur les procédés les plus adéquats à suivre pour reproduire au mieux les essais cryoclastiques en laboratoire (nombre de cycles, températures extrêmes ...).

3.3.2. Présentation des essais cryoclastiques.

Deux plaquettes marneuses d'apparences cohérentes, provenant d'un panneau marneux de subsurface en cours d'altérabilité, ont été soumises à 30 cycles de gel/dégel. Elles sont placées dans des bacs en aluminium puis sont immergées à des hauteurs d'eau différentes :

- *la claste 1* ne repose que sur quelques millimètres d'eau afin d'observer l'efficacité de l'onde de gel lorsque la roche n'est saturée que partiellement ;
- *La claste 2* est totalement immergée, ce qui lui assure une saturation permanente. Ceci représente la condition la plus efficace offerte au gel. Quels en seront les résultats?

Les caractéristiques physiques des plaquettes au départ des essais sont les suivantes :

	Claste 1	Claste 2
Poids	486.7g	412.5g
Longueur	22 cm	23 cm
Largeur	8.2 cm	9 cm
Epaisseur	3 cm	2.5 cm

Tableau 19 ; Caractéristiques physiques de départ des clastes soumises aux alternances gel/dégel.

Les cycles sont au nombre de un par jours (12h gel/12h dégel). Le gel est porté à -18°C dans un congélateur, et le dégel se fait à température ambiante (environ 20°C). Une fois le dernier cycle terminé, les débris sont séchés à l'étuve et passés dans une colonne de tamis 0.5 - 1 - 2 - 4 - 8 mm.

L'objectif de ces essais, essentiellement qualitatif, porte sur l'observation de la fragmentation des plaquettes marneuses sous l'action du gel. Il sera notamment décrit :

- l'évolution de la dégradation des plaquettes au fur et à mesure des cycles ;
- la différence d'altérabilité entre une marne constamment saturée et une marne partiellement saturée par la base ;
- la quantité de fines, inférieures au mm (facilement mobilisable par le ruissellement), qui se forme au bout du 30^e cycle.

A défaut de matériel spécifique, ce protocole est assez simpliste. Une armoire climatique aurait permis de réguler les températures de gel en rapport avec celles mesurées in situ.

3.3.3. Observations et Interprétations des résultats.

Il est évident que la claste 2, totalement saturée (photo 17), a subi une désagrégation beaucoup plus importante que la claste 1 (photo 18) seulement immergée dans quelques mm d'eau. En effet, le délitage fut visible sur toute la surface de la plaquette dès les premiers cycles, et le coeur de la claste a perdu sa cohérence au bout d'une dizaine de cycles. Le délitage de la claste 2 ne s'est fait que par la base (influence de la cryosuction, cf Figure 20). Ce n'est qu'à partir de 25 cycles que la partie principale s'est fissurée en plusieurs morceaux encore pluricentimétriques.

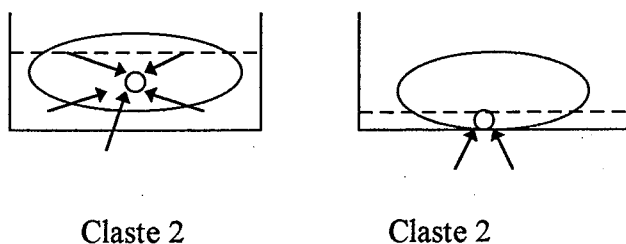


Figure 20 : influence de l'onde de gel sur les deux clastes.

partielle + saturée

totale + saturée

Diamètre du tamis en mm	CLASTE 1			CLASTE 2		
	Poids en gr	%	% cumulé	Poids en gr	%	% cumulé
refus				6,5	1,58	1,58
0,08	5,5	1,12	1,12	6	1,45	3,03
0,25	6	1,22	2,34	10	2,43	5,46
0,5	12	2,45	4,79	14	3,39	8,85
1	12,5	2,55	7,34	32,5	7,88	16,73
2	18	3,67	11,01	85,5	20,75	37,48
4	26,5	5,4	16,41	105	25,48	62,96
8	27	5,5	21,91	152,5	37,01	99,97
50	97	19,77	41,68			
120	286	58,31	99,99			
Total	490,5			412		

Tableau 20 : Présentation des différentes classes granulométriques effectuées sur les deux clastes.

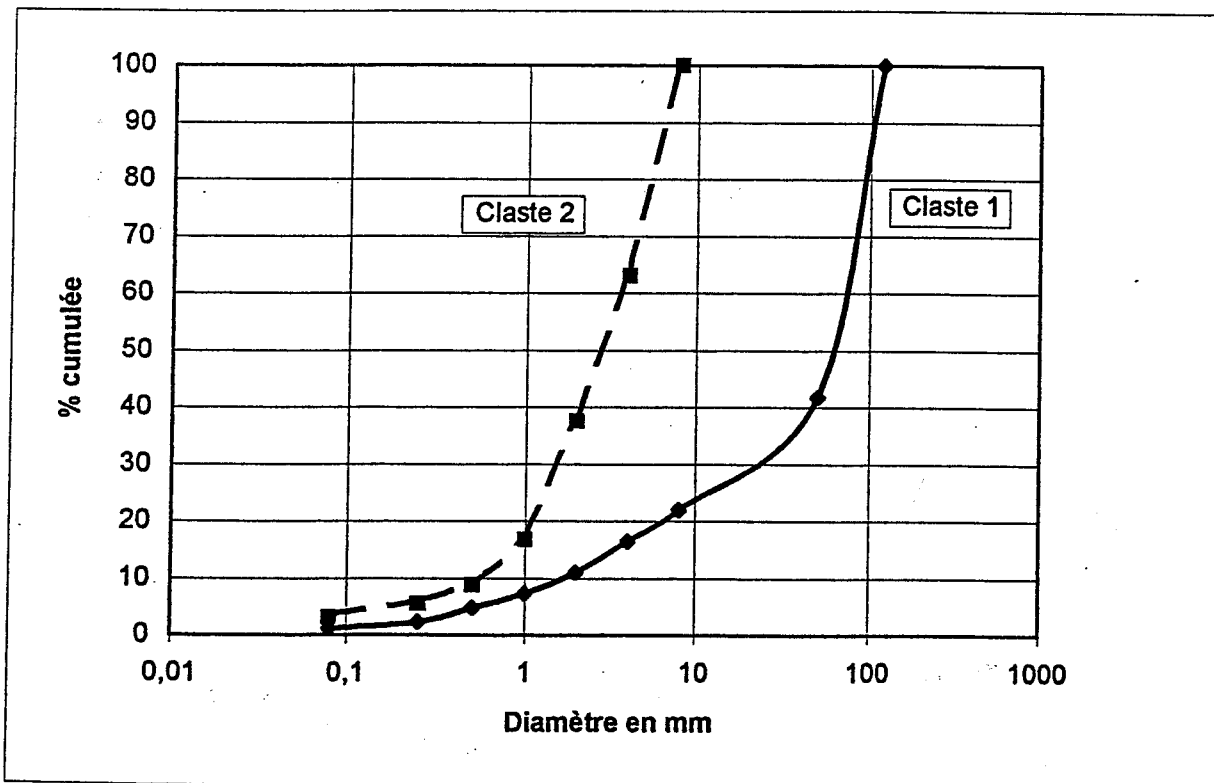


Fig 32 : Courbe granulométrique des deux clastes après 30 cycles gel/dégel

La granulométrie réalisée sur les débris des deux clastes atteste cette différence (tableau 20 et figure 32):

L'hétérométrie des résultats provient du fait que le gel, tout en progressant vers le coeur de la plaquette, continue son action sur les fragments déjà détachés.

La plaquette saturée ne présente plus d'éléments pluricentimétriques.

La morphométrie se fait surtout en forme d'écaillés, ce qui est dû à la progression de l'onde de gel. Ceci est à rapprocher des observations faites sur la morphométrie des clastes, à la surface des zones bosselées, correspondant à la présence d'un bloc.

mais est-il futur?

Ces résultats confirment l'efficacité de la cryoclastie sur la désagrégation des marnes noires, surtout quand celles-ci sont saturées. Il a suffi de 30 cycles de gel/dégel, certes à des températures de gel excessives par rapport à celles relevées à proximité du glissement-coulée, pour rendre une plaquette pluridécimétrique en un amas de débris inférieurs au centimètre. Il faut remarquer que la différence entre l'altitude de la station climatique et le sommet du glissement-coulée est de quelques centaines de mètres, ce qui amplifie encore les températures inférieures à 0°C (mais peut être pas les alternances ...)

3.3.4. Quelques remarques par rapport au protocole.

Plusieurs protocoles adaptés à la cryoclastie ont été élaborés, surtout pour des études portant sur les matériaux utilisés comme remblais en mécanique des sols (essai Los Angeles, essai Deval ...). Dans l'ensemble, ils s'accordent tous pour faire subir à des échantillons de roches taillés en cube des cycles journaliers de gel et de dégel dans une armoire climatique. Le gel appliqué à la roche peut être plus ou moins intense et rapide, mais les auteurs appliquent souvent des alternances de +15°C et de -15°C, tout du moins pour les marnes noires (Descroix L., 1985, Alexandre A, 1995). Après un nombre de cycles en rapport avec les relevés climatiques in situ, l'échantillon est passé dans une colonne de tamis afin d'en apprécier l'évolution. L. Descroix (1985) a effectué un tamisage tous les 7 cycles.

Pour les marnes noires en général, le découpage de l'échantillon en cube peut fausser sa porosité initiale et le rendre plus fragmentable. L. Descroix (1985) fait part de la difficulté qu'il a eu à découper un échantillon de marnes noires sans que celui-ci se déstructure. Il est donc plus judicieux de soumettre aux cycles gel/dégel, un échantillon de forme naturelle.

Dans un premier temps, il est nécessaire de se borner à faire des expérimentations en laboratoire afin de mieux cerner les comportements des marnes face à la cryoclastie. Dans un second temps, afin de reproduire au mieux les conditions de terrain, il sera préférable de disposer de données climatiques portant sur plusieurs années. Elles permettraient de caler le nombre moyen d'alternances gel/dégel soumis à l'échantillon en rapport avec celles subies annuellement in situ. Sur les données climatiques que nous disposons, des alternances de +20°C/-18°C paraissent trop violente pour ces marnes, d'autant plus que le manteau neigeux joue un rôle protecteur pendant plusieurs mois et minimise ainsi les alternances. Mais nous ne disposons pas des appareillages adéquats qui permettraient une telle régulation.

Enfin, les observations in situ de l'état hydrique des marnes du glissement-coulée devraient guider le choix de la saturation à soumettre aux échantillons, car ces essais en laboratoire présentent souvent un aspect empirique.



Photo 17 : Fractions granulométriques de la claste 1 (partiellement immergée).



Photo 18 : Fractions granulométriques de la claste 2 (totalement immergée).

A défaut de posséder la plupart de ces renseignements, les essais sont restés très sommaires, mais l'essentiel était de mettre en avant le pouvoir destructif de ce processus.

Nous pouvons conclure que, associé à l'hydroclastie, la cryoclastie, au travers de la centaine de cycles annuels, constitue un facteur primordial de la dégradation rapide (sur un an) des blocs en surface et en subsurface. De ce fait, la cryoclastie contribue à alimenter le glissement-coulée en débris.

3.4. Détermination d'un coefficient d'altérabilité pour les marnes noires de la coulée de Super-Sauze

G. Colas et B. Dumolard (in Alexandre A., 1995) ont adapté aux formations géologiques marneuses des préalpes, des essais d'altérabilité. Basé sur l'exemple réalisé par A. Alexandre (1995) sur trois types de formations marneuses (Oxfordien, Gargasien et Cénomaniens), un essai a été effectué sur les marnes noires de la coulée à titre comparatif.

3.4.1. Présentation du mode opératoire.

Il s'agit de suivre l'évolution granulométrique d'une prise d'essai de 500 g de matériaux sur la fraction 8/20 mm, soumis à 5 cycles d'imbibition (immersion dans l'eau) et de dessiccation (séchage à l'étuve).

L'échantillon a été prélevé à partir de la granulométrie 2EF2 afin de garder des débris de formes naturelles, différemment de l'échantillonnage de A. Alexandre qui est issu du broyage d'un bloc ensuite tamisé.

L'immersion est de 7 heures (+/- une heure) et le séchage de 16 heures (étuve à 105°C). Le tamisage est effectué à sec après chaque cycle dans une colonne de tamis 8-5-2 mm. La fraction inférieure à 2 mm est éliminée.

La caractéristique pour la détermination d'un coefficient d'altérabilité est le % de tamisât à 5 mm au 5^e cycle.

$$\text{Coefficient d'altérabilité} = \frac{P - P'}{P} \times 100$$

Avec : P = poids de la prise d'essai.

P' = Poids du refus au tamis 5 mm au 5^e cycle.

L'expérience fournit une appréciation de la sensibilité des fragments de la roche, tels que ceux observés sur le glissement-coulée, face aux variations brutales de teneur en eau, et ceci à travers les modifications de ses caractéristiques granulométriques. La sensibilité à l'essai est exprimée selon les conventions suivantes :

- Matériau peu érodable : coefficient < 10
- Matériau érodable : coefficient > 50

Les matériaux à valeurs intermédiaires ne se classent pas car la détermination de leur essai est trop imprécise.

G. Colas et B. Dumolard fournissent aussi une typologie du comportement de l'échantillon lors des immersions (observations visuelles) :

- *délitage par dispersion*, lorsque l'eau se trouble au début de la première immersion et qu'il ne subsiste aucun fragment > 2 mm après le premier cycle ;
- *délitage par dispersion et fragmentation*, lorsque les fragments sont formés sur place et qu'un dépôt argileux s'est déposé dans le fond du bac ;
- *délitage par fragmentation*, lorsque l'eau reste claire pendant toute la durée de l'immersion, que les fragments se sont formés sur place et qu'il n'y a pas de dépôt argileux.

Les processus de fragmentation sont les mêmes que ceux décrits lors des essais hydroclastiques.

3.4.2. Résultats et interprétation.

La description des résultats est présentée dans le tableau suivant :

Poids de l'échantillon	cycle	refus 8 mm (%)	refus 4 mm (%)	refus 2 mm (%)	refus (%)
500 g	1	53.15	17.5	11	17.9
410 g	2	51	18.8	13.7	14.8
350 g	3	49.8	20.8	16.7	10.3
305 g	4	48.6	24.8	19.7	7
284 g	5	46.6	25.3	23.2	4.9

Tableau 21 : Présentation des résultats pour chaque cycle.

Le coefficient d'altérabilité au 5^e cycle est de 76.7%, donc les marnes noires de Super-Sauze se classent dans les matériaux érodables.

Pour chaque cycle, les éléments inférieurs à 8 mm sont éliminés de moitié et le refus à 4 mm reste aussi constant sur les 5 cycles.

Le refus supérieur à 2 mm est important sur les deux premiers cycles, ce qui peut expliquer la turbidité de l'eau, puis il baisse de façon significative sur les derniers cycles et laisse une eau claire. Le mode de délitage observé est donc de type dispersion et fragmentation.

En comparaison avec les résultats de A. Alexandre (1995), les marnes de la-coulée présentent la plus faible érodabilité.

Stations	Cénomaniens	Gargasien	Oxfordien
Altérabilité	77.9%	99.8%	99.3%

Tableau 22 : Coefficient d'altérabilité de quelques formations marneuses (Alexandre A., 1995).

Ces résultats, plus élevés, sont certainement dus à la composition minéralogique supérieure en argiles gonflantes (jusqu'à 80% de smectite), et à un taux de carbonate moins élevé (15% pour l'oxfordien contre 34% pour les marnes noires de Super-Sauze).

A. Alexandre explique la similitude des variations de la résistance à l'eau de ces trois marnes, par la mise en jeu des trames de délitages (fragmentation initiale) identiques à celles des marnes noires de la coulée.

Cet essai peut fournir une explication au problème de désagrégation exagéré, rencontré lors des granulométries. En effet cet essai montre que sur une fraction granulométrique bien définie, la première immersion des fragments et leur séchage entraîne une désagrégation des fragments les plus grossiers de 50%, et une production de fines de plus de 18%. Le protocole granulométrique oblige plusieurs immersions des fragments, ce qui engendre donc une surestimation des fines.

3.5. Détermination d'un coefficient de dégradabilité des marnes noires de la coulée.

Cet essai est surtout employé dans l'étude de l'altérabilité des matériaux utilisés comme remblai. Il n'est donc peut être pas assez adapté à l'étude de l'altérabilité des matériaux en milieu naturel. Il peut cependant constituer un élément de comparaison avec des essais de même ordre, réalisés par Phan dans son étude géotechnique sur les terres noires du sud-est de la France. Il peut aussi être mis en rapport avec l'essai d'altérabilité afin d'en voir les différences.

3.5.1. Principe de l'essai.

Le déroulement de cet essai s'est fait suivant la norme NF P94 067 (décembre 1992). Il consiste à déterminer la réduction du « diamètre 10% (D10) » d'un échantillon de 2 kg de matériau, d'une granularité 10/20 mm, après lui avoir fait subir 4 cycles d'immersion dans l'eau (8 heures) et de séchage à l'étuve (16 heures à 105°C). Le dernier cycle se termine par un séchage, puis l'échantillon est passé dans une colonne de tamis 10-5-2-1 mm. Les refus des tamis sont pesés et la courbe résultante est comparée à la courbe initiale.

Une fois la courbe granulométrique élaborée, on détermine le D10 de cette courbe. Le coefficient de dégradabilité qui en résulte est d'un calcul simple :

$$DG = \frac{\text{D10 du matériau avant le premier cycle d'immersion séchage}}{\text{D10 du matériau après le quatrième cycle d'immersion séchage}}$$

D10 est le diamètre correspondant au tamisât à 10%.

La typologie se fait de la façon suivante :

- $DG > 20$: matériaux rocheux très dégradables ;
- $5 < DG < 20$: matériau moyennement dégradables ;
- $DG < 5$: matériaux rocheux peu dégradables.

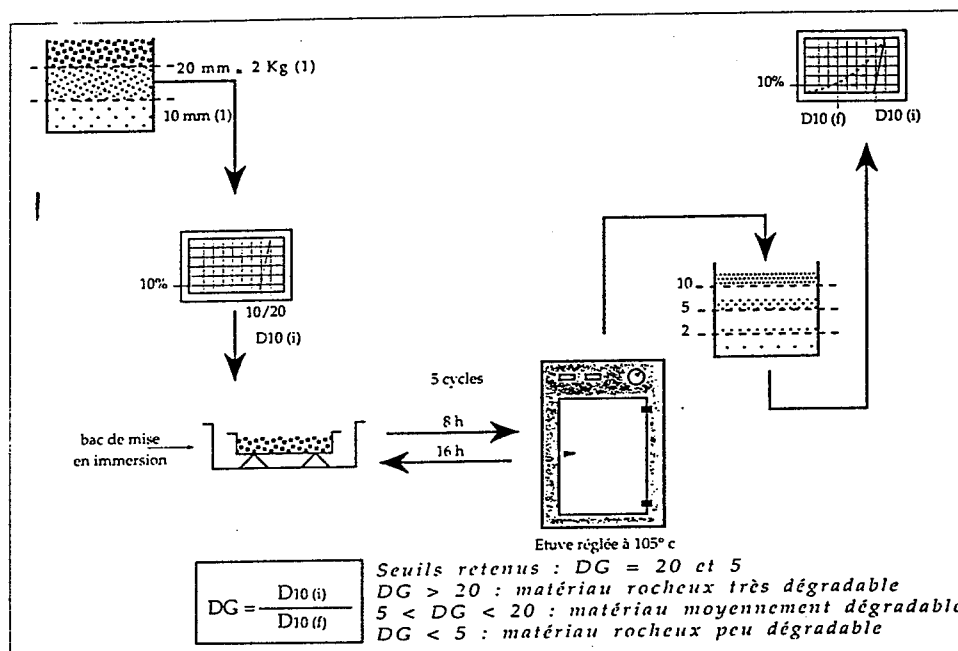


Fig 33 : principe de l'essai de dégradabilité

3.5.2. Réalisation de l'essai et interprétation des résultats.

2 kg de marnes noires de granulométrie 10/20 mm, provenant de la granulométrie réalisée à partir de l'échantillon C1, ont été soumis aux 4 cycles d'immersion-séchage (photo 19). Deux essais ont été réalisés sur ce même échantillon C1 (figure 34).

- La courbe initiale, matérialisée par une droite, présente un D10 de 11 mm ;
- Le D10, après le quatrième cycle, est de 3 mm pour les deux essais réalisés ;
- **Le coefficient de dégradabilité DG est donc de 3.7 ;**
- Les marnes noires de la coulée se classent dans les roches peu dégradables.

Ce résultat s'oppose au résultat déterminé pour le coefficient d'altérabilité. Le protocole est certainement inadapté à l'étude de l'altérabilité pour des roches en milieu naturel. Mais si l'on compare ce résultat avec ceux trouvés par T.S.H. Phan (1993), sur des marnes Oxfordiennes de différentes localités alpines (Le Trièves), on constate qu'elles peuvent être à la fois peu, moyennement ou très dégradables.

Localité	étage géologique	DG
Le Fau	Oxfordien	1.07
Les Blancs	Oxfordien	8.5
Col du Fau	Oxfordien	31.4
Super -Sauze	Callovo-Oxfordien	3.7

Tableau 23 : Coefficient de dégradabilité de quelques formations marneuses préalpines (Phan T.S.H., 1993).

Pour notre échantillon, la présence de filonnet de calcite était supérieure à 10 %, ce qui n'est peut être pas négligeable. Pour valider ces résultats, il faudrait cependant un nombre d'essai plus élevé. Il serait aussi plus judicieux d'effectuer une granulométrie plus détaillée sur la fraction 10/20 mm (tous les deux mm), afin d'avoir une courbe de référence plus précise au lieu de la matérialiser par une droite.

• Conclusion

Quand on observe les panneaux marneux d'amont en aval de la coulée de Super-Sauze, ils nous donnent l'impression de se désagréger très vite en surface et en subsurface pour ne donner qu'un amas de débris hétérogènes en aval de la coulée. Nous venons de voir que les marnes noires du glissement-coulée de Super-Sauze rassemblaient tous les processus adéquats à une dégradation rapide et intense, à savoir :

- *la phase de tectonisation* importante de ces marnes a engendré une microtectonisation qui commande la fragmentation des marnes noires ;
- *le cortège minéralogique*. Avec un taux de carbonate moyen (34% en moyenne) par rapport à d'autres formations marneuses, les marnes du glissement-coulée apparaissent plus fragmentables mais les argiles gonflantes sont en faibles proportions (10 % de smectite);
- *les décompressions successives* des marnes de la coulée, au cours des temps géologiques et lors du déclenchement du glissement-coulée de Super-Sauze, permettent une meilleure infiltration des eaux le long des fissures engendrées par la tectonisation.

L'eau apparaît comme l'agent principal responsable de la dégradation des marnes noires. Son action sur la coulée se fait sous deux formes :

- *les alternances gel/dégel*, où une trentaine de cycle à +20/-18°C suffisent à désagréger totalement une plaquette pluridécimétrique saturée en eau, en un amas de débris rarement supérieurs au centimètre ;
- *les alternances humectation/ dessiccation*, qui agissent d'une façon très efficace dès les premiers cycles.

Il ne nous est pas possible de dire si le processus le plus efficace sur le terrain est l'hydroclastie ou la cryoclastie car tous les deux agissent sur les marnes, mais à différentes saisons. Toujours est-il que la combinaison des deux est la cause d'une altération rapide et efficace, comme le montre le coefficient d'altérabilité. Il est cependant nécessaire de poursuivre ces essais en déterminant un protocole adéquat, qui prenne en compte les conditions de terrain (nombre d'alternance, différence d'altitude ...).

L'intense altération des marnes, dès leur contact avec l'eau, est une constatation à prendre en compte dans la détermination des granulométries, car le protocole habituel oblige plusieurs immersions dans l'eau.

COEFFICIENT DE DEGRADABILITE DES MARNES NOIRES DE SUPER SAUZE

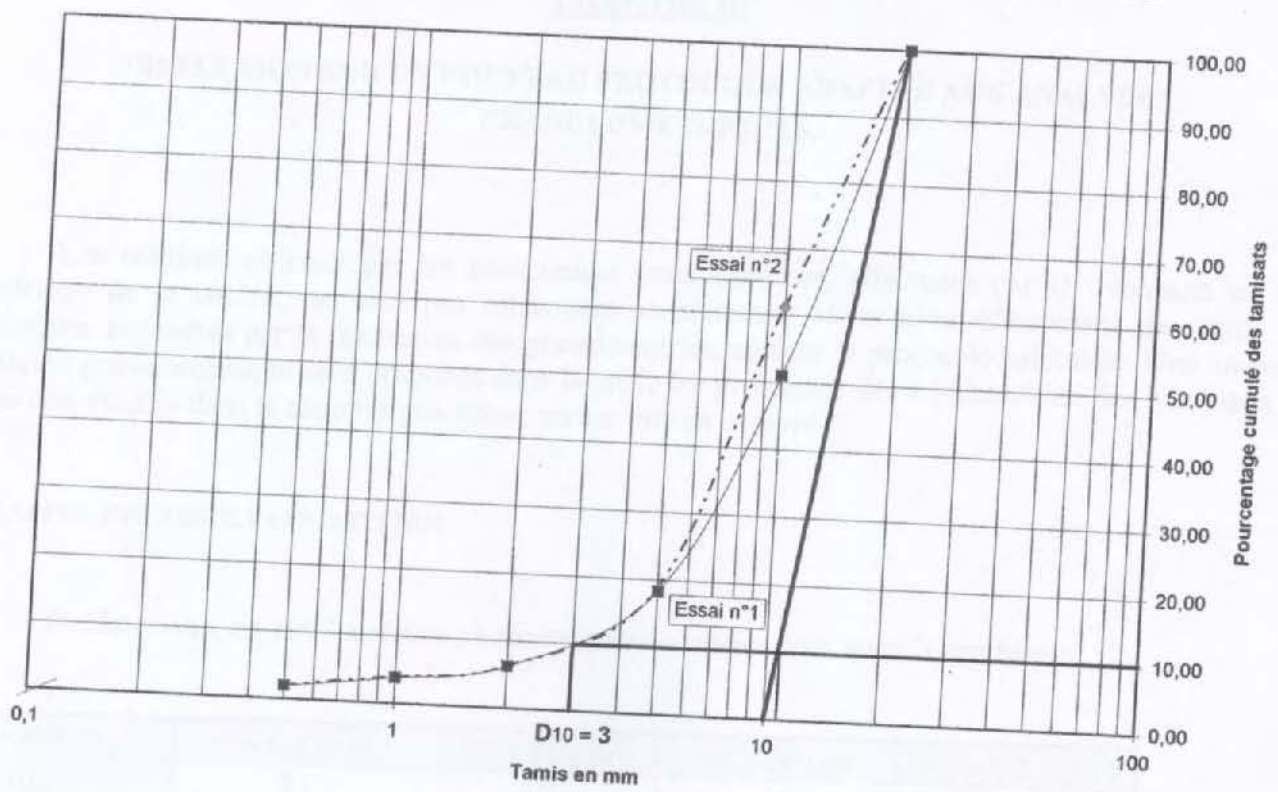


Fig 34 : Coefficient de dégradabilité des marnes noires de Super-Sauze.



Photo 19 : Immersion des débris lors de l'essai de dégradabilité.

CHAPITRE III

REFLEXION SUR UN NOUVEAU PROTOCOLE ADAPTEE AUX ANALYSES GRANULOMETRIQUES.

Les résultats obtenus par les nombreuses granulométries, effectuées par D. Herrmann sur les matériaux de la coulée, ne sont pas totalement satisfaisants. Nous nous efforcerons de cerner les problèmes engendrés par la réalisation des granulométries, suivant le protocole habituelle. Une nouvelle méthode granulométrique sera proposée dans laquelle les problèmes liés à l'altérabilité des matériaux de la coulée, étudiés dans le chapitre précédent, seront pris en compte.

1. RAPPEL DES RESULTATS OBTENUS.

D. Herrmann, en 1997 a réalisé plusieurs granulométries dont voici la synthèse :

Echantillon	% < 2 mm	% < 80 µm	% < 50 µm	% < 2 µm
Nombre	21	19	10	10
Minimum	35	28	47	7
Maximum	95	90	90	32
Moyenne	73.6	63.6	72.9	19.5
Variance	245.4	302.9	170.1	50.6
Ecart-type	15.7	17.4	13.0	7.1
Variation (%)	21.3	27.4	17.9	36.5

Tableau 24: Analyses statistiques des résultats granulométriques obtenus par D. Herrmann (1997).

Les granulométries ont été réalisées sur des échantillons de quelques centaines de grammes. Seulement 3 échantillons traduisaient un fort pourcentage d'éléments grossiers (> 2 mm). La fraction silteuse est unanimement la classe granulométrique dominante alors que les sables sont minoritaires, et la fraction argileuse très dispersée.

2. LES PROBLEMES RENCONTRES :

- *Les problèmes liés au prélèvement (Herrmann D., 1997 et Phan T.S.H., 1993):*

Des granulométries effectuées sur quelques centaines de grammes ne peuvent pas être suffisamment représentatives de l'hétérogénéité observée à la surface de la coulée. En effet, rappelons simplement que cette surface est parsemée de débris centimétriques, de clastes et de blocs pluricentimétriques, souvent déposés anarchiquement.

- *Les problèmes liés au protocole utilisé habituellement (norme AFNOR NP 94-57, annexe 6) :*

Suivant le protocole habituel, une granulométrie s'opère de la façon suivante : le tamisage se fait par voie sèche pour les sables, puis par voie humide pour les particules inférieures à 80 μm . La défloculation se fait en agitant l'échantillon dans des allonges remplies d'eau contenant quelques millilitres d'hexamétophosphate de sodium. Ce protocole est basé sur la granulométrie de grains de sables essentiellement quartzeux, qui ne subissent aucune usure tout au long des opérations (A. Rivière, 1977). Or, pour les marnes noires, ce protocole pose le problème de la désagrégation des particules soit parce qu'elles sont au contact de l'eau, soit par chocs répétés, soit par l'agitation manuelle. Ces étapes perturbatrices sont les suivantes :

- le passage des marnes noires dans l'eau qui, lors de la phase d'agitation dans les allonges, provoque la désagrégation des particules par chocs répétés et au contact de l'eau ;
- le tamisage par voie humide qui provoque la dégradation des plaquettes marneuses au contact de l'eau et par l'action manuelle (mouvements rotatifs des doigts sur la surface du tamis qui entraîne une pression sur les particules, et donc une fragmentation);
- le passage à l'étuve qui crée une alternance humectation/dessiccation, très efficace à la désagrégation des particules marneuses ;
- la granulométrie des sables, qui s'effectue dans une colonne de tamis placée sur une vibreuse, provoque une désagrégation des particules par effet de chocs répétés ;
- avant d'être soumis au sédi-graph (appareil de sédimentométrie) pour déterminer la fraction silteuse et argileuse, les fines inférieures à 50 μm nécessitent au préalable une phase importante d'agitation et de défloculation dans l'eau. Ces préliminaires peuvent de nouveau avoir un effet néfaste sur la dégradation des particules.

La morphométrie bien particulière des paillettes et des clastes marneuses peut être la cause d'une sous-estimation (ou sur-estimation ...) de certains passant. En effet, elles sont souvent de formes allongées, où la longueur peut dépasser 5 à 6 fois la largeur. ceci à la différence de A. Rivière qui considère les grains de quartz comme sphériques. Peut-on accepter une plaquette de plus de 5 cm de longueur et de 1 cm de largeur se trouvant dans le refus à 2 cm, ou doit on la considérer comme un élément supérieur à 5 cm ?

Les essais d'hydroclastie et d'altérabilité ont montré que les plaquettes marneuses se désagrègent dès les premiers cycles d'humectation/dessiccation. Or, nous venons de constater que plusieurs étapes de l'analyse granulométrique nécessitent ces alternances. Les fines sont donc exagérées.

Enfin, la norme indique que la granulométrie doit se faire sur quelques centaines de grammes. Compte tenu des hétérogénéités de surface, ne serait-il pas plus judicieux d'augmenter la taille des échantillonnages?

En prenant en compte tous ces problèmes, notre travail consiste à mettre en oeuvre une méthode permettant de réduire les actions néfastes engendrées par l'analyse granulométrique, faite en accord avec la norme, tout en intégrant l'hétérogénéité de la coulée. Les variations très fortes de la fraction argileuse sont certainement la cause du traitement suivant le protocole habituel.

3. LES PREMIERS RESULTATS D'UNE METHODE ADAPTEE:

C'est sur le terrain, à l'aide de moyens « archaïques », que deux granulométries ont été faites sur d'importantes quantités de matériaux (respectivement 81.8 kg et 179.2 kg à la teneur en eau naturelle), afin de prendre en compte l'hétérogénéité de surface.

3.1. Description de la méthode (Les différentes étapes sont reportées sur la figure 37).

- *Sur le terrain* :

Les granulométries ont été effectuées sur deux carrés (C1 et C2) du transect C. Leur état de surface est précisément décrit (figure 35). Afin de prendre en compte l'hétérogénéité de surface, ces carrés sont respectivement de 1 x 1 m pour C1 et de 0.75 x 0.75 m pour C2 (photo 20). Les matériaux sont prélevés sur une dizaine de centimètres d'épaisseur. Après pesage à l'aide d'un seau et d'un peson, ces matériaux sont étalés sur une bâche pour permettre leur séchage naturel et les conglomérats argileux sont déstructurés manuellement. Un échantillon est conservé dans un sac pour mesurer ultérieurement la teneur en eau des matériaux, et ainsi en déduire leur poids sec. Les poids humides des deux carrés sont les suivants:

- Carré C1 (1 x 1 m), 179.2 kg. Wn étant de 3.4% le poids sec est de 173.1 kg.
- Carré C2 (0.75 x 0.75 m), 81.8 kg. Wn étant de 5%, le poids sec est de 77.7 kg.

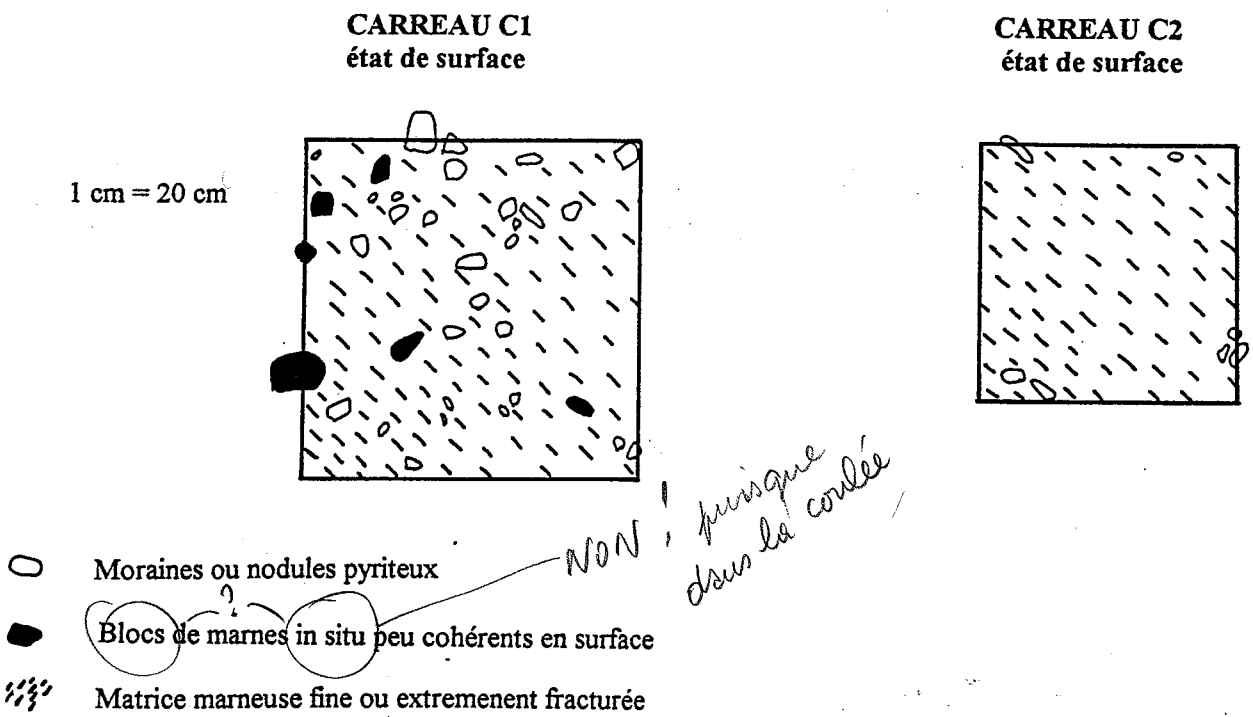


Fig 35 : Etat de surface des deux carrés.

Les fractions 12-24-50 et 100 mm sont déterminées in situ (photo 21). Les éléments supérieurs à 24 mm sont mesurés au mètre et la fraction 12 - 24 mm est déterminée à l'aide d'un tamis. Les résultats révèlent déjà pour la fraction supérieure à 12 mm 54% pour C1 et 29 % pour C2 (figure 36). Comme la quantité de matériaux inférieurs à 12 mm est grande, nous avons procédé à un quartage afin de transporter en laboratoire la quantité nécessaire et suffisante pour délimiter précisément les différentes fractions.

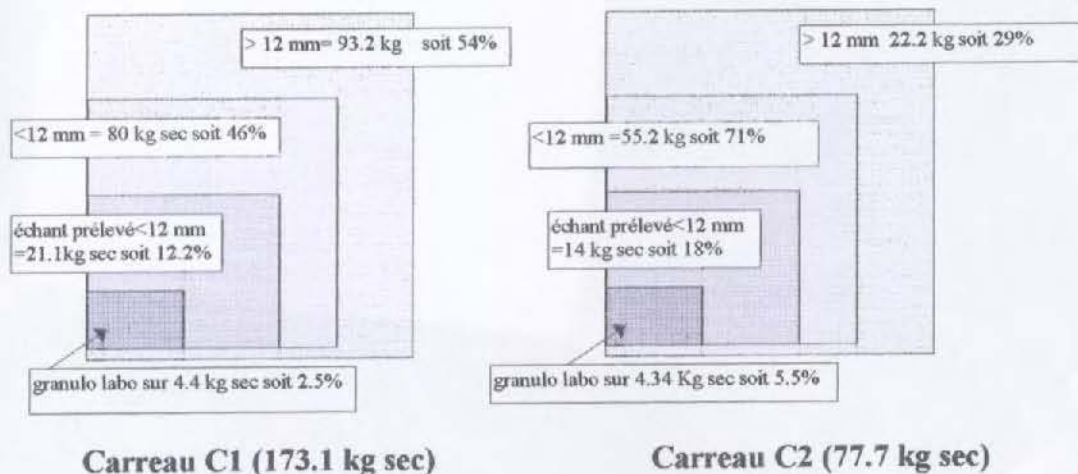


Fig 36 : Les différents prélèvements des deux carrés sur le terrains.



Photo 20 : Délimitation d'un carré de surface.



Photo 21 : Les différentes classes granulométriques déterminées sur le terrain.

• *En laboratoire :*

Un nouveau quartage sur la fraction inférieure à 12 mm est réalisé pour garder au minimum quelques kg de matériaux nécessaires à la détermination des autres classes granulométriques (4.4 kg pour C1 et 4.34 kg pour C2). L'échantillon est passé au tamis 4 mm, puis les deux classes granulométriques (< 4 mm et 4-12 mm) sont immergées dans l'eau afin de séparer les concrétions argileuses des plaquettes marneuses, sans pour autant brusquer ces dernières. La détermination de la fraction inférieure à 2 mm est faite par voie humide puis la fraction 2-12 mm est séchée à l'étuve. La fraction inférieure à 2 mm est passée par voie humide au tamis 80 μm . La fraction 80 μm -2 mm est passée à l'étuve puis dans une colonne de tamis pour déterminer les fractions sableuses.

La fraction inférieure à 80 μm est passée au Sédigraph mais les phases d'agitation et de défloculation ont été supprimées. Tous les résultats sont ramenés à l'ensemble de l'échantillon prélevé sur le terrain.

Ainsi tous défloculants, agitation dans les allonges et traitement au préalable du sédigraph sont supprimés pour empêcher au maximum la dégradation des particules marneuses, qui pourrait exagérer les fines.

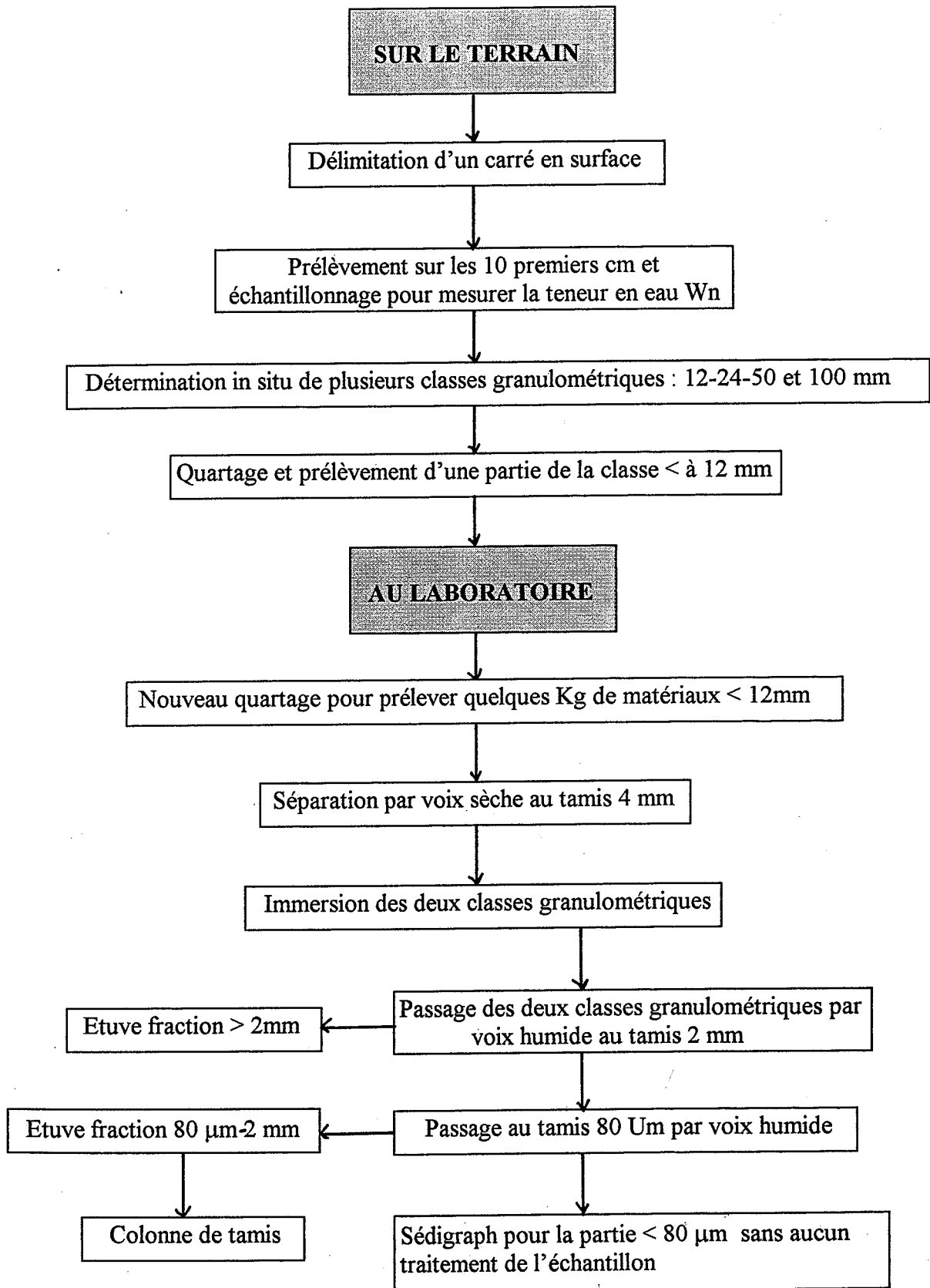


Fig 37 : Présentation des étapes de la nouvelle méthode.

3.2. Les granulométries réalisées :

En plus des granulométries C1 et C2, deux autres granulométries ont été faites, non pas à partir de prélèvements réalisés sur un carré, mais sur une quantité importante de matériaux :

- 3.880 kg secs pour les matériaux de la fosse EF2, prévus pour une limite d'Atterberg ;
- 32.035 kg secs rapportés de la fosse du transect E au mois de mai 1998.

Les courbes granulométriques sont présentées sur la figure 38.

Echantillon	Poids sec (kg)	<%20 mm	% < 2 mm	% < 80 µm	% < 50 µm	% < 2 µm
C1 surface(1x1 m)	177.1	60.5	25	15.2	14	3.7
C2 surface(0.75x0.75 m)	77.7	83	44	35	34	7.8
EF2 0.8 - 1m	3.9	100	69	59	56	14.5
2 EF2	32.0	96.3	83.8	74.7	74	13

Minimum	60.5	25	15.2	14	3.7
Moyenne	85	55.5	50	44.5	9.7
Maximum	100	83.8	74.7	74	14.5

Tableau 25: Statistiques et résultats granulométriques.

Ces résultats amènent les commentaires suivants :

- plus les poids sont importants, plus le pourcentage d'éléments grossiers est important. Les deux granulométries faites sur le transect C, donc sur les plus grandes quantités de matériaux, révèlent un pourcentage de cailloux relativement important : 40% pour C1 et 17% pour C2;

- à l'inverse, la figure 39 montre que la relation entre la masse de l'échantillon et la fraction argileuse est presque linéaire et présente une très bonne corrélation puisque $R = 0.88$. **Plus la masse consacrée à la granulométrie est grande, plus les argiles et siltes sont minorés.** Il est évident que pour que cette hypothèse soit acceptée, il faut une gamme d'échantillon beaucoup plus importante (une dizaine d'échantillons serait nécessaire pour rendre ces résultats statistiquement fiables).

- sur les quatre granulométries réalisées, la fraction argileuse inférieure à 2 µm est dispersée (de 3.7 à 14.5%). Cette dispersion pourrait être dû au faible nombre d'échantillons et à leur poids très différents. La figure 40 présente la variation de la fraction argileuse dans les terres noires selon différents auteurs. D. Herrmann (1997) expliquent la variation importante de cette fraction, en partie par l'état de l'échantillon avant traitement (plus ou moins altéré), et par le protocole suivi. Compte tenu du changement de protocole, nous obtenons effectivement une dispersion et un pourcentage moins important que ceux de D. Herrmann. Mais encore une fois, plus de résultats et d'essais permettrait une observation plus précise.

- si nous avons pu établir une corrélation entre le poids et le pourcentage des argiles, il est encore difficile à partir des quatre granulométries, malgré les observations faites sur le terrain, de déceler une dégradation des matériaux de l'amont vers l'aval de la coulée. Pour cela, il faudrait effectuer plusieurs granulométries sur une même quantité le long d'un transect, défini d'amont en aval, sur la coulée. Il semblerait tout de même, qu'entre les deux granulométries effectuées sur le transect C et les deux granulométries effectuées sur le transect E, les matériaux ont subi une désagrégation plus avancée : les éléments grossiers supérieurs au centimètre pour les granulométries du transect E n'excèdent pas 20 %.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

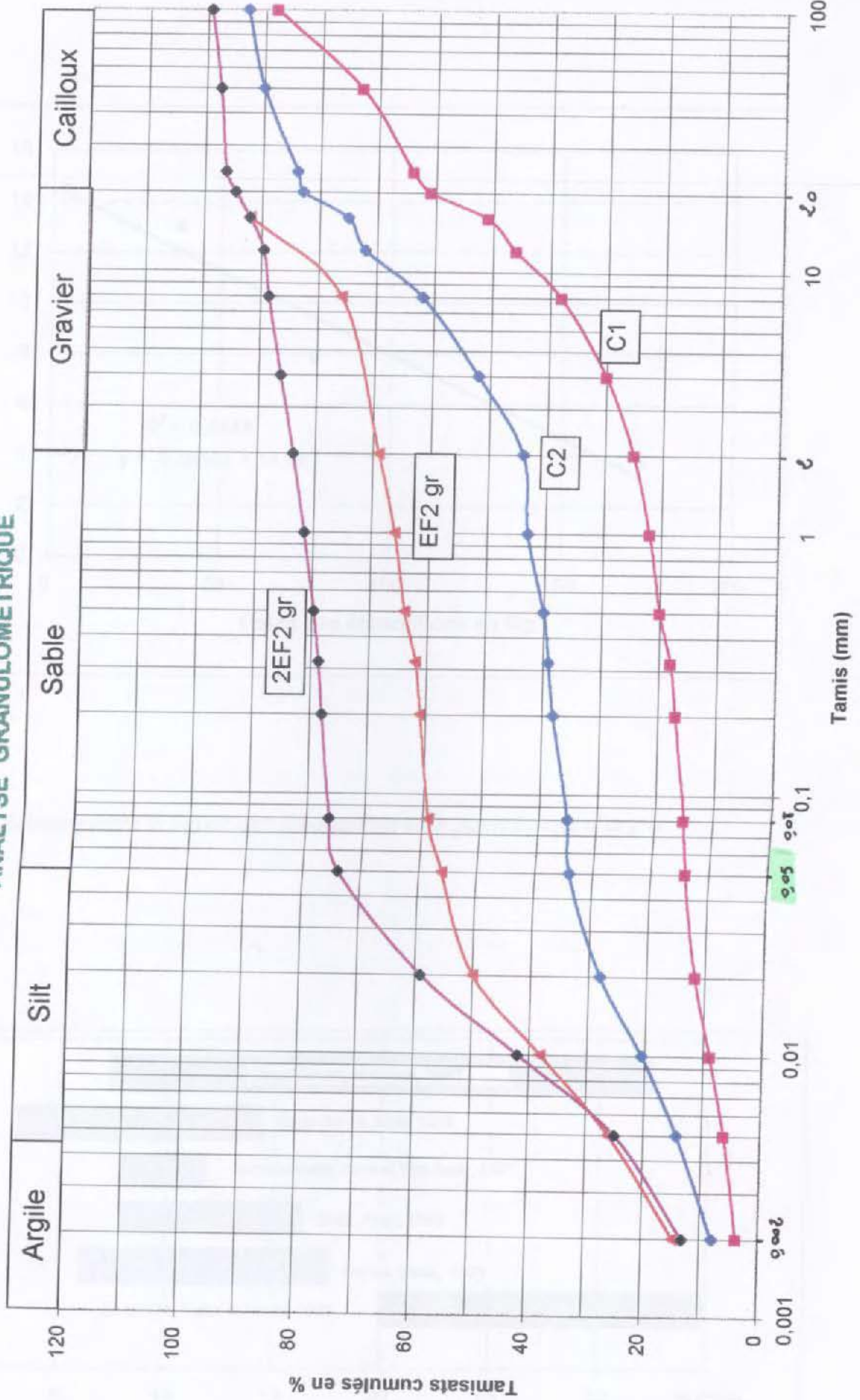


Fig 38 : Courbes granulométriques.

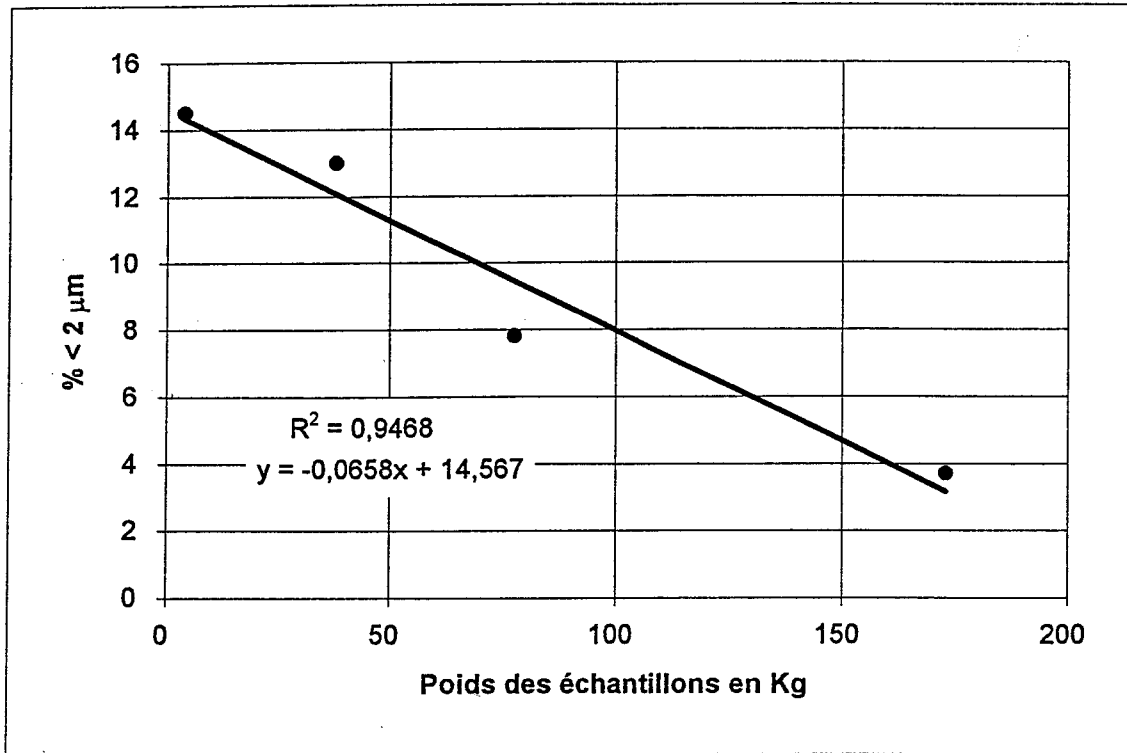


Fig 39 : Relation entre la masse des échantillons et le pourcentage d'argile.

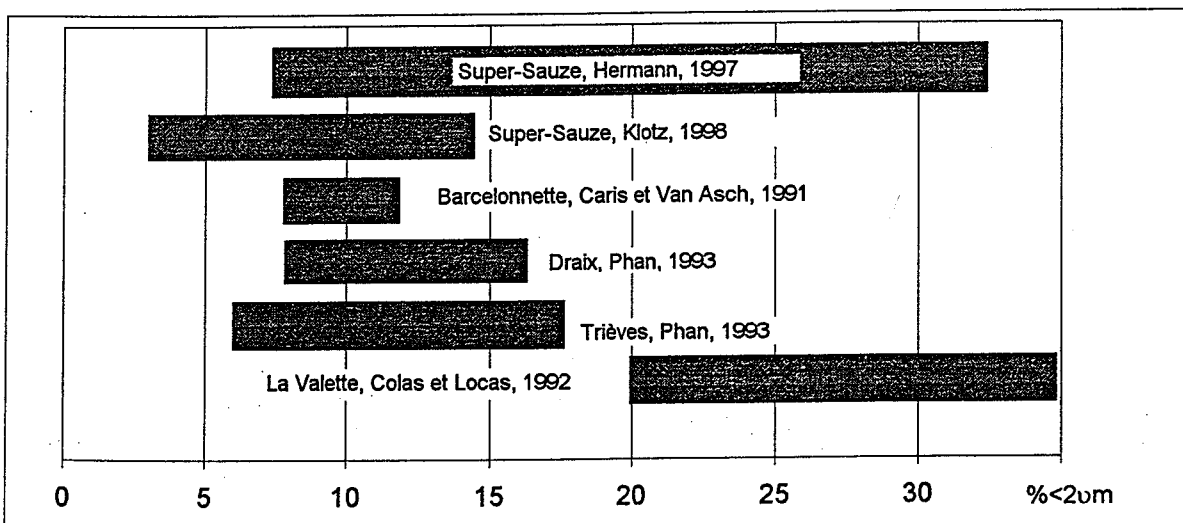


Fig 40: Variation de la fraction argileuse de quelques terres noires.

4. CONCLUSION SUR LA METHODE.

Quelques auteurs ont décrit les effets néfastes du tamisage par voie humide sur la dégradation des marnes. Paradoxalement, ils décrivent aussi une exagération des éléments plus grossiers au tamisage à sec du fait des concrétions argileuses. T.S.H. Phan, par exemple, montre que des marnes altérées peuvent libérer 80% de fines au tamisage par voie humide alors qu'elles ne libèrent que 2% par voie sèche (1993). G. Colas et J. Locat (1988), L. Descroix (1994) et A. Alexandre (1995) exposent bien le caractère agressif de l'eau sur les marnes. En effet, les expériences d'humectation/dessiccation effectuées sur des plaquettes décimétriques d'apparences cohérentes, montrent qu'elles se délitent aisément dès la première immersion.

Même si peu d'auteurs font référence à la masse des échantillons pour les granulométries, il semble plus fructueux d'effectuer des granulométries «en masse», tout du moins pour la coulée. Une grande quantité de matériaux permet de prendre en compte le spectre granulométrique total, et de ce fait, de mieux cerner la part des fines par rapport à l'hétérogénéité du milieu. Il faut tout de même énumérer les inconvénients que présente cette méthode :

- la durée du tamisage qui s'avère très longue dès que l'on dépasse les 30 kg. Les pertes peuvent être plus importantes (mais relativement négligeables par rapport à la quantité) ;
- la méthode mise en place présente encore trop de passages des matériaux par voie humide, mais il est impossible de supprimer ces phases d'humectation pour la détermination des fines ;
- le passage à l'étuve de l'échantillon, avant la granulométrie, étant supprimé, les concrétions grossières sont détruites manuellement et les restantes se disloquent dans l'eau. Le fait d'enlever le défloculant diminue certes la dégradation des plaquettes, mais occasionne une boue plus compacte et difficilement malléable au tamisage par voie humide.

Il est difficile de dire laquelle des méthodes est plus appropriée quand on a affaire à ce type de matériau. Cette méthode est prometteuse mais demande des révisions, et surtout la réalisation de plus d'échantillons afin de lui donner une valeur statistique fiable.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Il était important d'effectuer quelques essais complémentaires à ceux réalisés par D. Herrmann (1997) pour voir si les résultats étaient bien corrélés. Les teneurs en eau naturelles restent effectivement en moyenne de 13 %, et n'excèdent pas 18%. Mais il était important de préciser la nécessité d'effectuer les prélèvements à partir de pots en verres ou de carottiers métalliques, et non dans des sacs susceptibles de se percer. Les limites d'Atterberg confirment la sensibilité des terres noires. Cependant, les marnes de la coulée n'atteignent jamais la limite de liquidité (34%).

Une quantité importante de poids spécifiques a été effectuée afin d'avoir des données statistiquement fiables. Nous obtenons, en moyenne, un γ_d de 19KN/m³ et un γ_h de 21.4 KN/m³. Le problème rencontré est la variation des poids spécifiques à une même profondeur. Compte tenu de l'hétérogénéité de la coulée, le volume des carottiers dans lesquels ont été fait les prélèvements semblent trop petit (251.3 cm³ au maximum). La variation des poids spécifiques pourrait donc être diminuée en faisant les prélèvements dans des carottiers beaucoup plus volumineux.

Les variations souvent rencontrées dans les résultats des essais s'expliquent donc par l'hétérogénéité de la coulée. Il était donc important de faire un état de surface détaillé. La coulée est parsemée de blocs et de panneaux marneux qui se fragmentent très fortement avec le temps et dans l'espace, de l'amont vers l'aval et de la surface vers la profondeur, pour constituer une masse hétérogène progressivement déstructurée. Les fragments qui en résultent sont essentiellement de trois types :

- des plaquettes longues de plus de dix centimètres, larges de plusieurs centimètres et épaisses de deux à trois centimètres ;
- des frites longues de plusieurs centimètres, mais dont la largeur et l'épaisseur excèdent rarement le centimètre ;
- des paillettes centimétriques et de formes rectangulaires, mais très fines (quelques millimètres).

La fragmentation des blocs est déjà préparée par les phases d'importantes tectonisations et de décompressions, subies par les marnes noires au cours des temps géologiques. Ces blocs se désagrègent très vite sous l'action conjuguée des processus climatiques, qui sont essentiellement représentés par les alternances gel/dégel (cryoclastie) et les alternances humectation/dessiccation (hydroclastie). Ces processus climatiques sont très importants sur la coulée (près de 100 alternances gel/dégel). Le coefficient d'altérabilité des marnes noires s'avère très élevé (76.7%). Des plaquettes marneuses provenant de la coulée ont été soumises à des cycles d'humectation/dessiccation et de gel/dégel. Il a fallu, dans les deux cas, moins d'une trentaine de cycles pour désagréger ces plaquettes en un amas de débris, à condition qu'elles soient saturées en eau. **Ainsi, toutes les conditions sont réunies pour désagréger rapidement les blocs marneux en surface ou en subsurface de la coulée.**

L'hétérogénéité de surface et la vitesse de dégradation des fragments marneux ont remis en cause les analyses granulométriques faites suivant le protocole habituel. En effet, la quantité (quelques centaines de grammes) est trop peu importante pour prendre en compte cette hétérogénéité, et les phases d'agitation dans l'eau lors de la réalisation de la granulométrie, déstructurent les particules. Tout ceci a pour effet de surestimer les fines et d'engendrer une trop grande variation des résultats. Il s'avère que des granulométries faites sur plusieurs dizaines de kg prennent mieux en compte l'hétérogénéité de surface. Il est cependant plus difficile d'annuler la désagrégation des particules lors de l'essai, car les phases d'humectation sont indispensables à la détermination de certaines classes granulométriques.

Troisième Partie

**VERS DE NOUVELLES INVESTIGATIONS GEOMECANIKES EN
LABORATOIRE**

CHAPITRE I

DEGRE DE COMPACTITE ET DE COMPRESSIBILITE DES MARNES NOIRES DE LA COULEE DE SUPER-SAUZE.

1. DEGRE DE COMPACTITE DES MATERIAUX MARNEUX DE LA COULEE : L'ESSAI PROCTOR.

Le degré de compacité des matériaux de la coulée de Super-Sauze a été déterminé en effectuant deux essais Proctor. Le déroulement de ces essais s'est fait en suivant la norme NF P 94-093. Le principe de cet essai sera rappelé avant de décrire les résultats obtenus pour les marnes noires de la coulée.

1.1. Principes de l'essai (Verdoyen J., Roisin V., Nuyen J., 1968).

Défini et mis en oeuvre par l'ingénieur Proctor, l'essai se propose de mesurer la teneur en eau qui permet d'obtenir, après un compactage donné du matériau, une valeur maximale du poids spécifique sec γ_d . Il consiste à compacter dans un moule, et suivant des procédés bien définis, une série d'échantillons identiques et représentatifs du sol, et préalablement imbibés à des teneurs en eau croissantes. L'eau, qui joue un rôle de lubrifiant, favorise la mise en place et le serrage des grains. Il existe une teneur en eau qui permet d'obtenir un serrage optimal du squelette solide. Cette teneur est fonction de la surface spécifique des grains et de leur forme. Au-delà de cette teneur, le serrage optimal n'est plus obtenu : une partie de l'énergie de compactage est reprise par l'eau, d'où un mauvais rendement énergétique du compactage.

L'essai fournit donc une série de couples de valeurs (W , γ_d) que l'on porte sur un graphique orthogonal (figure 41). La courbe obtenue est appelée **diagramme Proctor**. Elle présente un maximum dont l'abscisse fournit la teneur en eau optimale recherchée : **L'optimum Proctor**.

Sur le graphique, il devra aussi figurer les courbes de saturation 80% et 100%, selon la formule suivante :

$$Sr \equiv \frac{W}{100 \text{ ou } 80 \text{ pw } (1/\rho_d - 1/\rho_s)}$$

w : teneur en eau

ρ_s : masse volumique des particules du sol (t/m^3)

ρ_d : Masse volumique du sol sec

pw : poids volumique de l'eau ($1t/m^3$)

Il est donc indispensable de calculer ρ_s .

ρ_s pour les sables : $< 2.65 t/m^3$

ρ_s pour des limons : $2.65 < \rho_s < 2.70$

ρ_s pour des argiles $> 2.70 t/m^3$

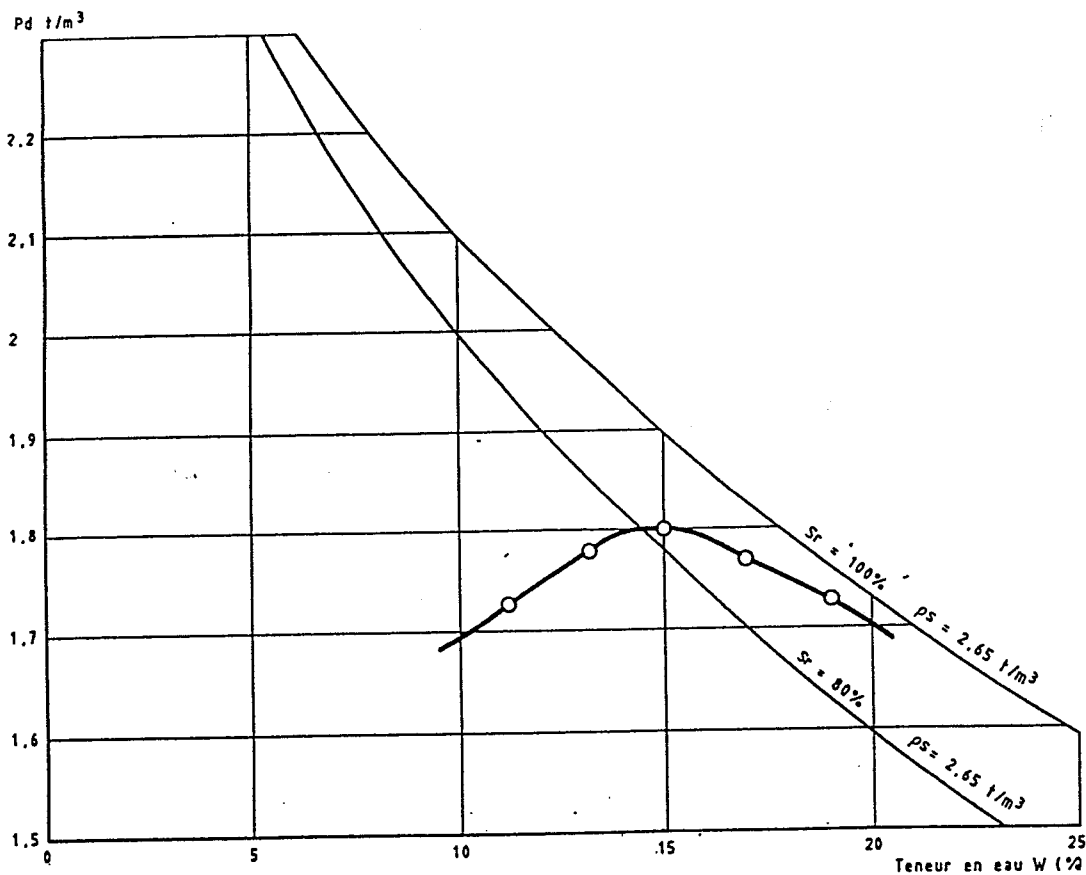


Fig 41 : Diagramme Proctor.

Il existe deux types d'essais : l'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié. La différence réside dans l'énergie de compactage mise en oeuvre et du le moule utilisé.

- *Appareillage et déroulement de l'essai.*

Deux sortes de moules normalisés peuvent être utilisés :

- *le moule Proctor CBR* : 152 mm de diamètre et autant de hauteur, soit un volume de $2758,2 \text{ cm}^3$. Le compactage des matériaux dans ce moule ne doit pas contenir des éléments supérieurs à 20 mm ;

- *le moule Proctor normal* (photo 22) : 101.5 mm de diamètre pour une hauteur de 117 mm, soit un volume de 946.7 cm^3 . Les matériaux ne doivent pas contenir d'éléments supérieurs à 5mm.

Les marnes noires de la coulée n'ont été soumises qu'à l'essai Proctor normal réalisé dans un moule Proctor normal. En effet, je ne disposais que de ce type de moule pour effectuer l'essai. Nous ne décrivons donc que cet essai mais nous verrons aussi la nécessité de soumettre, dans l'avenir, les matériaux de la coulée à l'essai Proctor dans un moule plus volumineux.

Pour l'essai Proctor normal, l'échantillon de sol est compacté en trois couches d'égales épaisseurs à l'aide d'une dame de 2.49 kg, tombant librement d'une hauteur de 305 mm, soit une énergie de 600 KN/m^3 . 25 coups sont donnés par couches (photo 23 et figure 42).

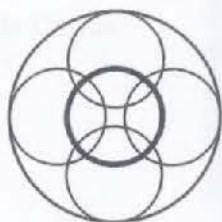
Pour l'essai Proctor normal effectué dans un moule CBR, l'échantillon de sol est compacté de la même façon et avec la même dame, mais le nombre de coups par couches est de 55.

Pour l'essai Proctor modifié, le nombre de coups ne varie pas par rapport à l'essai Proctor normal, mais le nombre de couches passe à cinq et l'énergie de compactage est plus importante : dame de 4.535kg pour une hauteur de chute de 457 mm, soit une énergie de 2700 KN/m³.

Les schémas du moule et de la dame Proctor sont présentés en annexe 7.

Le compactage de chaque couche dans le moule proctor normal se fait selon le schéma suivant :

Six fois quatre coups dans chaque quadrant + le 25e coup au centre.



3 couches de 25 coups

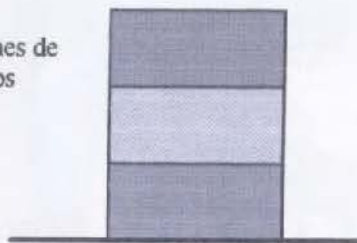


Fig 42 : Compactage de chaque couche dans le moule proctor normal.



Photo 22 : Moule Proctor normal.

Photo 23 :
Démonstration de l'essai
Proctor normal.



• *Execution de l'essai et résultats :*

Le matériau est séché à l'air puis écrêté à 5 ou 20 mm, suivant le moule utilisé, afin d'obtenir un minimum 6 kg nécessaire à la réalisation de l'essai.

Cinq compactages, à des teneurs en eau différentes, doivent être effectués au minimum. Il faut que les points expérimentaux soient répartis de part et d'autre de la teneur en eau optimale. En d'autres termes, il faut que le poids volumétrique sec de l'échantillon augmente d'abord, puis après deux ou trois compactages, qu'il diminue. En général, le premier compactage s'effectue à une teneur en eau de 4%. Les compactages suivants s'effectuent avec des teneurs en eau augmentant progressivement de 2%. Les couples de valeurs (w , γ_d) sont ensuite reportés sur le diagramme Proctor (figure 41).

Le poids du moule vide et son volume doivent être connus avant le compactage du matériau. Le compactage se fait en couches, comme il a été décrit ci-dessus. Les coups doivent être répartis sur toute la surface de la couche afin d'obtenir un compactage uniforme (Figure 42). La dernière couche doit dépasser légèrement, dans la réhausse du moule.

Une fois le compactage terminé, on enlève la réhausse puis on arase l'échantillon au niveau supérieur du moule. L'ensemble est pesé. le matériau est ensuite démoulé, et on y prélève une partie qui est mise à l'étuve afin d'avoir sa teneur en eau exacte.

Les essais proctor donnent donc des couples de valeurs (W ; γ_d). Ceux-ci seront portés sur un graphique à échelle arithmétique avec en ordonnées, les poids volumiques secs et en abscisses, les teneurs en eau.

1.2. Détermination de l'optimum Proctor normal OPN des marnes noires de la coulée de Super-Sauze.

Il a été déterminé pour les marnes noires de la coulée à partir de deux essais « proctor » normaux. Une fois l'optimum proctor déterminé, il sera intéressant de le comparer avec les poids spécifiques mesurés in situ. Cette comparaison permettra de calculer le degré de compacité des matériaux de la coulée.

1.2.1. Déroulement des essais.

Deux essais Proctor normaux ont donc été effectués à l'ENSAIS (laboratoire de mécanique des sols, animé par Mr REGENAS) sur des matériaux provenant du transect E. 8 à 10 kg de matériaux tamisés à 2 mm ont été nécessaires au déroulement de l'essai.

Le matériau marneux à été compacté dans un moule Proctor normal, et ceci en suivant les indications de la norme dont les étapes ont été résumées dans la partie 1.1 de ce chapitre. Quelques points sont cependant à préciser :

- en augmentant progressivement la teneur en eau de 2%, huit points expérimentaux ont été nécessaires pour obtenir une bonne répartition de part et d'autre de la teneur en eau optimum ;
- une fois la teneur en eau de 14% dépassée (soit la teneur en eau naturelle moyenne de la coulée), le matériau argileux marneux compacté adhère aux parois du moule. Il a donc été nécessaire de placer une feuille de papier entre la paroi du moule et le matériau, afin de faciliter son démoulage.

1.2.2. Les résultats et leurs interprétations.

Les deux courbes (figure 43) présentent les mêmes profils, les résultats sont les suivants :

essai Proctor normal 1

$W_{OPT} : 11.5 \%$
 $\gamma_{dOPN} : 19.25 \text{ KN/m}^3$

Essai Proctor normal 2

$$W_{OPT} : 12 \%$$
$$\gamma_{d_{OPN}} : 19.15 \text{ KN/m}^3$$

L'allure des courbes est relativement aplatie, ce qui est caractéristique des matériaux argileux.

Ces deux courbes sont aussi révélatrices d'un **matériau peu sensible à une variation de la teneur en eau jusqu'à son optimum Proctor**, mais dès que celui-ci est dépassé, il devient de plus en plus sensible : jusqu'à sa teneur en eau maximum de 12 %, la masse volumique augmente de 0.08 g/cm^3 en moyenne alors que de 12 à 18 %, la masse volumique a perdu 0.16 g/cm^3 .

Ces observations sont à mettre en rapport avec les indices trouvés sur les marnes noires à partir des limites d'Atterberg (Herrmann D., 1997) :

- Les limites de retrait (W_R) et les limites de plasticité (W_p) des marnes noires de la coulée de débris sont très proches (respectivement 15 et 17 % en moyenne). ceci indique que le matériau est peu sensible au retrait tout comme il est peu sensible à la variation de la teneur en eau jusqu'à W_{OPT} (12 %).
- la teneur en eau W_{OPT} est inférieure ou égale à la limite de retrait (environ 14%). **Les matériaux marneux compactés à l'optimum proctor sont dans un état proche de l'état solide, défini par les limites d'Atterberg;**

Compte tenu de la granulométrie hétérogène des marnes noires de la coulée, un moule aux dimensions plus grandes de type CBR semblerait plus approprié, car il permettrait un écrêtage à 20 mm. L'écrêtage à 2 mm est trop pénalisant. Un optimum Proctor modifié demanderait une énergie de compactage plus importante, ce qui permettrait de voir si la compactibilité du sol est améliorée au voisinage de W_{OPM} .

1.2.3. Eléments de comparaison.

Peu d'essais de compactage ont été trouvés dans la bibliographie. T.S.H. Phan, dans son essai géotechnique sur les marnes noires, (1993) a réalisé un essai Proctor normal et un essai Proctor modifié (énergie de compactage plus important) dont en voici les résultats :

$$\gamma_{d_{OPN}} : 20.9 \text{ KN/m}^3$$
$$W_{OPT} : 8.2 \%$$
$$\gamma_{d_{OPM}} : 22.5 \text{ KN/m}^3$$
$$W_{OPM} : 5.9 \%$$

Les teneurs en eau optimum de l'essai Proctor normal et de l'essai Proctor modifié révèlent des valeurs faibles pour les marnes noires, et beaucoup plus faible que les teneurs en eau naturelles moyennes du glissement de Super-Sauze (13%).

L'essai Proctor normal sur des matériaux écrêtés à 20 mm dans un moule aux plus grandes dimensions donne des valeurs W_{OPT} plus faible. L'essai Proctor modifié montre une baisse sensible de la teneur en eau optimum quand l'énergie de compactage augmente.

L'auteur a aussi réalisé un essai Proctor modifié sur des matériaux altérés par 1 cycle d'humidification/séchage. Il en résulte une légère augmentation de W_{OPM} (6.6 %) et de γ_{dOPM} (22.6 KN/m³). A lui d'en conclure que l'altération a produit plus de matériaux fins, ce qui rend le matériau plus sensibles à l'eau. C'est une importante information à mettre aussi en rapport avec les vitesses d'altération de ces marnes.

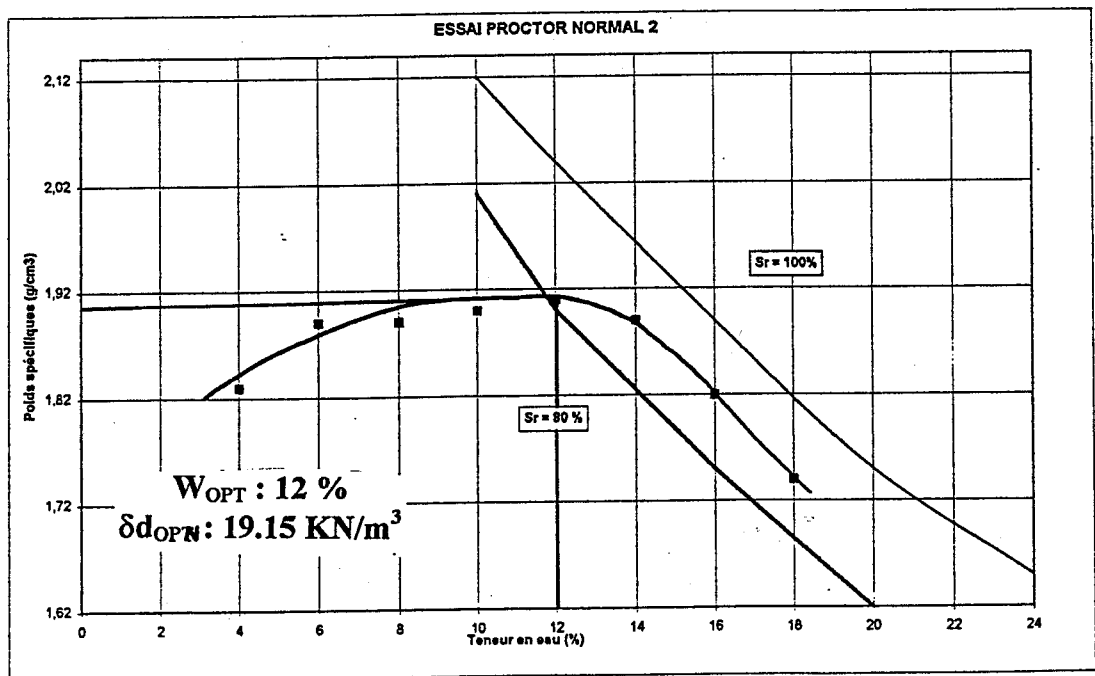
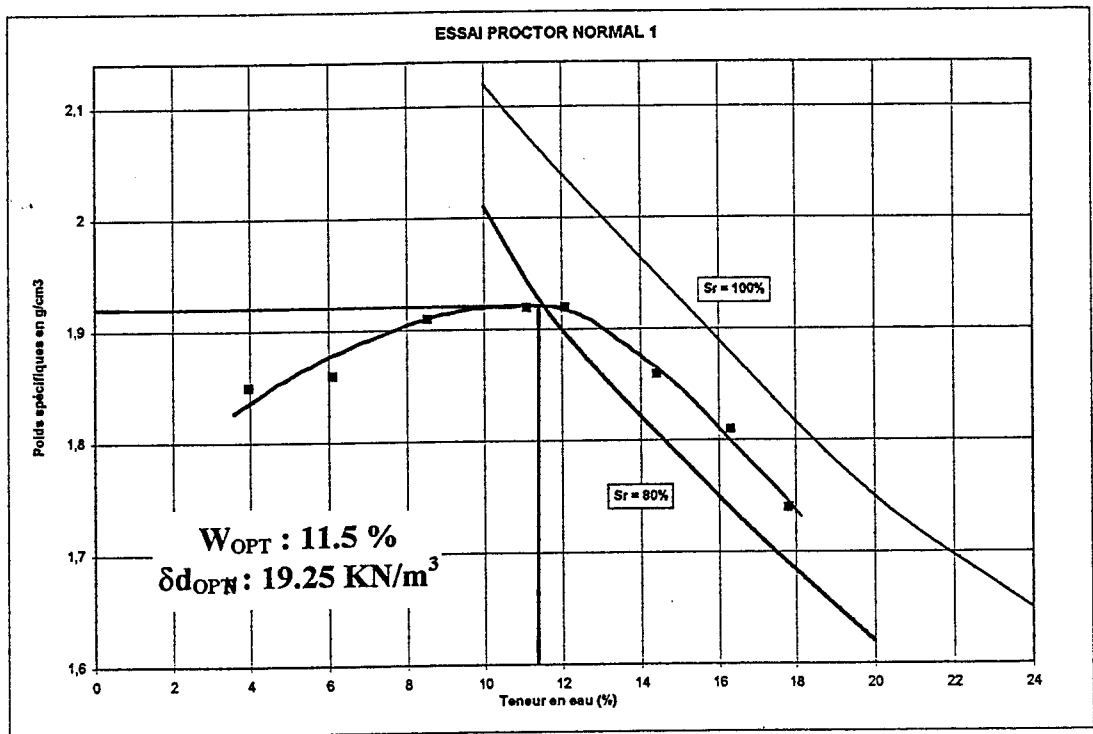


Fig 43: Courbes Proctor normal.

1.2.4. Degré de compacité des marnes noires du glissement coulée pour différents optimum Proctor.

Echantillons	Profondeur (m)	γ_h (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	WN (%)	Compacité pour différents optimum (%)		
					γ_d 19.2* (KN/m ³)	γ_d 20.9 (KN/m ³)	γ_d 22.5 (KN/m ³)
E4F1	0.30	21.4	19.1	11.8	99.5	91.4	84.9
E4F1	0.30	21.4	18.9	13.3	98.4	90.4	84
E4F1	0.50	21.7	18.8	15.5	98	90	83.3
E4F1	0.65	21.6	18.8	14.8	98	90	83.3
E4F1	0.65	22.2	19.4	14.4	101	92.8	86.2
EF2	0.30	21.8	19.6	11	102.1	93.7	87.1
EF2	0.30	20.2	17.9	12.7	93.2	85.6	79.5
EF2	0.60	21.8	19.4	12.9	101	92.8	86.2
EF2	0.60	22.1	19.6	13	102.1	93.7	87.1
EF2	1.50	21.8	18.9	15.5	98.4	90.4	84
2EF2	0.40	21.3	18.8	13.1	98	90	83.5
2EF2	0.40*	22.6	20.4	11	106.2	97.6	90.6
2EF2	0.40	22.1	19.7	12.2	102.6	94.3	87.5
2EF2	0.70	21.1	18.5	13.7	96.3	85.5	82.2
2EF2	0.70	21.3	18.7	13.6	97.4	89.5	83.1
2EF2	0.70	20.7	18.0	14.95	93.7	86.1	80
2EF2	0.90	21.3	18.6	14.2	96.9	90	82.7
2EF2	0.90	21.5	18.9	13.5	99.5	90.4	84.9
2EF2	0.90	21.0	18.4	13.7	95.8	88.0	81.8
2EF2	1.10	20.5	17.7	16.1	92.2	85.1	78.7
2EF2	1.10	21.6	19.0	14.3	99	90.9	84.4
Moyenne	0.70	21.5	19	13.5	98.5	90.3	84.1
Maximum	1.50	22.6	20.4	16.1	106.2	97.6	90.6
Minimum	0.30	20.2	17.7	11	92.2	85.1	78.7

Tableau 26 : Degré de compacité pour différents optimum Proctor.

Le tableau 26 présente le degré de compacité des marnes noires pour différents optimum :

- $\gamma_d = 19.2 \text{ KN/m}^3$ pour les marnes de Super Sauze (essai Proctor normal avec moule normal) ;
- $\gamma_d = 20.9 \text{ KN/m}^3$ pour les marnes noires préalpines, calcul de Phan, 1993 (essai Proctor normal avec moule CBR) ;
- $\gamma_d = 22.5 \text{ KN/m}^3$ pour les marnes noires préalpines, calcul de Phan, 1993 (essai Proctor modifié dans un moule CBR).

Compacité des marnes noires de la coulée de Super-Sauze en fonction de leur teneur en eau (à partir de δd OPN obtenu sur les marnes de la coulée de Super-Sauze).

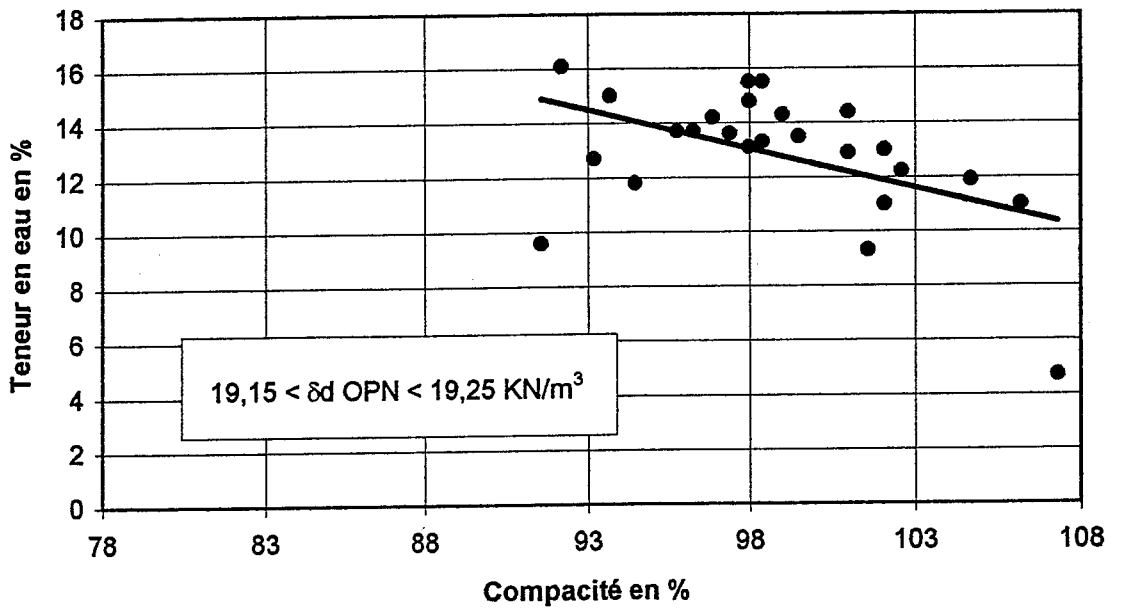


Fig 44.

Compacité des marnes noires de la coulée de Super-Sauze en fonction de leur teneur en eau. (à partir de δd OPN de Phan, 1993, sur les marnes de Barcelonnette).

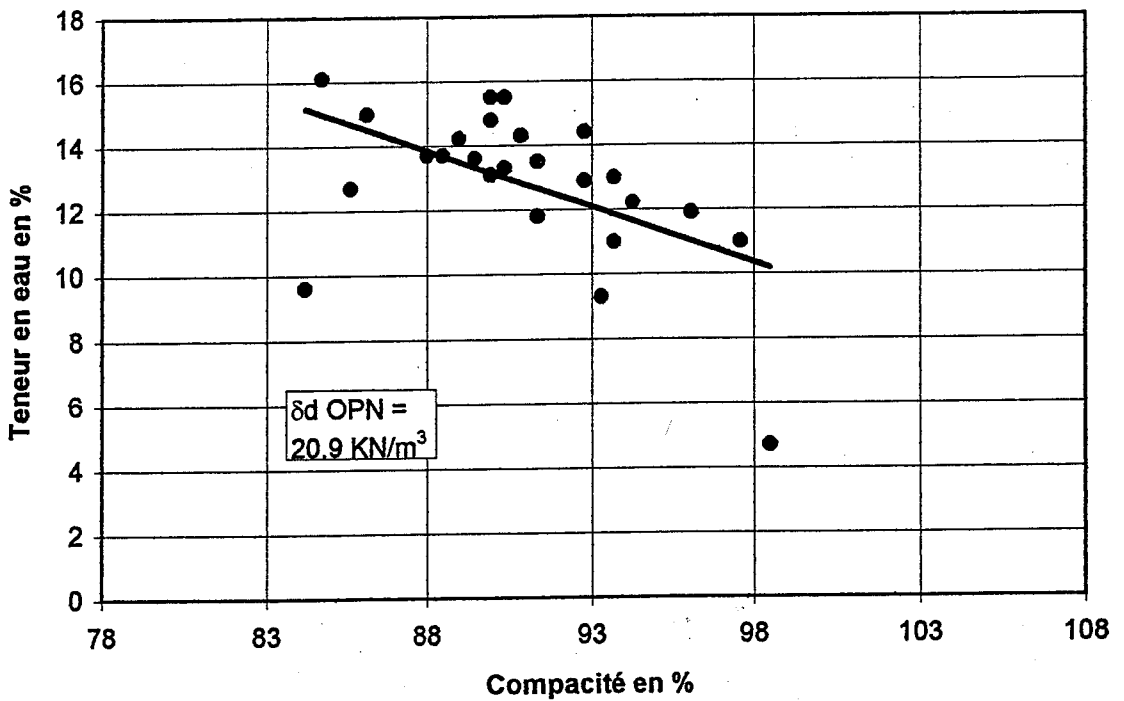


Fig 45.

Compacité des marnes noires de la coulée de Super-Sauze en fonction de leur teneur en eau (à partir de δd OPM trouvé par Phan, 1993, sur les marnes noires de Barcelonnette).

Fig 46

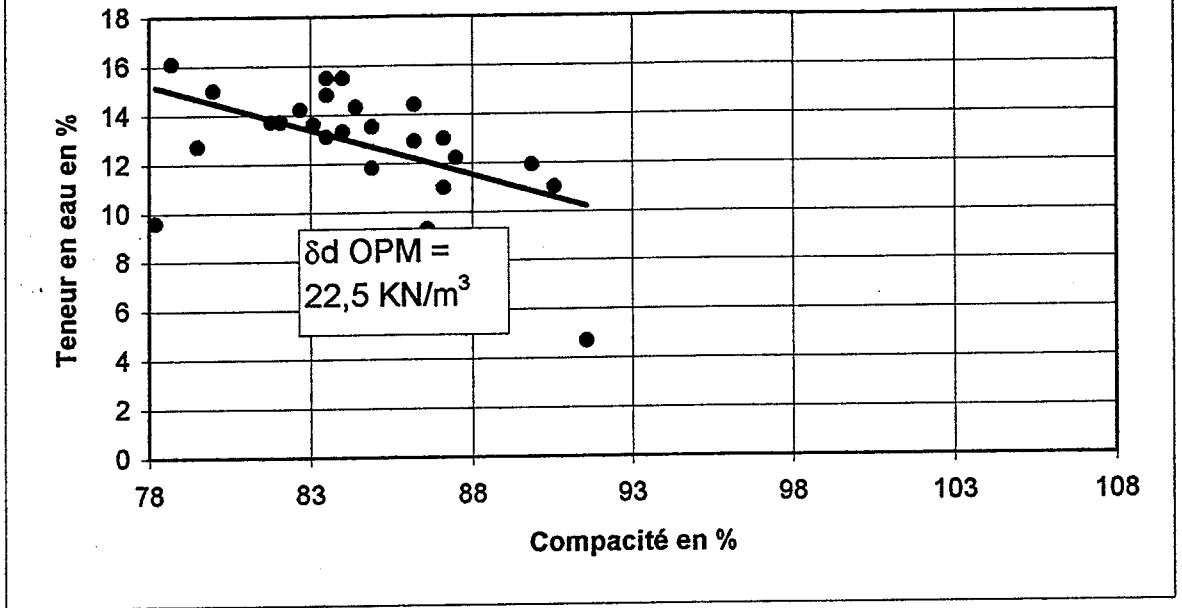


Fig 44, 45 et 46 : Rapport entre la compacité des marnes noires et la teneur en eau des échantillons.

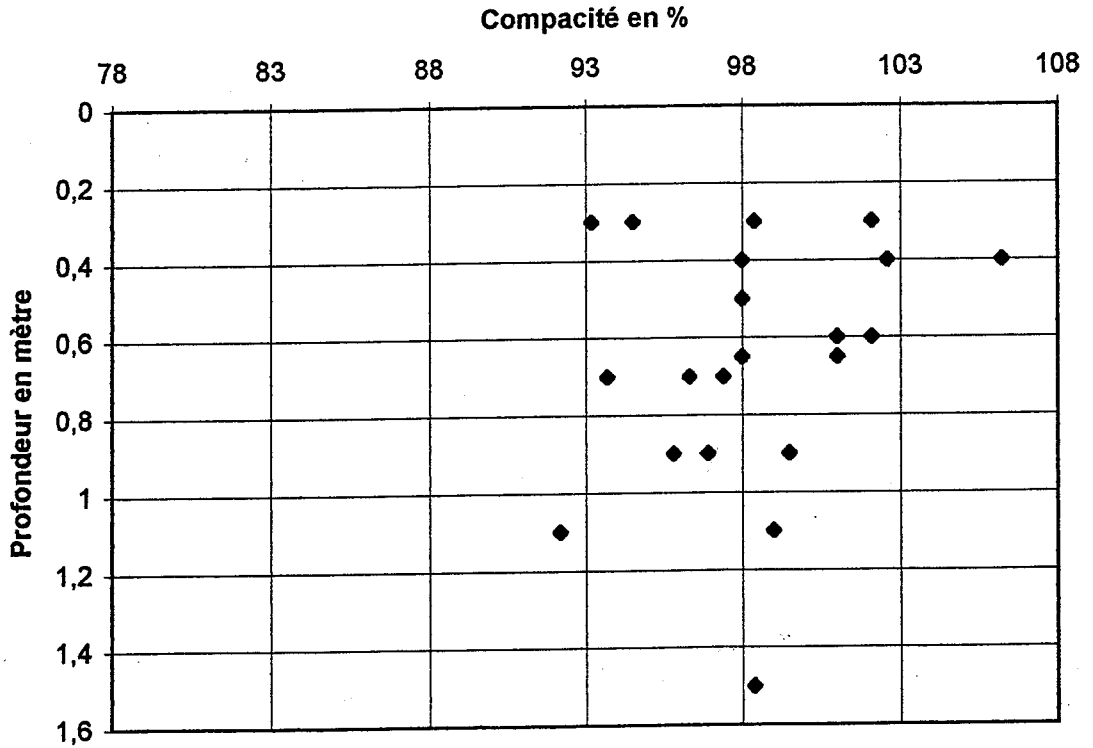


Fig 47 : Rapport entre la compacité des marnes noires et la profondeur des échantillons.

Du tableau 26 et des figures 44, 45, 46 et 47, plusieurs remarques peuvent être faites:

- la compacité est plus faible lorsque le compactage est réalisé dans un moule CBR. Elle est encore inférieure pour un essai Proctor modifié effectué dans un moule CBR ;
- les marnes noires de la coulée sont très compactes (> 80 %), et ceci quelque soit l'optimum choisi.;
- la compacité est en moyenne de 100 % quand $\gamma_d = 19.2 \text{ KN/m}^3$. La corrélation entre la teneur en eau moyenne des échantillons (12%) et W_{OPT} est très bonne ;
- aucune corrélation entre la profondeur et la compacité peut être mise en évidence, la dispersion est trop grande.

Echantillons	Profondeur (m)	γ_h (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	WN (%)	Compacité pour différents optimum (%)		
					$\gamma_d 19.2^*$ (KN/m ³)	$\gamma_d 20.9$ (KN/m ³)	$\gamma_d 22.5$ (KN/m ³)
BV4	0.50	22.4	20.1	11.9	104.7	96.1	89.9
IC1	Surface	19.3	17.6	9.6	91.6	84.2	78.2
TB2	Surface	21.4	19.5	9.3	101.6	93.3	86.6
TB3	Surface	21.6	20.6	4.7	107.3	98.5	91.6

Tableau 27 : Calcul avec les résultats de D. Herrmann (1997).

• Conclusions

W_{OPT} et γ_{dOPN} sont respectivement en moyenne de 12 % et de 19.2 KN/m^3 . Ces résultats sont bien corrélés avec les limites d'Atterberg puisqu'elles indiquent que le matériau est peu sensible au retrait.

L'essai Proctor normal effectué dans un moule Proctor normal ne donne donc pas des résultats très satisfaisants, car les compacités sont parfois supérieures à 100% et les éléments grossiers ne sont pas pris en compte (écrêtage à 2 mm). Les essais effectués par T.S.H. Phan dans un moule plus volumineux (de type CBR) semblent mieux correspondre à ce type de terrain car les éléments grossiers sont pris en compte (écrêtage à 20 mm au lieu de 2 mm). Les résultats de cet auteur ont été repris pour calculer le degré de compacité des marnes noires de la coulée. La compacité reste très élevée mais elle est minorée (80 à 90 %). Cependant, ces valeurs élevées de compacité corréleront bien avec les observations faites sur le terrain lors du creusement des fosses sur le transect E (les fosses sont décrites dans la première partie). En effet le sol était compact et collant autour de 1 mètre de profondeur. Or, à cette profondeur, les teneurs en eau sont de 12 à 14%, ce qui correspond à W_{OPT} .

Dans l'avenir, afin de ne pas omettre l'influence des éléments grossiers, il serait plus approprié d'effectuer des essais proctor dans un moule CBR, comme l'a fait T.S.H. Phan (1993).

2. LA COMPRESSIBILITE DES MARNES NOIRES : L'ESSAI OEDOMETRIQUE.

L'essai oedométrique permet de connaître la compressibilité des sols, il est donc en rapport direct avec la consolidation. Il permet d'évaluer les tassements des sols sous une certaine charge et leur évolution dans le temps. Avant d'en voir les applications pour les marnes noires, il est nécessaire de rappeler quelques généralités sur la compressibilité des sols.

2.1. Rappel de quelques notions indispensables sur la compression des sols.

2.1.1. La constitution d'un sol.

Un sol est constitué d'eau, d'air et d'éléments solides en proportions variables suivant sa nature.

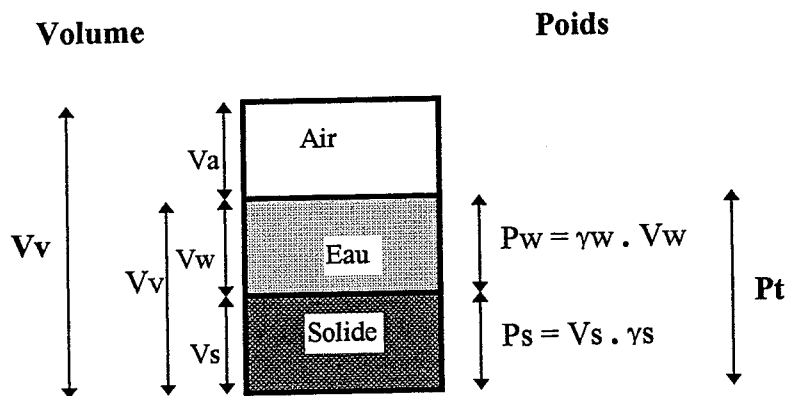


Figure 48 : Représentation de la constitution d'un sol.

Un échantillon de volume V est donc la somme du volume d'air V_a , du volume d'eau V_w et du volume de solide V_s .

Son poids P_t est la somme du poids de l'eau P_w et du poids du solide P_s , en sachant que :

$$P_w = \gamma_w \cdot V_w \quad \text{où } \gamma_w \text{ est la densité réelle de l'eau soit } 1 \text{ gr/cm}^3.$$

$$P_s = V_s \cdot \gamma_s \quad \text{où } \gamma_s \text{ est la densité réelle du solide en } \text{gr/cm}^3.$$

De cette constitution, peut être déduite une notion essentielle pour la compression : **l'indice des vides (e) et la porosité (n)**

$$e = V_v / V_s$$

où : V_v est le volume des vides ($V_a + V_w$);
 V_s le volume du solide.

$$n = V_v / V$$

où : V est le volume total de l'échantillon.

A titre d'exemple, l'indices des vides des argiles est de l'ordre de 0.5 et celui des tourbes peut atteindre 12.

2.1.2. La consolidation d'un sol.

« La consolidation est le phénomène de réduction de volume d'une couche de sol saturée sous l'action d'une contrainte normale » (Philipponnat G., 1987).

Lorsqu'un sol fin est soumis à une charge, celle-ci est supportée initialement par l'eau interstitielle (eau libre qui occupe les interstices du sol), car elle est incompressible en comparaison de la structure solide du sol.

L'eau interstitielle en surpression est chassée plus ou moins rapidement suivant la perméabilité du sol (qui peut être mesurée en laboratoire).

Peu à peu la charge est supportée par le squelette solide. Ce processus est accompagné d'un changement de volume du sol qui est approximativement égal au volume de l'eau drainé.

C'est l'ensemble de ces phénomènes que l'on désigne par consolidation.

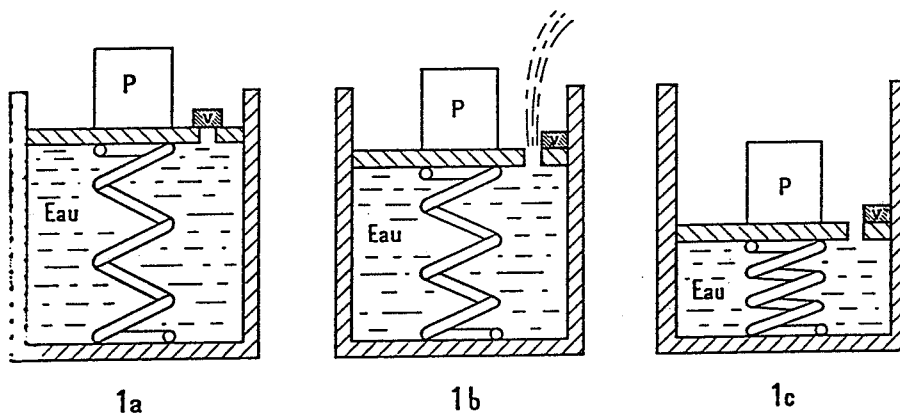


Fig 49 : Processus de consolidation.

- 1a : surpression supportée par la pression interstitielle ;
- 1b : perméabilité, évacuation de l'eau ;
- 1c : nouvel équilibre.

2.2. La compressibilité des marnes noires : essai oedométrique.

Deux essais oedométriques ont été effectués sur les marnes noires de la coulée de Super-Sauze, afin de vérifier leur état de compacité. Ils ont été réalisés en suivant le mode opératoire MS. L2, 1970. Avant de présenter les résultats, faisons un bref rappel du déroulement de l'essai.

2.2.1. Principe de l'essai (mode opératoire).

L'essai oedométrique a pour objet d'étudier la consolidation d'échantillons intacts ou remaniés, soumis à des charges verticales σ' , drainés suivant cette direction et maintenus latéralement par une paroi rigide.

L'essai s'effectue en plaçant un échantillon de diamètre et de hauteur connues dans un moule oedométrique dit de Terzaghi (photo 24). Le schéma de ce moule est présenté en annexe 8. Celui-ci est placé sur un bâti oedométrique prévu à cet effet, où des charges successives vont transmettre l'effort à l'échantillon (Photo 25).



Photo 24 : Moule oedométrique.

Photo 25 :
Bâti oedométrique.



La saturation de l'échantillon est importante car, «tout défaut de saturation se traduira d'abord par un tassement dû à la compressibilité de l'air». Ce phénomène modifiera la loi de tassement en fonction du temps, en particulier au début de l'essai. Par ailleurs, on sait que la perméabilité varie en fonction du degré de saturation. Une saturation imparfaite pourra donc affecter les valeurs du coefficient de consolidation, surtout pour de faibles charges (Mieussens G, Magnan J.P., Soyez B, 1985).

• *Les charges successives :*

Elles sont à appliquer toutes les 24 heures, et définies de la façon suivante :

- pour les sols peu compressibles : $\sigma' = 0.25 - 0.5 - 1 - 2 - 4 - 8 - (16)$ bars ;
- pour les sols compressibles tel que les tourbes : $\sigma' = 0.05 - 0.1 - 0.25 - 1 - 2 - (4)$ bars.

Après chaque chargement, des lectures sur deux comparateurs mesurant la consolidation au 1/100e de mm doivent être faites selon un pas de temps régulier, afin de permettre la construction de la courbe de tassement effort-déformation :

6s; 15s; 30s; 1mn; 2mn; 4mn; 8mn; 15mn; 30mn; 60mn; 1h; 2h; 4h; 8h; 24h.

Le déchargement, une fois la dernière charge appliquée consiste à revenir à une pression de 2 bars puis de 0.1 bar 24 heures après. Une seule lecture se fait par période de 24 heures.

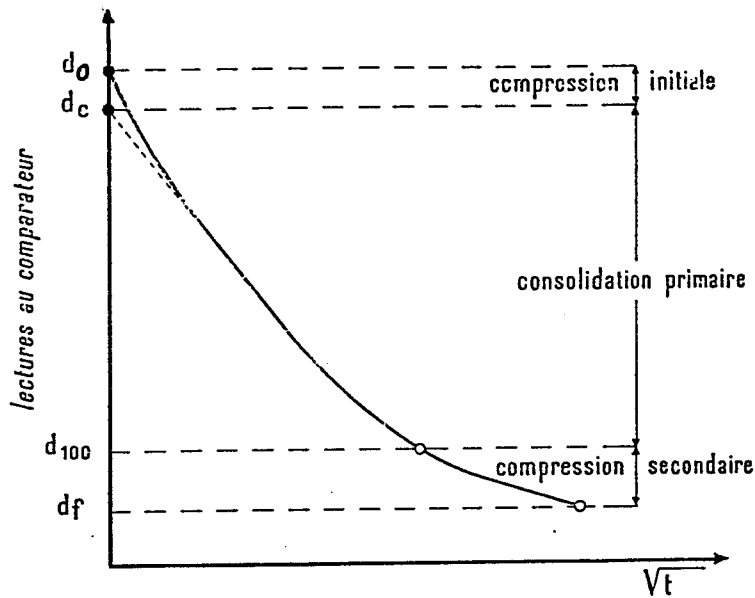


Fig 50 : Déformations en fonction de la racine carrée des temps, pour un effort donné.

La *compression initiale* correspond à une compression de l'air résiduel, à une déformation du squelette solide, ou à une erreur d'appareillage.

La *compression primaire* est l'élimination de l'excès de pression interstitielle par drainage de l'eau. C'est le tassement le plus important.

La *compression secondaire* est le fluage plastique sans pression interstitielle, parce que très lent et dû probablement à un ajustement graduel de la structure du sol.

De cette courbe, il sera calculé le coefficient C_v . Il permet de déterminer les temps de consolidation sous une charge donnée. Il est calculé suivant la méthode de la racine carrée présentée sur la figure 51.

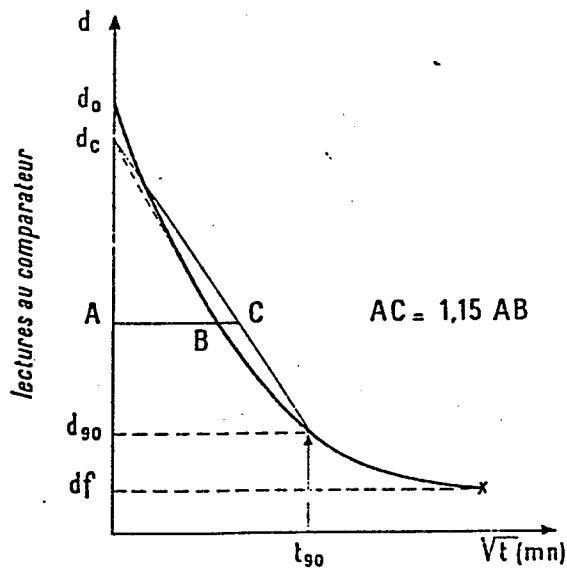


Fig 51 : Méthode de la racine carrée.

Ceci permet d'obtenir t_{90} et de calculer C_v :

$$C_v = \frac{0.848 \cdot h^2/4}{t_{90}}$$

Le coefficient de perméabilité k peut en être déduit :

$$k = \frac{C_v \cdot a_v \cdot \gamma_w}{1 + e}$$

a_v est un coefficient déduit de la consolidation = $0.435 C_c / \sigma'$;

γ_w est le poids spécifique de l'eau ;

e est l'indice des vides.

- De cette essai d'autres indices doivent être calculés :

La hauteur de solide équivalente, ou hauteur des pleins, est la quantité constante au cours de l'essai.

$$h_p = W_s / G \cdot \gamma_w \cdot s$$

W_s = poids sec du solide après passage à l'étuve.

G = densité relative du solide qu'il faut mesurer.

$\gamma_w = 1\text{g/cm}^3$ (poids spécifique de l'eau).

L'indice des vides :

$$e = \frac{h - h_p}{h_p}$$

h est la hauteur de l'éprouvette à un moment donné.

- La pression de préconsolidation σ'_c .

σ'_c est la plus grande pression effective à laquelle a été soumise l'échantillon de sol au cours de son histoire.

- si $\sigma'_c = \sigma'_0$ (pression effective supportée par le sol en place), le sol est normalement consolidé ;
- si $\sigma'_c > \sigma'_0$, le sol est surconsolidé ;
- si $\sigma'_c < \sigma'_0$, le sol est sous consolidé.

- Construction et indice de la courbe de compressibilité :

C'est la courbe $e ; \log \sigma'$ où e est l'indice des vides et σ' est la pression effective. La courbe présente le plus souvent une partie droite horizontale, suivie d'une partie courbe, puis de nouveau d'une partie généralement droite et inclinée. C'est de cette droite que va être déduit l'indice de compression C_c qui est sa pente.

$$C_c = \Delta e / \Delta(\log_{10} \sigma')$$

C'_c est l'indice de compression de la courbe de décompression.

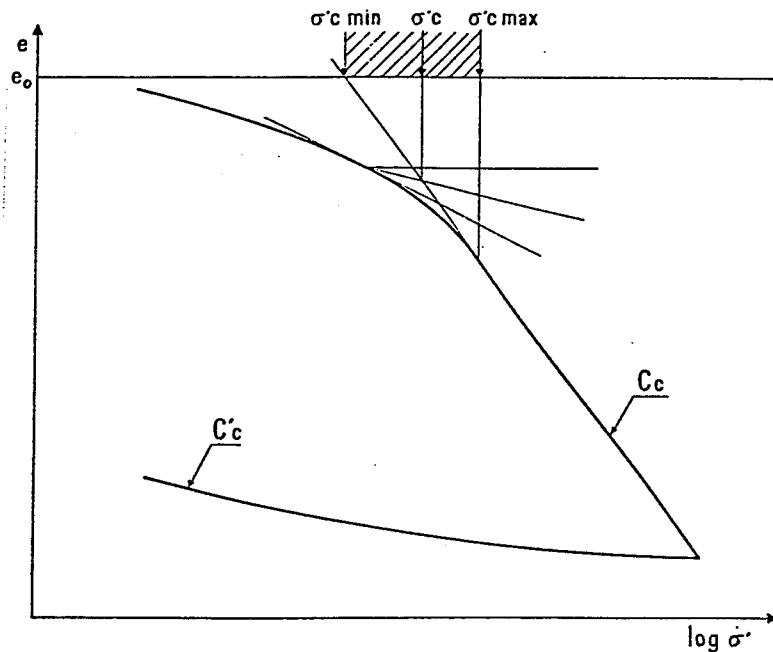


Fig 52: Courbe de compressibilité et construction de σ'_c .

Les valeurs C_c donnent les appréciations suivantes :

$C_c < 0.020$	sols incompressibles
$0.020 < C_c < 0.050$	sols très peu compressibles
$0.050 < C_c < 0.100$	sols peu compressibles
$0.100 < C_c < 0.200$	sols moyennement compressibles
$0.200 < C_c < 0.300$	sols assez fortement compressibles
$0.300 < C_c < 0.500$	sols très compressibles
$C_c > 0.500$	sols extrêmement compressibles

Nota : Les essais oedométriques se font sur une durée s'étalant sur plusieurs semaines. Un enregistrement automatique des déformations aurait certainement amélioré la qualité des résultats car comme le fait remarquer C Mieussens, J.P Magnan et B Soyez (1985), un enregistrement permet :

- une meilleure concomitance entre la mesure du temps et celle du tassement ;
- de multiplier les mesures en début d'essai, indispensable pour bien différencier la consolidation immédiate de la consolidation primaire ;
- de lancer l'essai oedométrique à tout moment ;
- de ne pas perdre certaines mesures (week-ends, jours fériés).

Les deux essais oedométriques par paliers ont été suivis selon le mode opératoire MS. L2, 1970. Des améliorations ont été apportées notamment dans la détermination de σ'_c . L'essai le plus courant consiste à faire subir à l'échantillon des chargements successifs jusqu'à une pression définie, puis de le décharger. Afin d'améliorer l'ajustement de la droite déterminant σ'_c , dès que la surconsolidation commence à apparaître, le déchargement doit s'effectuer et une fois le cycle terminé, il faut reprendre le chargement jusqu'à la charge finale. Un exemple est présenté ci dessous.

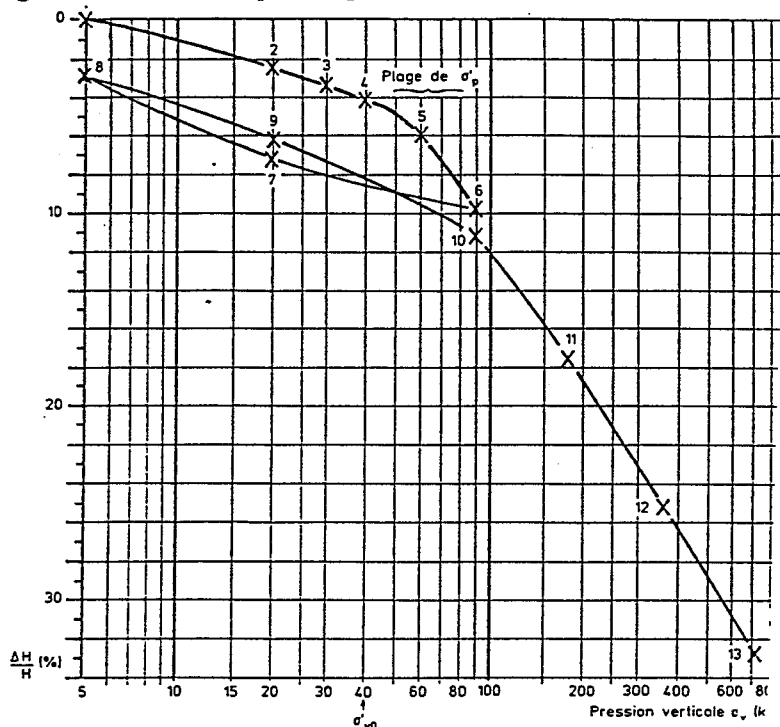


Figure 53 : Courbe de tassement améliorée.

Il s'agit maintenant de voir l'état de compressibilité des marnes noires de la coulée de Super-Sauze.

2.2.2. Mise en place des échantillons.

Ce fut une opportunité de pouvoir réaliser deux essais oedométriques à charges successives au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg, à la section mécanique des sols, dirigée par M. URSAT). Les échantillons soumis à cet essai sont :

- E4F1 0.80 m de profondeur avec une teneur en eau WN de 15.4 % ;
- EF2 1.40 m de profondeur avec une teneur en eau de 15.5 %.

L'essai s'est déroulé suivant les indications du mode opératoire, dont les différentes étapes sont décrites dans la partie 2.2.1 de ce chapitre. La norme stipule que les échantillons ne doivent pas comporter d'éléments grossiers supérieurs à 5 mm, pouvant interférer le tassement. A la fin de l'essai, la découpe des échantillons a avéré la présence de paillettes marneuses de cet ordre de grandeur, mais nous ne répéterons jamais assez que les prélèvements homogènes dans le corps de la coulée est difficile.

Les charges retenues sont celles des sols peu compressibles soit 0.31 - 0.57 - 1.09 - 2 - 3.95 et 7.85 bars. La hauteur de l'éprouvette dans le moule est de 24 mm pour un diamètre de 70 mm. Les courbes de compressibilité sont présentées sur les figures 54 et 55. Les procès verbaux sont en annexe 8.

Courbe de compressibilité : E4F1 0,80 m

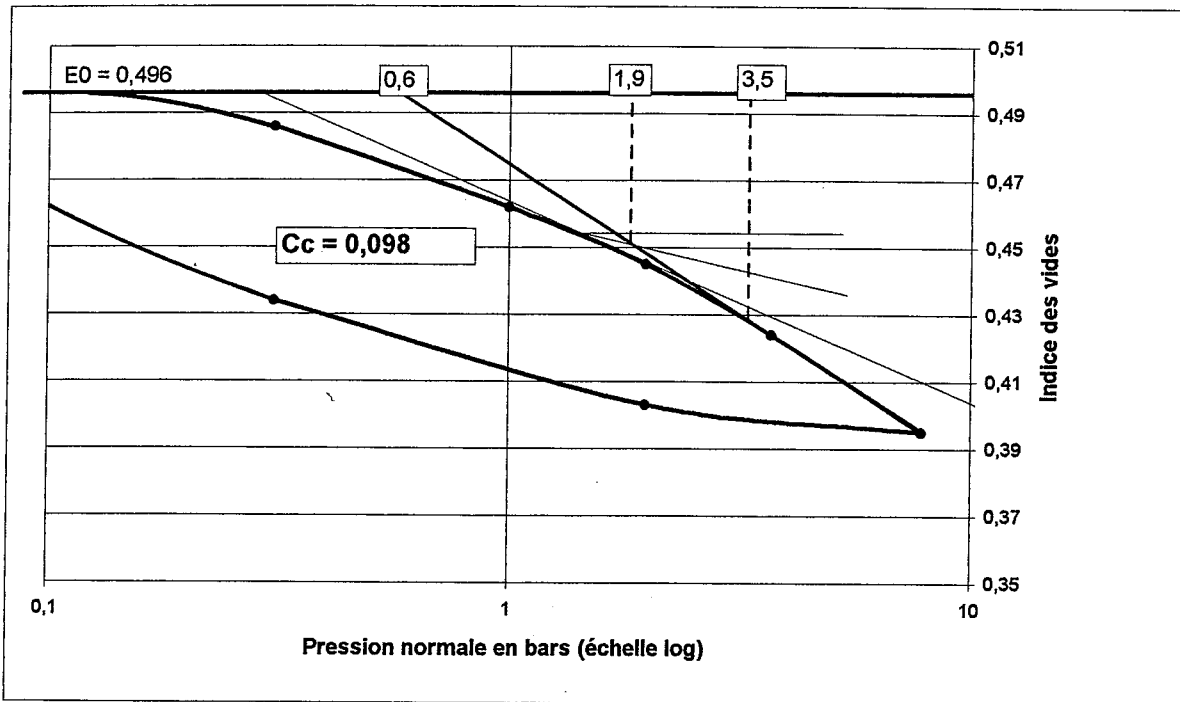


Fig 54 : Courbe de compressibilité : E4F1 0.80 m.

Courbe de compressibilité : EF2 1,40 mm

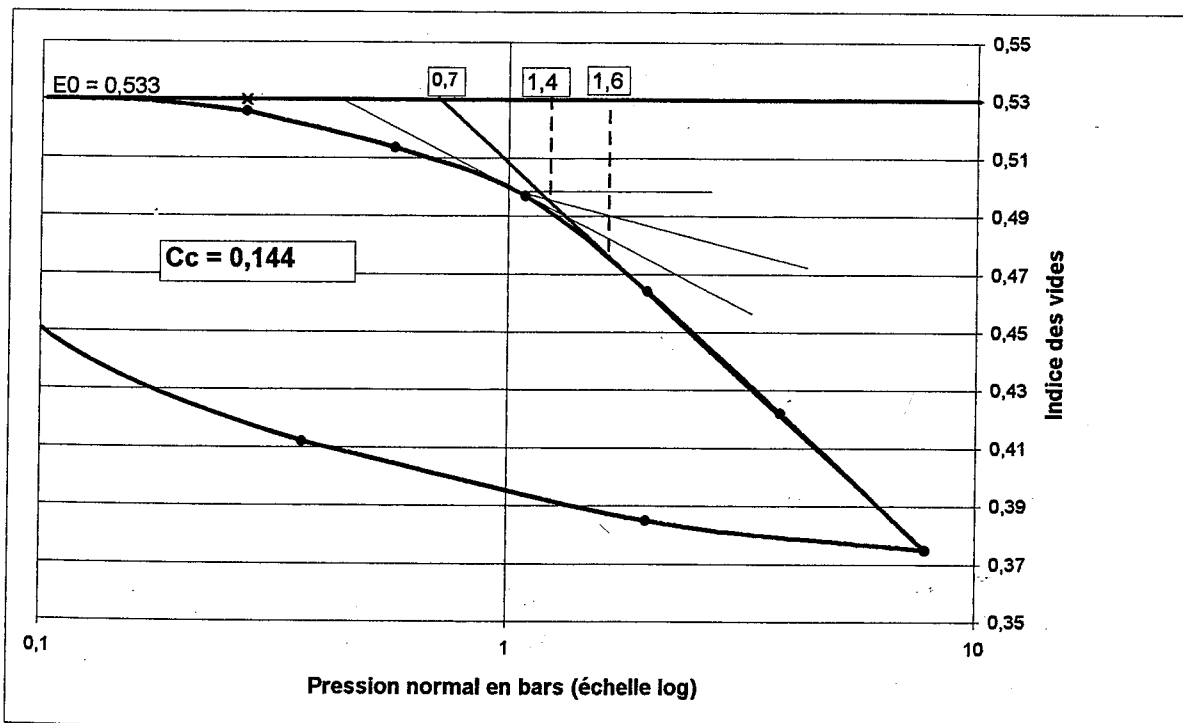


Fig 55 : Courbe de compressibilité EF2 1.40 m.

2.2.3. Interprétation des résultats.

* Les indices de compression C_c .

- pour E4F1, $C_c = 0.098$; ce qui correspond à un sol peu compressible ;
- pour EF2, $C_c = 1.4$; ce qui correspond à un sol moyennement compressible.

Tout comme le degré de compacité, déduit des essais proctor, les indices de compression indiquent que **les marnes noires semblent se trouver dans un état de compacité bien avancé.**

* L'indice des vides initial e_0 .

- pour E4F1 0.80 m $e_0 = 0.496$;
- pour EF2 1.40 m $e_0 = 0.533$.

Ils indiquent que le matériau est caractéristique des sols peu compressibles et argileux.

* Les tassements.

Les tassements permettent de vérifier l'état de consolidation des marnes noires. Pour cela, il suffit de comparer la pression actuelle σ'_0 supportée par les deux échantillons lors du prélèvement, et la pression effective théorique σ'_c supportée par les deux échantillons au cours de leur histoire.

Si on considère que le poids spécifique des marnes noires est en moyenne de 20 KN/m^3 , cela signifie qu'une marne se trouvant à 1 mètre de profondeur, subit une pression de :

$$20 \text{ KN/m}^3 \cdot 1,00 \text{ m} ; \text{ soit } 20 \text{ Kpa,}$$

Les deux échantillons ont été prélevés respectivement à une profondeur de 0.80 m et 1.40 m soit une pression actuelle σ'_0 de :

$$\begin{aligned} 20 \text{ KN/m}^3 \cdot 0.80 \text{ m} &= 16 \text{ kpa pour E4F1 } 0.80 \text{ m} \\ 20 \text{ KN/m}^3 \cdot 1.40 \text{ m} &= 28 \text{ kpa pour EF2 } 1.40 \text{ m} \end{aligned}$$

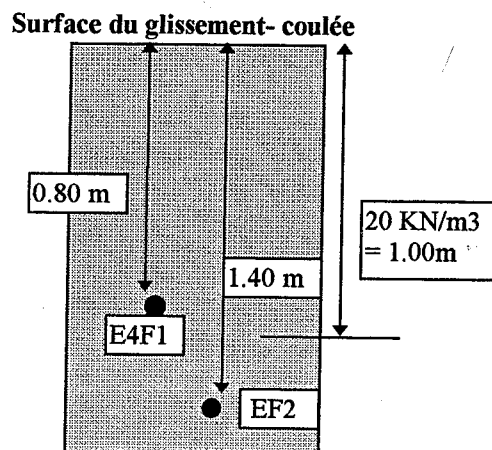


Fig 56: Pression actuelle σ'_0 supportée par les deux échantillons en place.

Les courbes des essais oedométriques donnent une pression effective théorique σ'_c de :

190 kpa pour E4F1 0.80 m

140 kpa pour EF2 1.40 m

$\sigma'_c > \sigma'_0$ ce qui signifie que les deux échantillons sont dans un état de surconsolidation. Donc les marnes noires ont subi, au cours de leur histoire, une compaction plus importante que celle subie actuellement, soit l'équivalent d'une surcharge qui correspondrait à une colonne de 7 à 10 mètres de matériaux. Ceci montre le caractère évolutif de ces matériaux (cette surcharge a pu être atteinte dans le corps de la coulée ...)

Les courbes de tassements jointes en annexe 8 présentent toutes un aspect général commun où les 3 phases de consolidation sont bien distinctes :

- une phase de consolidation immédiate toujours bien marquée, qui est certainement la conséquence d'un réarrangement des grains ;
- une phase de consolidation primaire, toujours importante à cause de la saturation car elle correspond à la mise en pression de l'eau interstitielle, qui s'écoule peu à peu vers les limites drainantes ;
- une phase de consolidation secondaire qui correspond à un fluage plastique, et où la structure du sol s'ajuste. Au bout de 24 heures ce fluage continue. C'est sous des pressions de 4 à 8 bars que les tassements sont les plus importants, ce qui correspond à l'effondrement structural.

2.2.4. Quelques éléments de comparaison.

F. Blanchet (1988) a effectué deux essais oedométriques sur des échantillons prélevés à 25 et 44 m de profondeur dans les argiles litées du Trièves. Les résultats sont les suivants :

Profondeur	σ'_0 (kpa)	σ'_c (kpa)
25.50 m	255	70-284
44,00 m	440	75

Aucune surconsolidation n'est mise en évidence et F. Blanchet explique ce phénomène par le fait que les matériaux peuvent «oublier» une partie du chemin de contrainte subi au cours de son histoire.

T.S.H. Phan (1993) a effectué des essais de tassements et de gonflements à partir de moules oedométriques pour « connaître l'influence d'une variation ultérieure de la teneur en eau sur les caractéristiques mécaniques des terres noires ». Ces essais ont été fait sur des échantillons remaniés, tamisés à 2 mm et tassés à l'optimum proctor modifié grâce à une machine à compression. L'auteur estime que les paramètres souvent utilisés dans ce type d'essai tel que le coefficient de consolidation C_v , l'indice de compression C_c ..., sont inadaptés dans de telles conditions.

Ce qui est essentiel à retenir de ces essais, c'est le tassement immédiat important à toutes les charges. Les gonflements apparaissent à de faibles charges (6 % à charge nulle) et ceci jusqu'à un maximum de 220 Kpa; au-dessus débute le tassement.

- *Conclusion*

Lors du creusement des fosses CF, EF2 et E4F1, nous avons constaté que le sol présentait plusieurs aspects. Autour de 1 mètre de profondeur, les marnes étaient collantes, humides et compactes. L'essai proctor normal révèle que sous un compactage donné, le poids spécifique γ_d maximum des matériaux de la coulée est de 19.2 KN/m^3 lorsque la teneur en eau est en moyenne de 12 %. Cette teneur en eau est celle mesurée au niveau les plus compacts des fosses. Les degrés de compacité mesurés à partir de l'essai proctor normal semblent cependant être exagérés ($> 100 \%$). Les degrés de compacité mesurés à partir des optimums proctor fait par T.S.H Phan (1993) dans un moule plus grand révèlent des degrés de compacité plus réalistes (80 à 90%). Il serait donc nécessaire d'envisager des essais dans des moules plus volumineux.

Les essais oedométriques réalisées sur les matériaux de la coulée révèlent des sols assez compressibles et surconsolidés. Cependant il serait préférable d'effectuer d'autres essais à des profondeurs plus grandes afin de comparer leur niveau de compressibilité et leur consolidation.

A partir d'un échantillon soumis à un essai oedométrique à charges successives, il serait intéressant d'envisager des mesures de perméabilité. Ces mesures permettraient de mieux cerner les capacités d'écoulement des eaux à l'intérieur du glissement sous plusieurs contraintes verticales et pour différents indices des vides.

CHAPITRE II

LES CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES DES MARNES NOIRES DE LA COULEE DE SUPER-SAUZE.

Plusieurs séries d'échantillons, provenant des fosses creusées à proximité du transect E, ont été soumises à trois types d'essais de cisaillement :

- le cisaillement rectiligne direct à la boîte de Casagrande ;
- le cisaillement alterné ;
- l'essai triaxial.

La finalité en est la détermination des paramètres de cohésion C et de l'angle de frottement φ des marnes noires de la coulée, car ils servent notamment de bases à tous les calculs de stabilité.

Il sera donc présenté dans ce chapitre chacun de ces essais, de leur description à l'interprétation de leurs résultats.

1 QUELQUES GENERALITES ...

Les formations géologiques et superficielles sont constamment soumises à différentes sollicitations, qui sont :

- L'apesanteur W ;
- la poussée d'écoulement Pe ;
- des charges ponctuelles $F1$, et d'autres réparties $F2$.

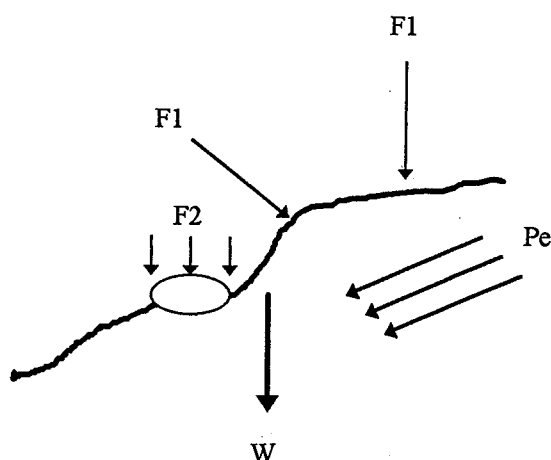


Fig 57 : Différentes sollicitations d'un massif de sol (Philipponnat G., 1987).

La résistance des sols va dépendre à la fois des caractéristiques physiques de la roche et des efforts mis en jeux. Si les efforts sont faibles, eu égard à la résistance du sol, les déformations du sol restent faibles, se stabilisent dans le temps et sont grossièrement proportionnelles aux forces appliquées. On parle de **sols élastiques**.

Si les efforts sont plus importants, les déformations imposées sont plus grandes. Le comportement du sol est de type **plastique**, jusqu'à ce que les efforts soient tels que la rupture se produise.

Les caractéristiques de plasticité sont la **cohésion C** exprimée en Kpa et l'**angle de frottement ϕ** . La détermination de ces paramètres est essentielle pour la connaissance de la stabilité des versants.

Ils peuvent se déterminer en laboratoire grâce à trois types d'essais :

- le cisaillement rectiligne direct à la boîte de Casagrande ;
- le cisaillement triaxial ;
- le cisaillement alterné (pour les paramètres résiduels).

Au cours des essais, on obtient une courbe de déformation qui à généralement l'une des deux allures suivantes :

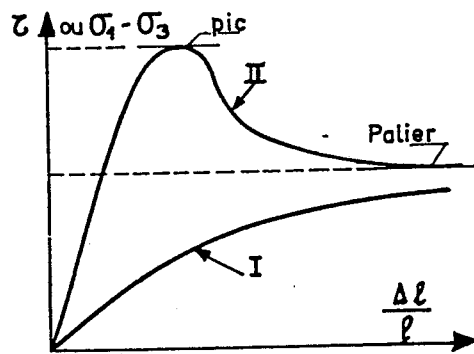


Fig 58 : Courbe de cisaillement déformation (Philipponnat, 1987).

La courbe I correspond, soit à des sables lâches, soit à des argiles molles. La mobilisation de la résistance de cisaillement maximale nécessite des déplacements importants.

La courbe II correspond à des sables très compacts ou à des sols cohérents. On distingue alors (Figure 58 et 59) :

- une résistance maximale dite de pic ;
- une résistance sans grande déformation dite de palier ;
- une résistance résiduelle.

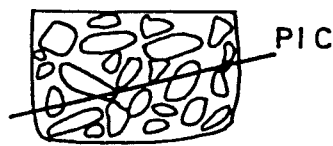
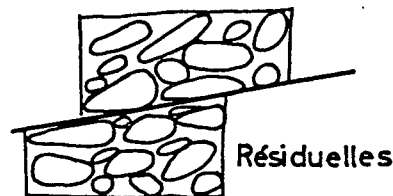
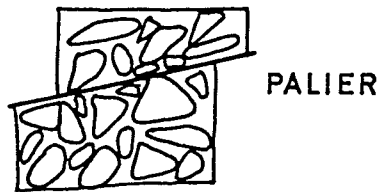


Fig 59 : Schématisation des niveaux de résistance au cisaillement (Philipponnat G.; 1987).



Si l'on augmente la contrainte normale σ (ou encore verticale) que l'on soumet à l'échantillon, la rupture (τ en Kpa) va être différente. En reportant ces couples de valeurs (τ en Kpa; σ) sur un graphique, on constate qu'elle forme une courbe enveloppe appelée **courbe intrinsèque**. Cette courbe peut être assimilée à une droite dite de « **Coulomb** » (Figure 62).

L'ordonnée à l'origine donne la cohésion C , et l'angle que fait la droite par rapport à l'axe des contraintes σ donne l'angle de frottement. Il s'agit maintenant de mettre en application ces quelques théories.

2. LE CISAILLEMENT RECTILIGNE DIRECT.

Les essais ont été réalisés suivant la norme NF P94-071-1 (août 1994). L'essai de cisaillement rectiligne direct est réalisé par un mouvement de translation qui donne donc les paramètres de résistance rectiligne des matériaux soumis à l'essai (c et ϕ).

2.1. Principe de l'essai.

Les schémas et les données sur l'appareillage figurent en annexe 9.

L'échantillon de matériau est placé entre deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre (figure 60). La demi-boîte inférieure est entraînée à vitesse de déplacement constante. L'échantillon est cisailé selon un plan imposé sur lequel on exerce une contrainte normale choisie (Figure n° 61) (Amar S. et Magnan J.P., 1980). On mesure donc l'effort horizontal τ en fonction des déformations horizontales Δl (Figure 61).

La force totale du cisaillement est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique. L'essai est répété plusieurs fois sous différentes contraintes verticales afin de déterminer la droite intrinsèque et donc la cohésion C , et l'angle de frottement ϕ (figure 62).

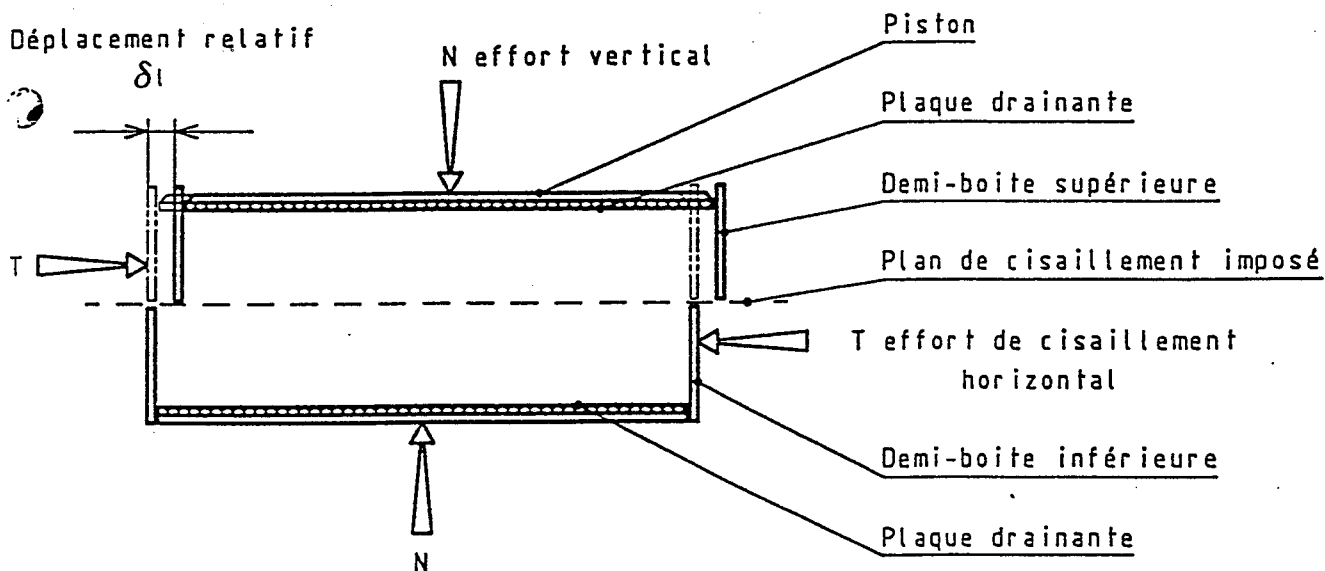


Fig 60 : Principe d'un essai de cisaillement rectiligne à la boîte.

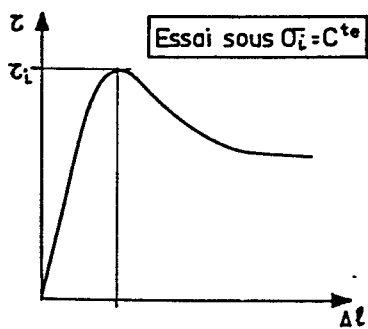


Fig 61 : Courbe contrainte déformation.

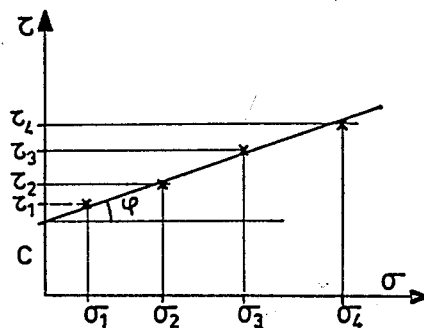


Fig 62 : Détermination de C et φ

L'échantillon, à l'intérieur de la boîte, est placé entre deux pierres poreuses, ce qui permet de réaliser l'essai dans des conditions drainées.

Suivant les dimensions de la boîte, les échantillons ne doivent pas présenter d'éléments supérieurs à un certain diamètre afin de ne pas exagérer la résistance au cisaillement :

- $d_{max} < 5$ mm dans le cas d'une boîte de 6 cm, de côté ou de diamètre ;
- $d_{max} < 8$ mm dans le cas d'une boîte de 10 cm, de côté ou de diamètre.

A l'issue de la phase de consolidation, il est possible de déterminer la vitesse maximale de cisaillement. Il faut mesurer le déplacement vertical δh (à l'aide d'un capteur précis au 1/100e de mm) en fonction du temps, jusqu'à sa stabilisation (en générale au bout d'une heure), comme il est présenté sur la figure 63.

La relation suivante donne alors la vitesse maximum à appliquer :

$$V_{max} = 125/t_{100} \text{ avec } V_{max} < 25$$

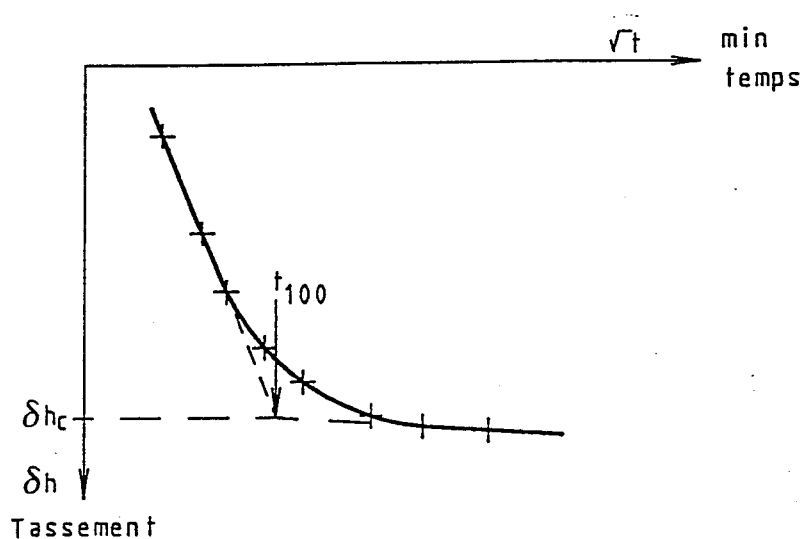


Fig 63 : Détermination de la vitesse maximum de cisaillement en fonction de la courbe de consolidation.

2.2. Réalisation des essais.

2.2.1. La préparation des éprouvettes.

Six essais se sont fait par série de trois carottiers dont les dimensions sont les suivantes :

- 251.3 cm³ (diamètre : 8 cm; hauteur : 5 cm) pour ceux prélevés au mois de juillet et d'octobre 1997 ;
- 211.7 cm³ (diamètre : 7 cm; hauteur : 5.5 cm) pour ceux prélevés au mois de mai 1998.

Les essais sont réalisés sur une machine SATTEC de 1965, à deux vitesses (photo 26):

- Lente soit 0.02mm/minute ;
- rapide soit 1.2 mm/minute.

Ramenée du CEBTP de Tours, il a fallu la remettre en état de marche au laboratoire du CEREG.

La boîte de cisaillement, dite de Casagrande, est ronde avec un diamètre de 6 cm, soit une surface de 36 cm² (photo 27). L'échantillon à l'intérieur à une hauteur total de 3 cm, où la moitié inférieure reste immobile pendant le cisaillement. Les essais ont été réalisés en suivant la norme dont les étapes sont décrites dans la partie 2.1. de ce chapitre.

Cependant, les dimensions des échantillons, dans les carottiers de 251.3 cm³, étaient trop grandes pour être introduites directement dans la boîte de Casagrande. La préparation de ces échantillons a donc nécessité un découpage aux bonnes dimensions, mais en prenant bien garde de ne pas trop décompresser le matériau. Deux pierres poreuses, adhérentes aux deux faces de l'échantillon, assurent son drainage car **les essais se sont fait dans des conditions drainées et consolidées (essai CD).**

Les consolidations (trois jours au minimum) et les contraintes verticales soumises sont de 50, 100, 200 Kpa ou 100, 200, 300 Kpa. A partir de la courbe de consolidation, il est possible de déduire la vitesse maximum de cisaillement à appliquer aux échantillons.

La détermination de la vitesse à été déterminée sur six échantillons (Tableau 13). Les courbes de tassement sont présentées en annexe 9.

Echantillons	Contrainte verticale σ' (Kpa)	Vitesse maximum (mm/minute)
E4F1 0.65 m	50	/ 0.00075
E4F1 0.65 m	100	0.0017
E4F1 0.65 m	200	0.005
EF2 1.00 m	50	0.0013
EF2 1.00 m	150	0.0016
E4F1 0.50 m	200	0.0062

Tableau 13 : Détermination des vitesses de cisaillement.

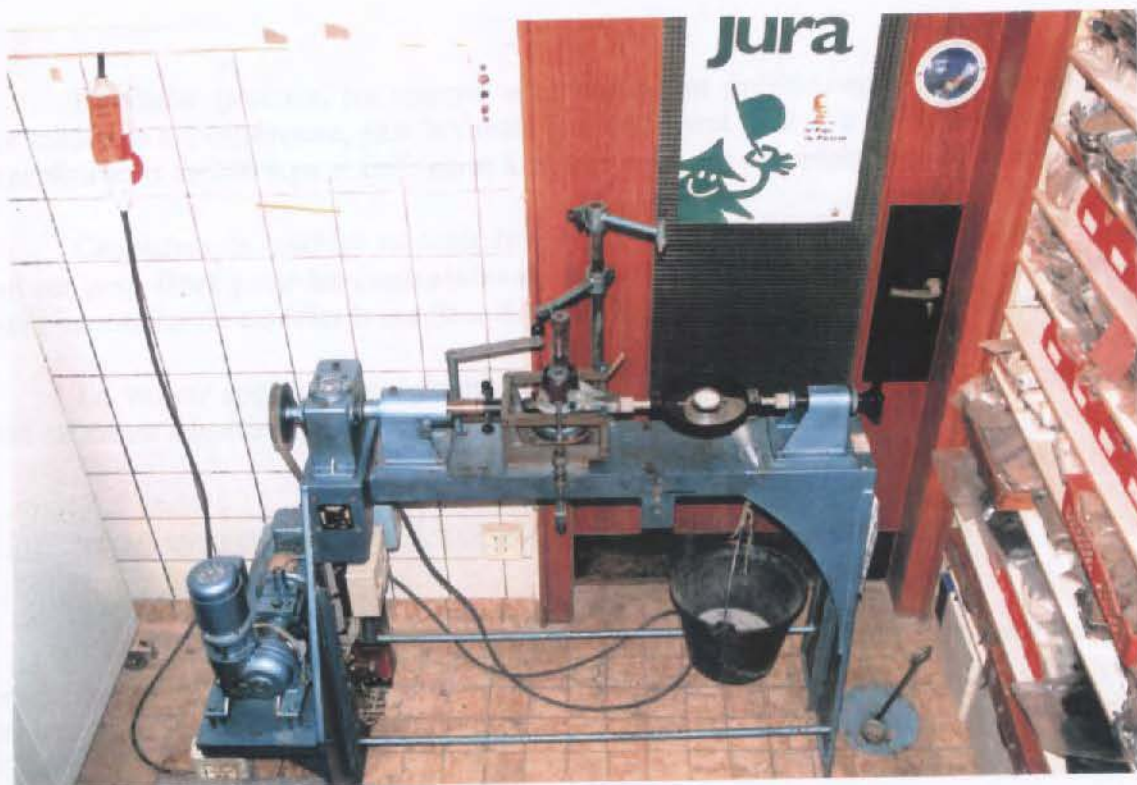


Photo 26 : Présentation de la machine SATTEC.



Photo 27 : Présentation des Boites de cisaillement adaptées à la machine.

De façon générale, les vitesses sont très lentes (inférieures à 0.0062 mm/ minute) et plus la consolidation est importante, plus la vitesse de cisaillement peut être rapide (supérieures à 0.005 pour des consolidations de 200 Kpa et inférieures à 0.0013 pour des consolidations de 50 Kpa).

Cependant, la machine ne possède que deux vitesses dont la plus lente est de 0.02 mm/minute, **ce qui est trop élevé pour les contraintes de consolidation soumises aux échantillons**. Dans l'avenir, il serait nécessaire de modifier la machine SATTEC pour appliquer les vitesses de cisaillement adaptées.

La vitesse appliquée aux échantillons sera donc de toute façon 0.02 mm/minute. Nous pouvons tout de même admettre que nous obtiendrons les caractéristiques à long terme.

2.2.2. Présentation et discussion des résultats des essais.

Les courbes contrainte-déplacement sont présentées en annexe 9 ainsi que les droites intrinsèques permettant de déterminer les angles de frottement ϕ et la cohésion des particules C . Une série de courbes déplacement-contrainte et sa droite intrinsèque sont présentées, ici à titre d'exemple, sur les figures 64 et 65 (échantillon E4F1).

L'analyse de l'allure des courbes contrainte-déplacement permet de faire les observations suivantes :

- aucune des courbes ne présente de pic de rupture, synonyme de liaison entre les grains. Seul l'échantillon 2EF2 0.70 m consolidé à 3 bars présente un léger pic de rupture, ce qui semble indiquer que celui-ci existe bien à condition que la contrainte verticale soit suffisamment élevée ;

- le fait qu'il n'y ait pas de pic ne permet pas de déterminer τ max, mais seulement la valeur à l'état final. Pour la détermination de l'angle de frottement nous prendrons donc, soit la valeur à 5 mm de déplacement comme il est indiqué dans la norme, soit la valeur au moment où l'asymptote est obtenue (figure 64) ;

- ce phénomène d'asymptote ne correspond pas à une rupture, mais à une phase de **réarrangement** des grains ;

- les essais effectués par G. Colas et J. Locat (1993), sur les matériaux du glissement de La Valette, et par T.S.H. Phan (1993) sur des matériaux affectant les mêmes formations que celles de Super-Sauze, ne présentent aussi aucun pic de rupture. Ils en viennent à cette même conclusion de réarrangement ;

Les courbes contrainte-déplacement présentées par T.S.H. Phan montrent une chute systématique de la contrainte de cisaillement, puis une nouvelle croissance régulière. C'est ce point de chute que cet auteur a pris comme niveau de rupture. Le cisaillement des marnes de la coulée ne présente pas ce profil : la chute de la contrainte tend progressivement vers l'asymptote. Ceci est dû entre autre, au fait que les essais furent menés avec de faibles vitesses alors que T.S.H. Phan avait mis ces éprouvettes à l'épreuve avec une vitesse rapide (Tableau 29) ;

- quelques anomalies survenues au cours de certains essais ont pu fausser les courbes contrainte-déplacement. Elles sont principalement dues à la présence d'éléments supérieurs à 5 mm sur le plan de cisaillement, qui tendent à le bloquer en s'engrenant. La norme stipule que l'essai doit se faire sur des

matériaux inférieurs à 5 mm. Par exemple, pour l'échantillon 2EF2 0.70 m, cisailé sous une contrainte verticale de 2 bars, il y a une exagération de la courbe qui s'explique par la présence d'une plaquette marneuse de 2-3 cm de diamètre, juste sur le plan de cisaillement ;

- Après l'essai, l'échantillon extrait de sa boîte ne présente pas de traces de rupture.

Il est donc nécessaire de toujours couper l'échantillon cisailé dans sa tranche afin de déceler les hétérométries ou la trace d'une éventuelle surface de rupture.

Les valeurs d'angles de frottement ϕ et de cohésion C sont données dans le tableau 28. **Compte tenu de la non linéarité des points, plusieurs possibilités de droites intrinsèques étaient envisageables.** Cette non linéarité reflète le problème de l'hétérogénéité des échantillons. La contrainte a pu être parfois surestimée. Il s'avère que dans certains cas, il était plus judicieux de donner une « fourchette » de valeurs pour C et ϕ .

Echantillons	Profondeur	Contrainte normale	C (Kpa)	ϕ (Phi en °)
E4F1	0.50 m	50, 100, 200 Kpa	0 à 10	29° à 33°
E4F1	0.65 m	50, 100, 200 Kpa	4 à 12	33° à 35°
2EF2	0.40 m	100, 150, 200 Kpa	0 à 14	29° à 33°
2EF2	0.70 m	100, 200, 300 Kpa	0 à 13	34° à 37°
2EF2	0.90 m	100, 200, 300 Kpa	18 à 22	32° à 33°
2EF2	1.10 m	100, 200, 300 Kpa	0	36° à 37°

Maximum	22	37°
Moyenne	8	33°
Minimum	0	29°

Tableau 28 : Angles de frottement ϕ et cohésions C.

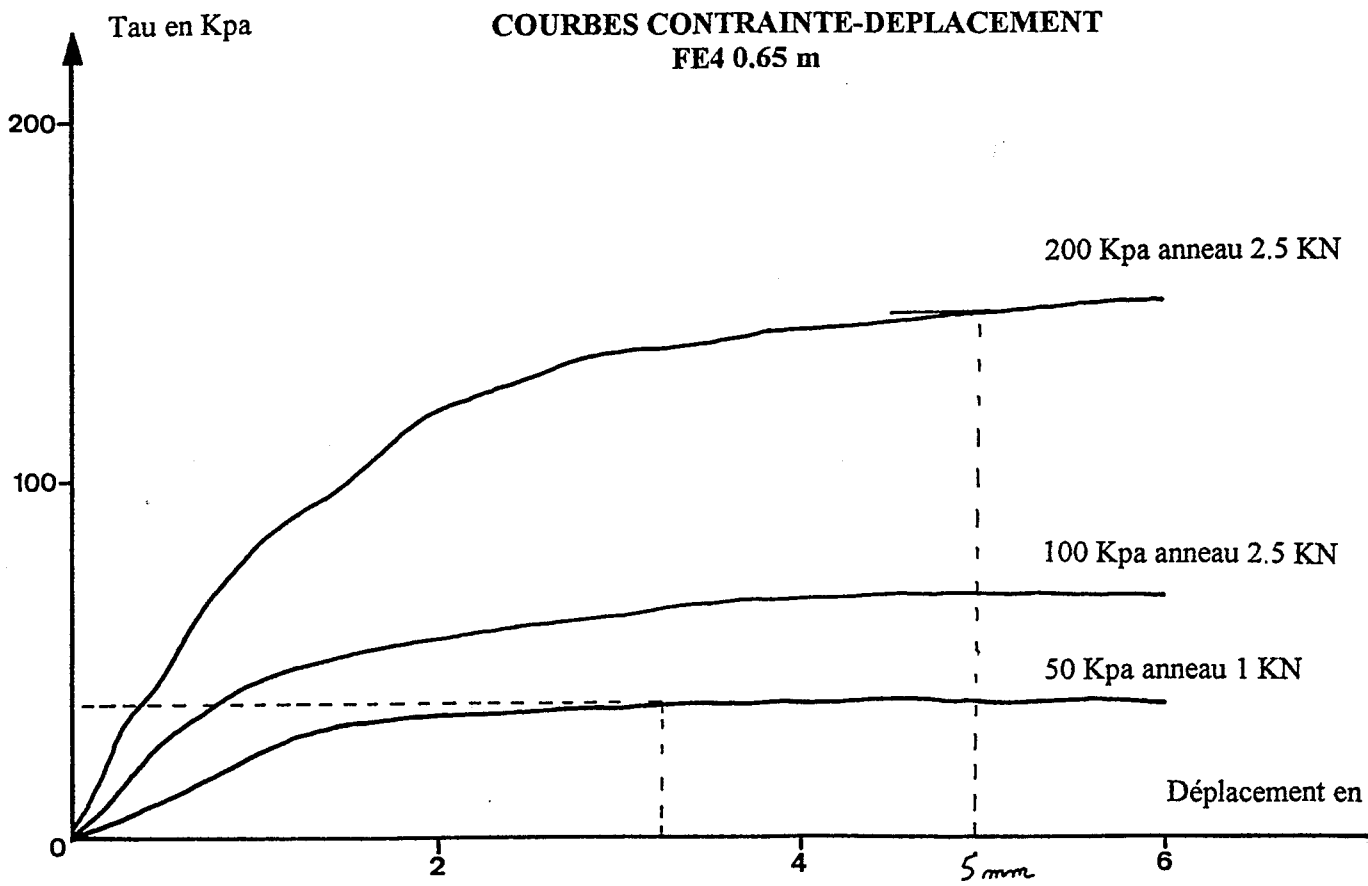


Fig 64 : Courbes contrainte-déplacement EF2 0.65 m.

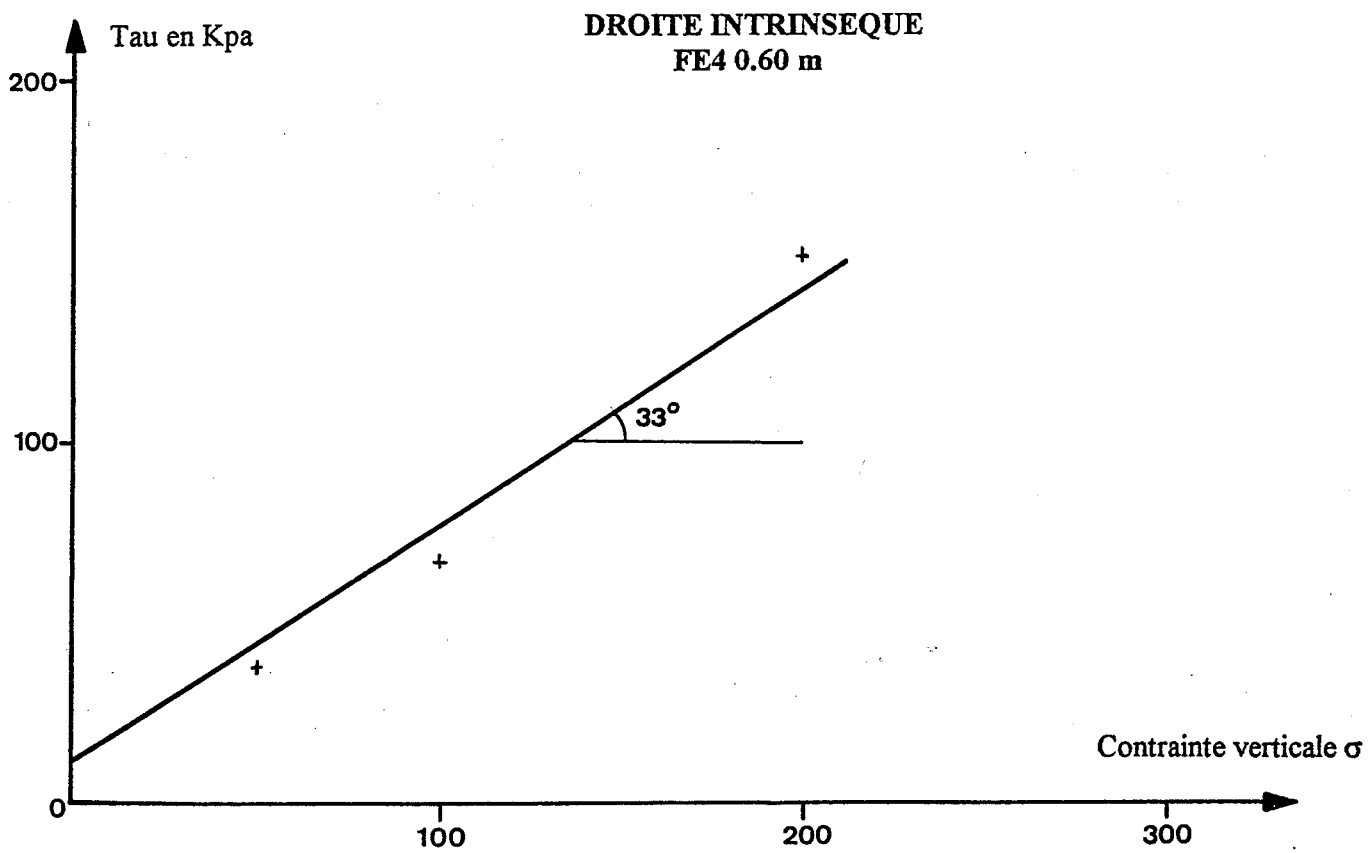


Fig 65 : Droite intrinsèque EF2 0.65 m.

Ces résultats peuvent être complétés par ceux obtenus sur des marnes noires provenant d'autres sites :

Auteurs	Origines	Cohésion C (Kpa)	Angle de frottement (ϕ en°)	condition de cisaillement	Vitesse de cisaillement
PHAN, 1993	Marnes noires de Draix	6.8 à 9.2	33 à 39	Imbibées	Rapide (1.2 mm/mn)
PHAN, 1993	Marnes noires de Draix	4 à 34	35 à 43	sec	Rapide (1.2 mm/mn)
PHAN, 1993	Argiles litées du Triève	7 à 10	28 à 38	Imbibées	Rapide 1.2 mm/mn
ANTOINE et al, 1988	Marnes noires de Barcelonnette	13.5	35	Drainées	?
GAUDIN et al, 1981	Marnes noires du Cénomaniens (Nice)	?	29 à 34	?	Rapide
COLAS et LOCAS, 1988	Glissement de La Valette	0	24	Consolidées non drainées*	?
AL HAYARI (1989)	Terres noires de Barcelonnette	12 à 14	34 à 37	?	?
	Super Sauze	0 à 20	29 à 37	Drainées	0.02 mm/mn (lente)

Tableau 29 : Angles de frottement ϕ et cohésions C de quelques terres noires.

• Discussion sur les résultats C et ϕ , issus des cisaillements des matériaux de la coulée :

- la cohésion C des échantillons remaniés provenant de la coulée apparaît relativement faible, même si la texture des matériaux est silto-argileuse. La présence d'une légère cohésion apparente peut s'expliquer par :

- la présence d'éléments supérieurs à 5 mm ;
- les liaisons carbonatées existantes, quoique celles-ci soit en partie détruites par le drainage (Phan montre que sur le cisaillement d'échantillons secs, la cohésion est plus élevée) ;
- le réarrangement des grains ;
- le compactage relativement élevé des matériaux, démontré par les essais oedométriques et Proctor.

- les angles de frottement présentent une moyenne supérieure à 30° (plus la cohésion C est faible, plus ϕ est élevé), mais avec une grande dispersion due à la présence d'éléments grossiers comme il a été expliqué ci-dessus.

• Comparaisons avec les autres sites (Figures 66 et 67)

- les résultats sont bien corrélés avec l'ensemble des autres essais faits sur d'autres sites ($\phi > 30^\circ$ et cohésion c faible), d'autant plus que les auteurs en viennent aux mêmes conclusions, à savoir que la contrainte maximale correspond plus à un réarrangement des grains qu'à une véritable rupture.
- les cohésions et les angles de frottement trouvés sur les matériaux de la coulée de Super-Sauze ne diffèrent pas beaucoup des résultats présentés par T.S.H. Phan, sur des terres noires altérées naturellement ;
- seul G. Colas et J. Locat (1988) trouve un angle ϕ plus faible (24°) pour une cohésion nulle. Mais les essais se sont fait sur des échantillons taillés dans des matériaux tamisés à $100 \mu\text{m}$, ce qui a pour effet d'annuler les exagérations engendrées par les éléments grossiers.

En conclusion, nous pouvons dire que la machine SATTEC nous a contraint à exagérer les vitesses de cisaillement appliquées aux échantillons. Une révision de la machine devra être faite si de prochains cisaillements sont envisagés dans l'avenir.

Les marnes noires de la coulée; tout comme les marnes noires en général, sont donc caractérisées par un angle de frottement relativement élevé et une faible cohésion, due au remaniement des matériaux ou à leur altération naturelle.



Photo 28 : Echantillon de la coulée soumis au cisaillement rectiligne direct.

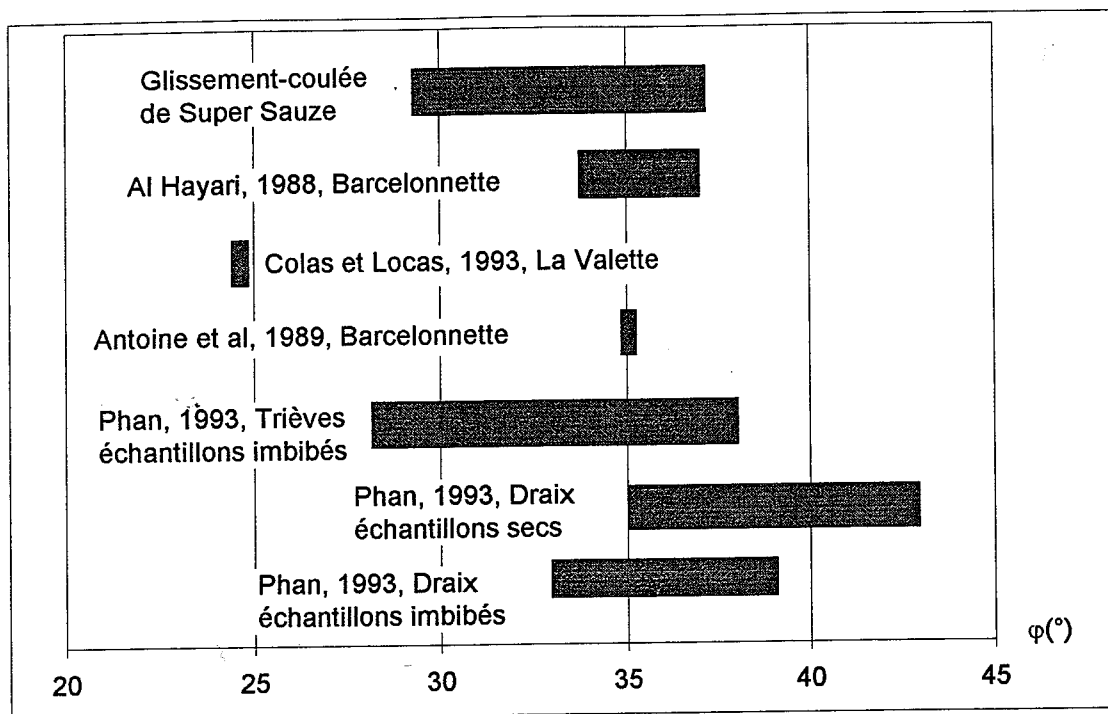


Fig 66 : Comparaison des angles de frottement interne de quelques marnes noires.

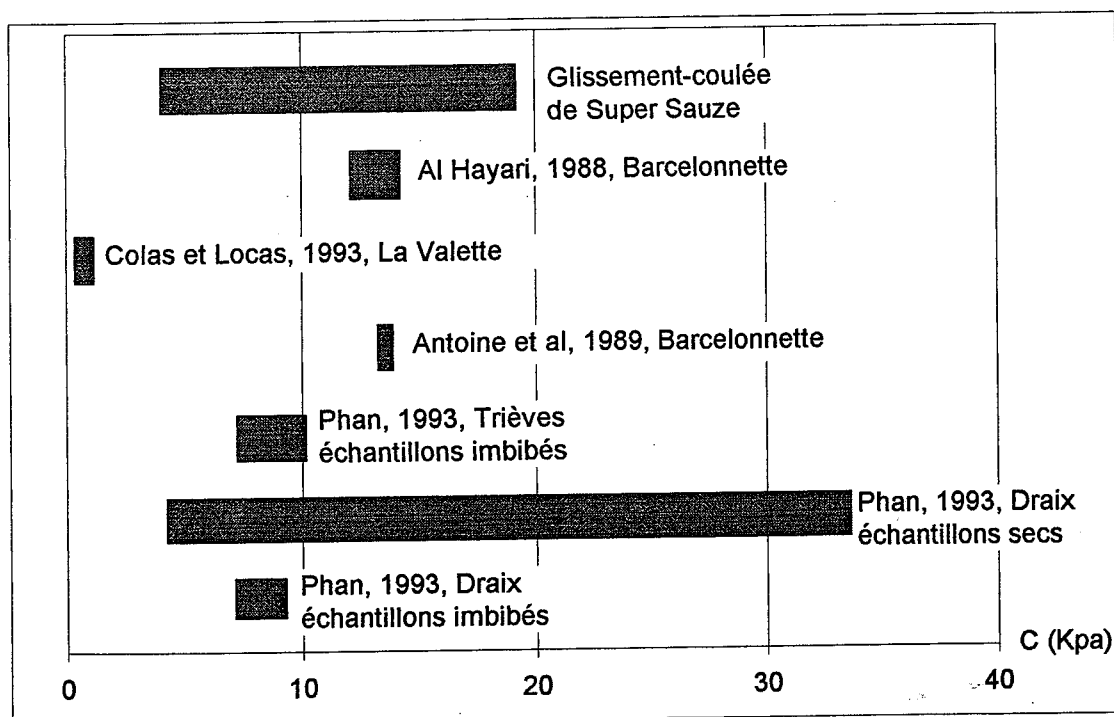


Fig 67 : Comparaison des cohésion de quelques terres noires.

3. LE COMPORTEMENT DES MARNES NOIRES AU CISAILLEMENT TRIAXIAL.

L'essai triaxial sur les marnes noires du glissement-coulée de Super-Sauze a été effectué en suivant la norme NF P94-074 (octobre 1994). Avant la présentation et l'interprétation des résultats, il est important de rappeler les principes de l'essai.

3.1. Principe de l'essai et mode opératoire.

Les schémas concernant les appareillages sont présentés dans l'annexe 10.

Tout comme l'essai de cisaillement direct, le cisaillement triaxial a pour but de déterminer les paramètres de cohésion C et l'angle de frottement ϕ à long terme, mais les contraintes appliquées sont différentes.

3.1.1. Définition des contraintes.

L'éprouvette de sol est placée dans une cellule (annexe 10) où elle est soumise à un champs uniforme de contraintes (figure 68).

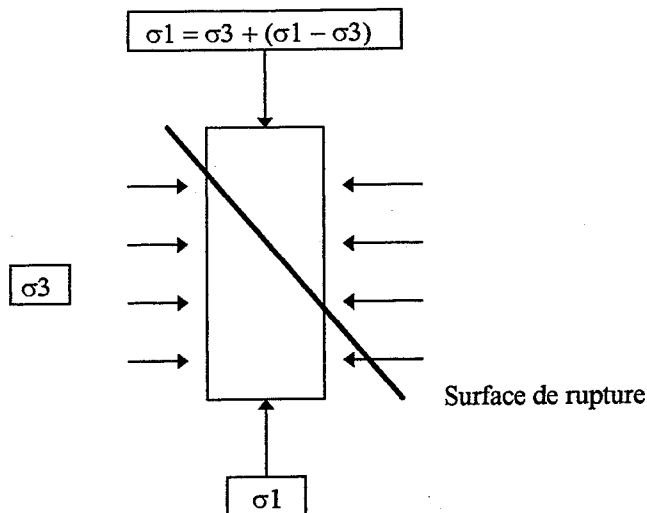


Fig 68: Contraintes appliquées à l'éprouvette au cours d'un essai triaxial.

Ce champs a pour composante :

- une pression hydrostatique σ_3 appliquée par de l'eau remplissant la cellule ;
- une contrainte axiale ou déviateur $\sigma_1 - \sigma_3$ appliquée par l'intermédiaire d'un piston.

La contrainte axiale appliquée à l'éprouvette est de:

$$\sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3) = \sigma_1$$

Des pierres poreuses placées aux extrémités de l'éprouvette peuvent assurer le drainage de celle-ci en cours d'essai. La pression interstitielle peut aussi être mesurée.

L'essai consiste à faire croître le déviateur jusqu'à rupture de l'éprouvette, soit suivant un plan de rupture bien défini (Figure 68), soit en forme de tonneau. La pression hydrostatique est maintenue constante et l'application du déviateur se fait à vitesse constante. On relève au cours de l'essai la courbe déviateur-déformation (Figure 69) et on en déduit la contrainte principale σ_1 s'exerçant sur l'éprouvette au moment de la rupture.

Cette démarche est répétée sur trois ou quatre éprouvettes, en faisant varier les valeurs σ_3 afin d'obtenir la droite intrinsèque. On trace les cercles de contraintes dit de « Mohr », correspondants aux critères de rupture pour chaque éprouvette, sur un diagramme où les contraintes normales σ sont portées en abscisses et les contraintes tangentielles τ en ordonnées (Figure 70).



Fig 69: Courbe déviateur-déformation.

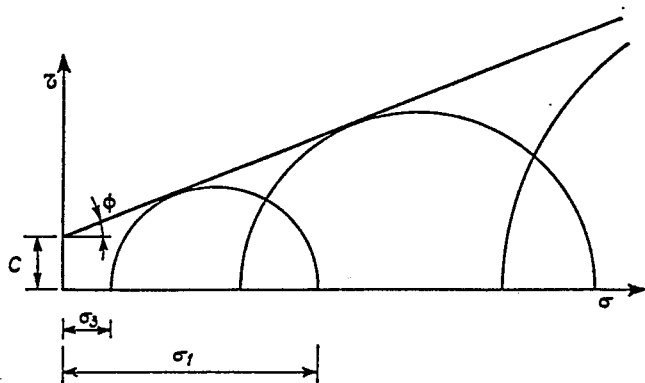


Fig 70: Droite intrinsèque.

3.1.2. Les différents types d'essais possibles.

- L'essai consolidé drainé CD.

L'éprouvette est consolidée sous la pression hydrostatique σ_3 jusqu'à ce que la pression interstitielle μ soit devenue nulle. On applique alors le déviateur à une vitesse suffisante pour qu'aucune nouvelle pression interstitielle n'apparaisse durant l'essai. Cet essai permet de mesurer les caractéristiques à long terme du milieu puisque seul le squelette solide s'oppose au cisaillement. La résistance au cisaillement est alors exprimée par :

$$\tau = C' + \sigma' \operatorname{tg} \phi$$

C' et ϕ étant les paramètres de cisaillement drainés se rapportant aux contraintes effectives.

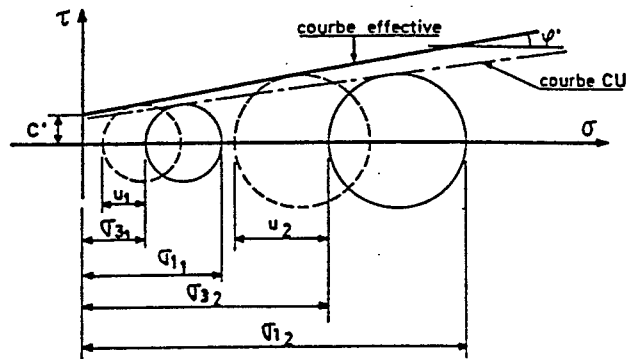
- *Essai consolidé non drainé CU.*

L'éprouvette est consolidée sous la pression hydrostatique σ_3 , puis cisailée par application d'un déviateur qui fait naître une pression interstitielle μ au sein de l'échantillon en cours d'essai. Cette pression μ peut se mesurer. La relation est la suivante :

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

Cette essai permet de calculer les caractéristiques effectives du sol (Figure 71)

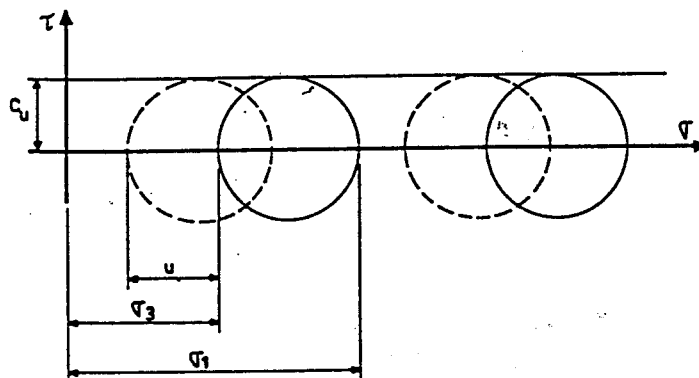
Fig 71: Essai CU



- *Essai non consolidé-non drainé UU.*

Il définit la résistance à court terme du sol. L'échantillon est soumis à une pression σ_3 et le drainage est fermé (aucune consolidation du matériau). On applique ensuite le déviateur jusqu'à obtention de la rupture. Si l'on fait varier la pression σ_3 sur différentes éprouvettes, les contraintes effectives seront les mêmes. La pression est supportée par la pression interstitielle. Les cercles de Mohr correspondants à ces ruptures sont donc identiques et forment une droite parallèle à l'axe des abscisses (Figure 72).

Fig 72: Essai UU



Les conditions d'étude imposent le plus souvent de saturer le sol avant de procéder aux essais permettant d'obtenir les paramètres de cisaillement drainés. Aussi, la quasi totalité des essais triaxiaux sont donc effectués sur des éprouvettes saturées (Le Tirant P, 1964).

3.1.3. Quelques renseignements sur la préparation des éprouvettes.

Les éprouvettes sont taillées à l'aide d'un appareil permettant sa découpe aux bonnes dimensions (Annexe 10). Elles peuvent être taillées, soit à partir d'une carotte de sol intacte, soit à partir d'un sol remanié et compacté à son optimum Proctor.

Les dimensions diffèrent suivant la nature des sols, mais en général la hauteur est supérieure à deux fois le diamètre de l'éprouvette. Par exemple, pour des matériaux de type limon, la hauteur est de 8 cm pour un diamètre de 3.5 à 4 cm.

Il s'agit maintenant de mettre en application ces aspects théoriques.

3.2. Réalisation de l'essai.

Un seul essai triaxial a été effectué sur une machine Wykeham-Farrance au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Colmar.

Les éprouvettes ont des dimensions différentes de celles utilisés pour le cisaillement rectiligne direct. Elles sont de 8 cm de hauteur et 3.5 cm de diamètre. N'ayant pas eu les moyens de prélever des éprouvettes intactes sur le glissement, elles ont été taillées dans des matériaux écrêtés à 2 mm et compactées à l'optimum Proctor, soit une teneur en eau de 12 %.

L'essai a été effectué dans des conditions non drainées, avec une mesure de la pression interstitielle (CU + U), afin de connaître les caractéristiques effectives du matériau (C' et ϕ') en déduisant à l'essai CU, la pression interstitielle (U).

Les contraintes soumises sont de 100, 300 et 400 Kpa et la vitesse d'écrasement est de 0.060 mm/minute. Le procès verbal est présenté en annexe 10.

3.3. Présentation des résultats.

Les courbes déformation-déviateur de contraintes et les courbes déformation-pression interstitielle sont présentées ici, ainsi que la représentation des contraintes dans l'espace de Mohr (Figure 73 et 74). Celles-ci ne présentent pas de pic de rupture tout comme celles de F. Blanchet (1988) sur les argiles litées du Trièves.

La déformation de l'échantillon ne montre aucun plan de cisaillement oblique (en coup de sabre). Il a été écrasé en forme de «tonneau» (Photo 29) ce qui signifie qu'il reprend, au fur et à mesure du tassement, toujours le même effort. Cette déformation est de type plastique.

Les contraintes dans l'espace de Mohr nous donnent les résultats suivant (figure 75):

CU : 55 Kpa

$\phi_U : 20^\circ$

et

C'U : 50 Kpa

$\phi'_U : 24^\circ$

La cohésion semble assez élevée différemment du cisaillement direct. Ceci peut s'expliquer par le compactage à l'optimum Proctor mais aussi par la pression interstitielle faible.

COURBES DEFORMATIONS - DEVIATEUR DE CONTRAINTES
 Echantillon compacté à l'optimum proctor ($W_n = 12\%$)

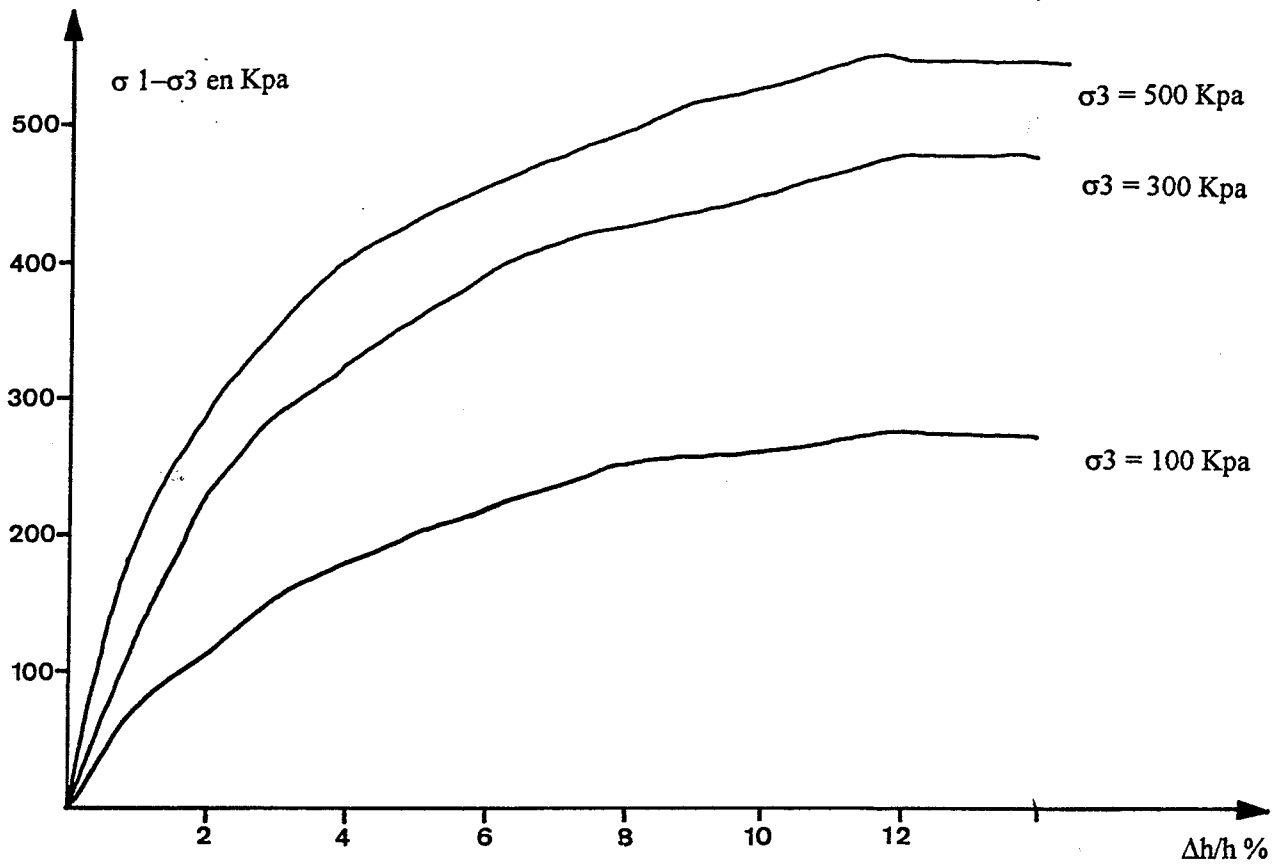


Fig 73 : Courbes déformation-déviateur de contraintes

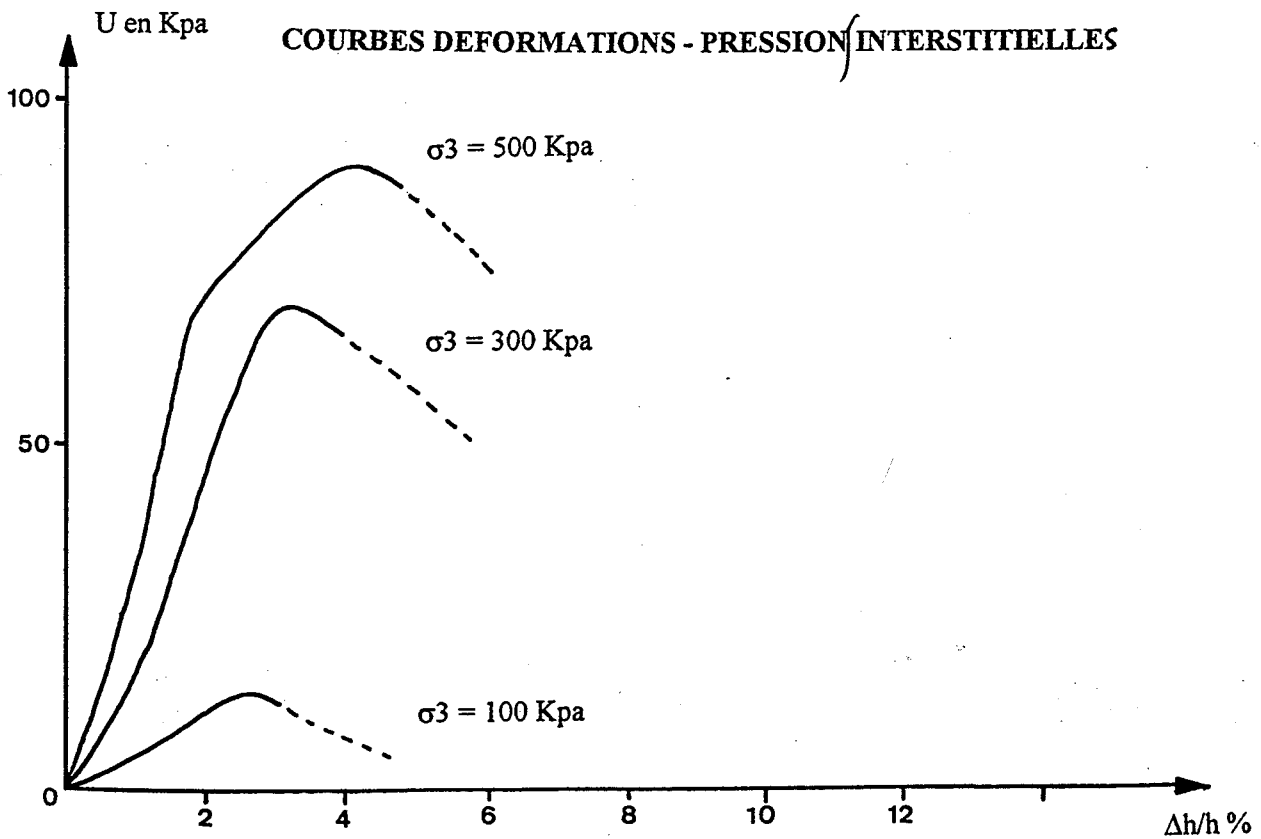


Fig 74 : Courbes déformation-pression interstitielle.

ESSAI TRIAXIAL SUR LES MARNES NOIRES DE SUPER-SAUZE

essai CU + U

— CU + U $\phi' = 24^\circ$ $C' = 55 \text{ Kpa}$
- - - CU $\phi = 20^\circ$ $C = 50 \text{ Kpa}$

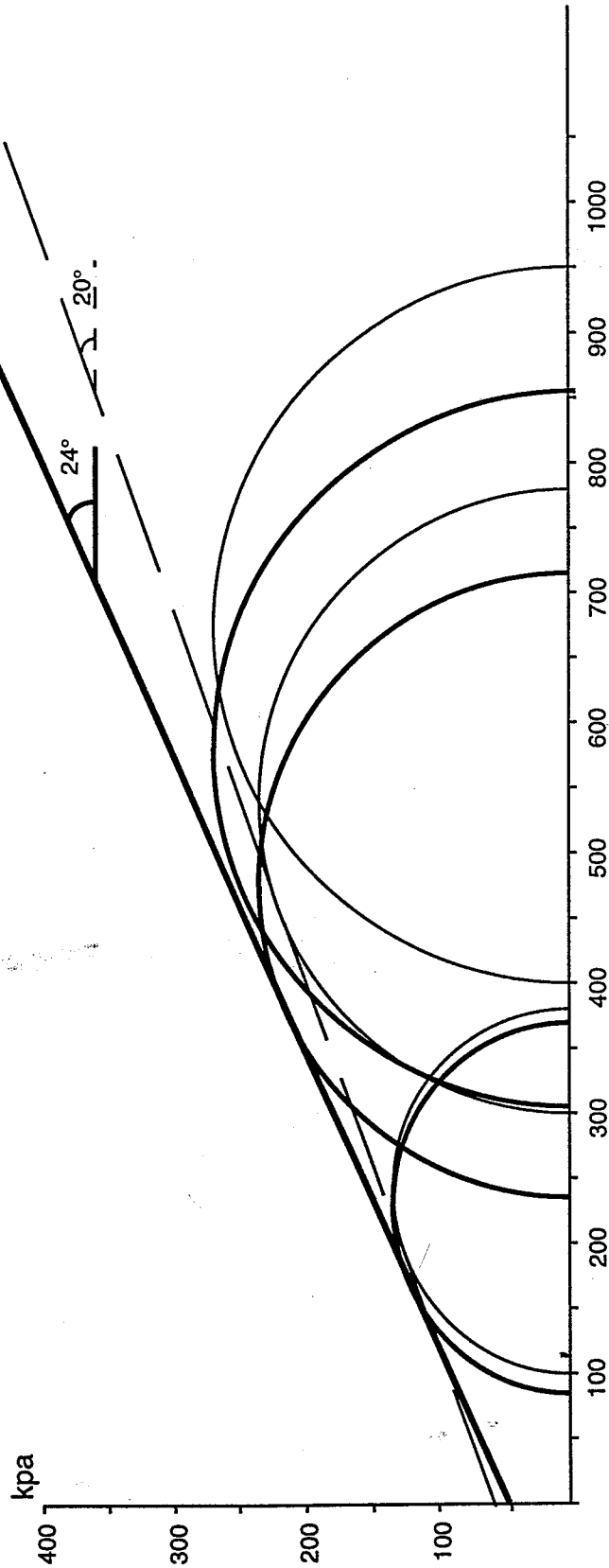


Fig 75 : Détermination de l'angle de frottement et de la cohésion pour un essai CU + U.

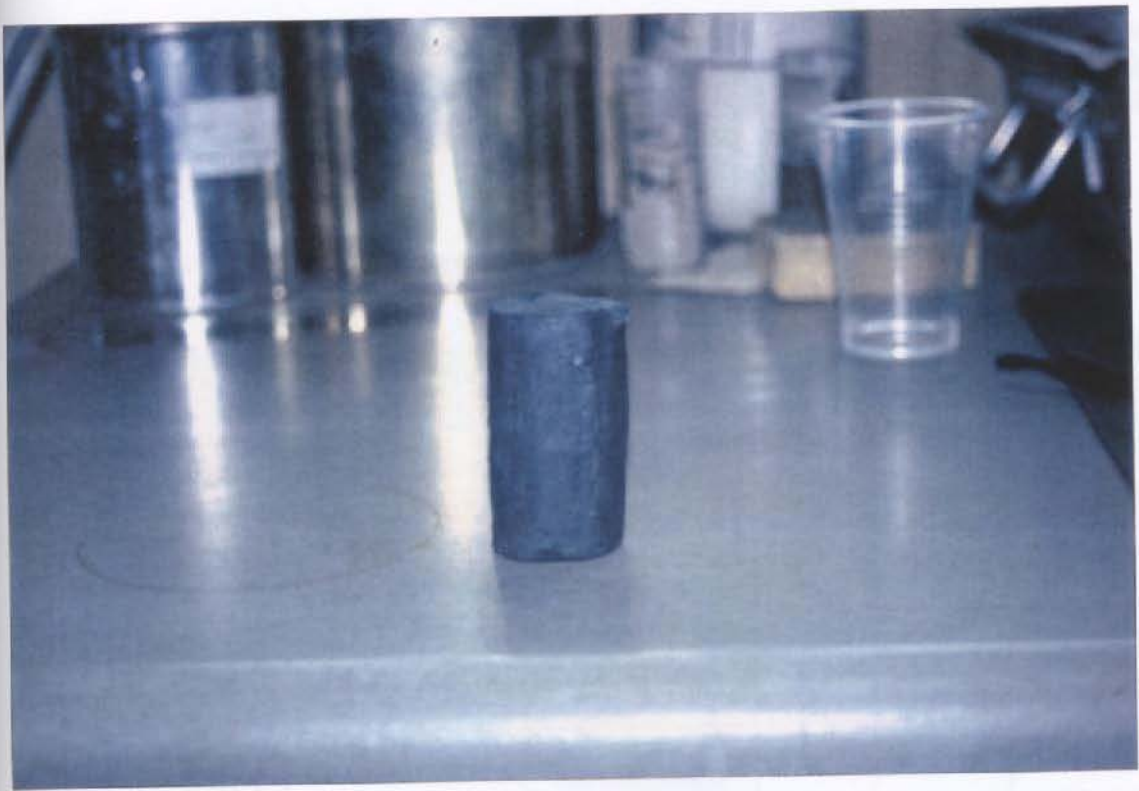
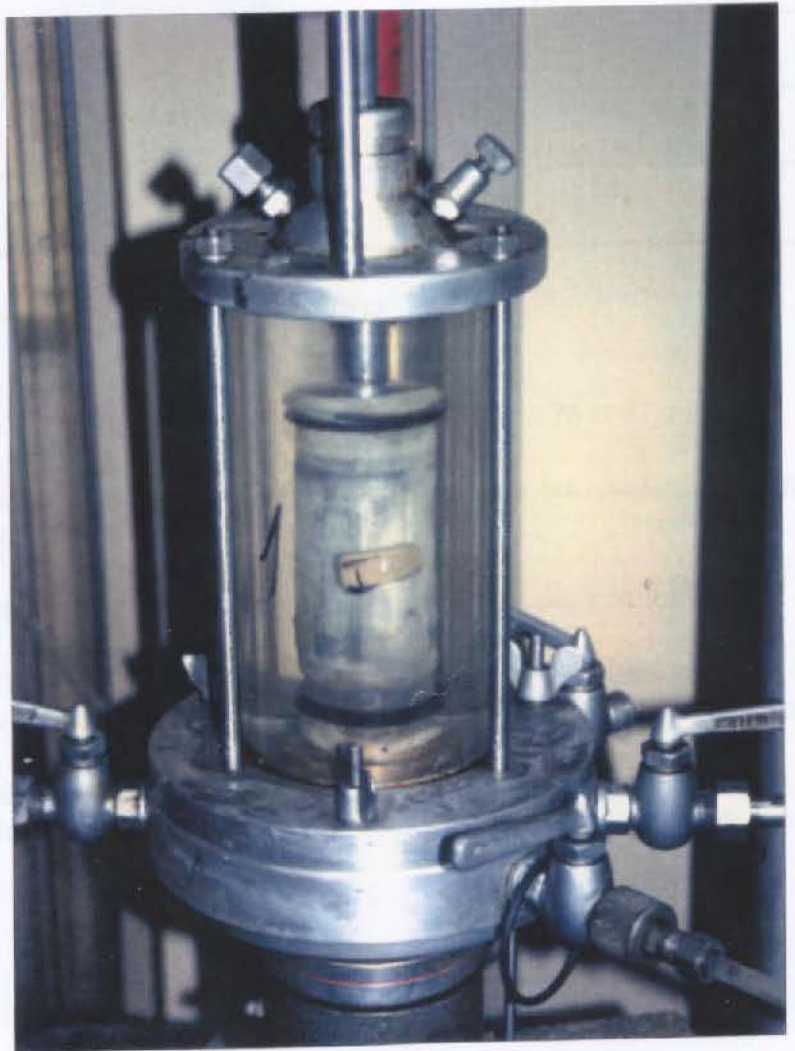


Photo 29 : Déformation en « tonneau » d'une éprouvette de marnes noires.



**Photo 30 :
Éprouvette de marnes
noires à l'intérieur de
la cellule remplie d'eau.**

L'angle n'est pas très élevé. Une cohésion assez élevée avec un angle moyen situe l'échantillon entre les caractéristiques d'une argile pure (angle de frottement faible et cohésion forte), et d'un sable lâche (cohésion nulle et angle de frottement élevé). L'essai correspondrait donc bien à un matériau silto-argileux.

3.4. Quelques éléments bibliographiques de comparaison et discussion.

Auteurs	Type d'essai	Origines	ϕ°	ϕ'°	C (Kpa)	C' (Kpa)
BLANCHET, 1988	CU + U	Argiles litées du Trièves	14°	23°	18	2
VAN ASCH et NIEUWENHUIS	CU + U	Terres noires remaniées de La Valette		27.5°		0
VAN ASCH et NIEUWENHUIS, 1988	CU + U	Glissement de la Valette		19.8°		49
CARIS et VAN ASCH, 1991	?	Fenêtre de Barcelonnette	27°		14	
ANTOINE et al, 1988	?	Marnes noires de Barcelonnette	24.7°		12.4	
AL HAYARI 1988	CU	Terres noires du Roissard		9.5		80
AL HAYARI, 1989	CU	Argiles litées du Trièves		23° à 26°		0
1998	CU + U	Super - Sauze	20°	24°	55	50

Tableau 30 : Essai triaxiaux menés sur quelques marnes noires

Les observations que nous pouvons faire de ce tableau et des figures 76 et 77 sont:

- les angles de frottement sont tous moins importants que ceux obtenus par les cisaillements directs, donc plus représentatifs de ce type de matériau ;
- les cohésions sont plus variées ce qui peut s'expliquer par l'hétérogénéité des marnes noires ;
- les résultats obtenus sur les marnes noires du glissement de Super-Sauze **sont bien corrélés avec ceux obtenus par Van Asch et Nieuwenhuis sur le glissement de La Valette**, sur le versant opposé ;
- les terres noires du Roissard présentent un faible angle de frottement et une cohésion élevée, expliqués par le fait que les essais ont été réalisés dans des zones ayant subi une forte compaction par des engins de terrassement.

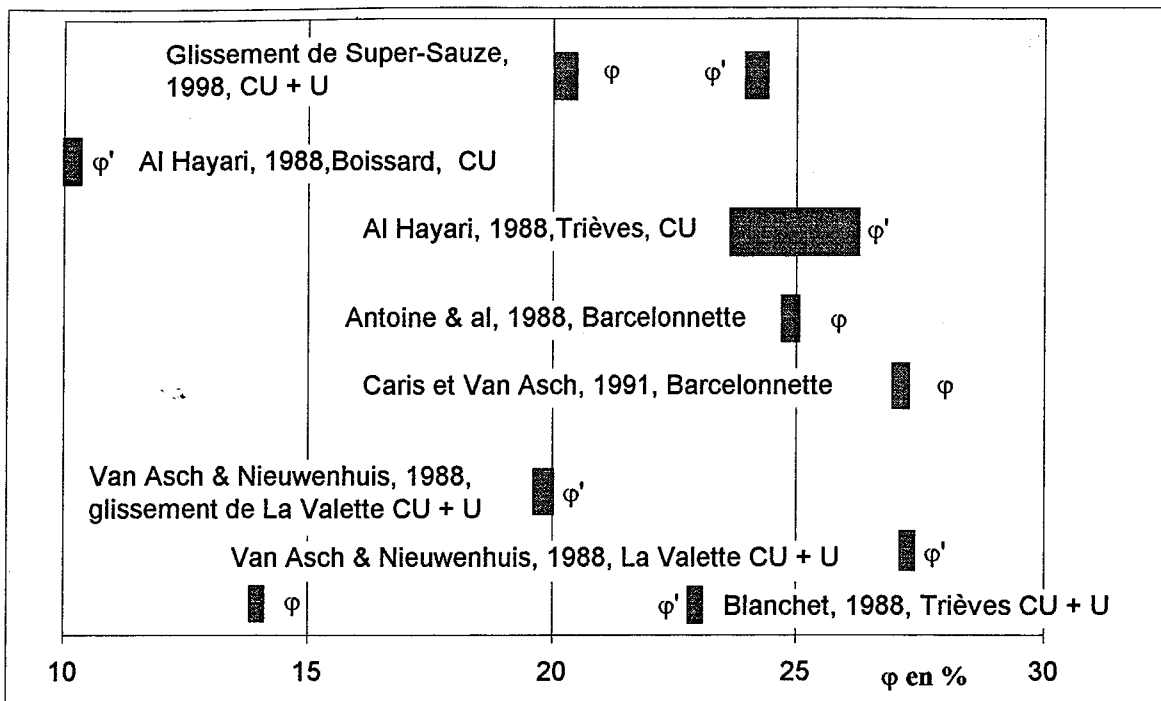


Figure 76 : Comparaison des angles de frottement de quelques essais triaxiaux effectués sur les marnes noires.

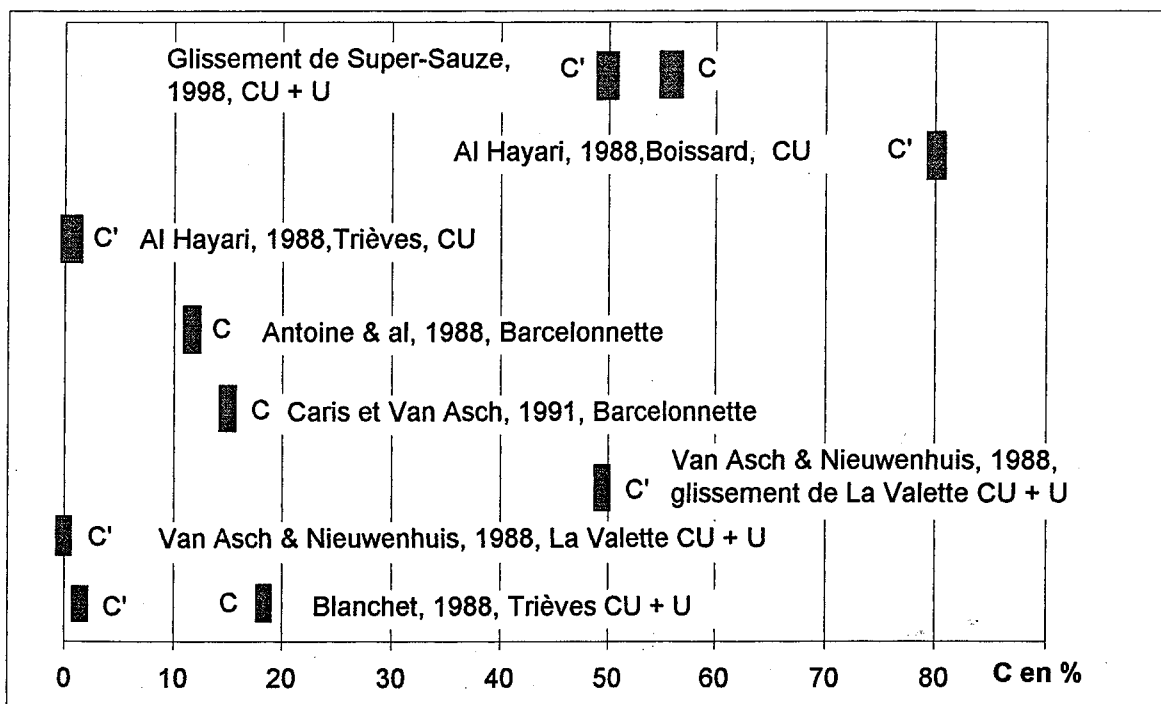


Figure 77 : Comparaison des cohésions de quelques essais triaxiaux effectués sur les marnes noires.

4. LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT RESIDUEL DES MARNES NOIRES.

Pour les glissements de terrain, lors d'une réactivation, les déplacements se produisent le long de la surface de rupture déjà existante. Sur cette surface, la résistance au cisaillement mobilisée est appelée résistance au cisaillement résiduel.

Cette résistance est à prendre en compte pour déterminer l'état de stabilité d'un versant. Ce paramètre peut être calculé en laboratoire grâce à une machine à cisaillement alterné. Avant d'en voir les applications sur la coulée de Super-Sauze, il est indispensable de définir les modalités de cet essai.

4.1. Principe de l'essai et mode opératoire.

Les essais ont été suivis selon la norme NF P 94-071-2 (Août 1994).

4.1.1. Qu'est-ce que la résistance résiduelle?

C'est en 1964 que Skempton a quantifié la notion de résistance résiduelle en l'appliquant à des talus dont l'instabilité demeurait jusqu'alors inexplicée. Il proposait simultanément le moyen de la déterminer en laboratoire par essais de cisaillement triaxiaux, ou par essais de cisaillement directs. Le cisaillement alterné qui en résulte n'est en fait que la prolongation d'un essai de cisaillement direct.

La notion de résistance résiduelle est étroitement liée à celle de rupture progressive, laquelle est d'autant plus prononcée que le sol est plus fragile (L. Bjerrum, 1967 in Blondeau F. et Josseume H., 1976). La plus ou moins grande présence de liens de diagenèse entre les particules argileuses (formés pendant la phase de consolidation) commande la fragilité du matériau.

De façon théorique, la courbe de cisaillement effort-déformation d'une argile intacte, présentant un caractère de surconsolidation diagenétique, fait apparaître un pic suivi d'une décroissance plus ou moins prononcée selon les sols (idem que pour le cisaillement directe).

Contrainte de
cisaillement

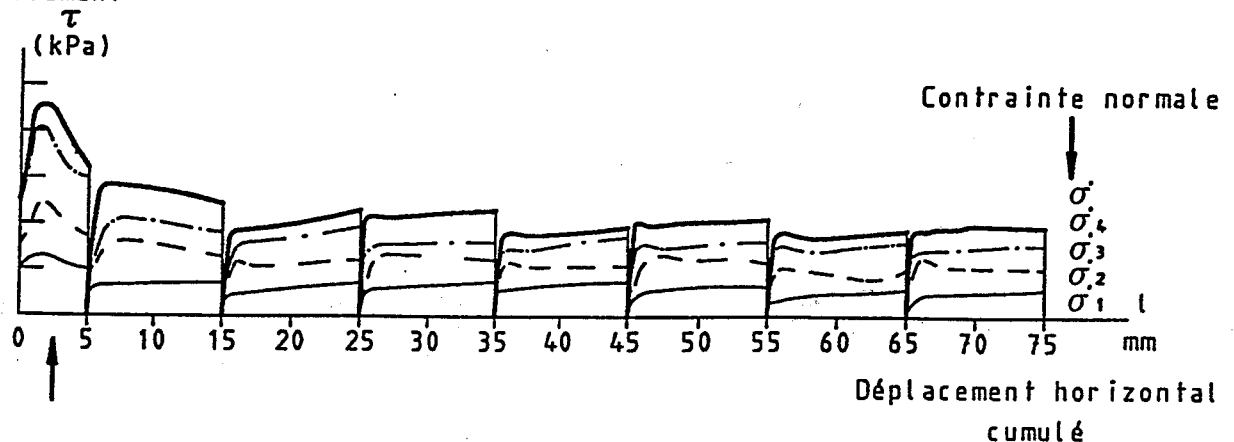


Fig 78 : Courbes représentatives de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal parcouru; exemple avec quatre éprouvettes.

In situ, l'état résiduel est obtenu en place par déplacement de cisaillement le long d'une surface de discontinuité, déplacement pouvant atteindre plusieurs mètres.

4.1.2. Principe du cisaillement alterné.

Les différences avec le cisaillement direct se font sur plusieurs points :

- le cisaillement se fait autour de la position initiale. Le premier cisaillement donne les mêmes caractéristiques intrinsèques du matériau que le cisaillement direct, mais ensuite les caractéristiques résiduelles sont obtenues par un déplacement donné, fixé à 8 ou 10 mm, soit sept cisaillements par essai ;
- il nécessite un système de mesure d'effort sans jeux et rigide, pour aborder le minimum de déformation à la boîte ;
- la durée de l'essai, du début de la consolidation à la fin du cisaillement, peut durer plusieurs semaines ;
- la particularité de la machine réside dans son système de chargement par vérin hydraulique travaillant à pression constante, et transmettant la charge au piston de la boîte par l'intermédiaire d'un bras de levier. Celui-ci permet de faire varier, par la position du vérin, la pression normale sur l'échantillon (le schéma est présenté en annexe 11). Les contraintes verticales vont de 0.5 en 0.5 bar jusqu'à 5 bars. (Photo 32).

Ce système réduit l'encombrement, de plus la vitesse de cisaillement est guidée par des petits moteurs interchangeables. La gamme varie de 0.0005 mm/mn à 0.004 mm/mn. C'est la demi boîte inférieure qui se déplace par rapport à la demi boîte supérieure (Figure 79). Deux plaques, à billes logées dans deux rainures en « V » diminuent le frottement et guident la translation dans l'axe de l'échantillon.

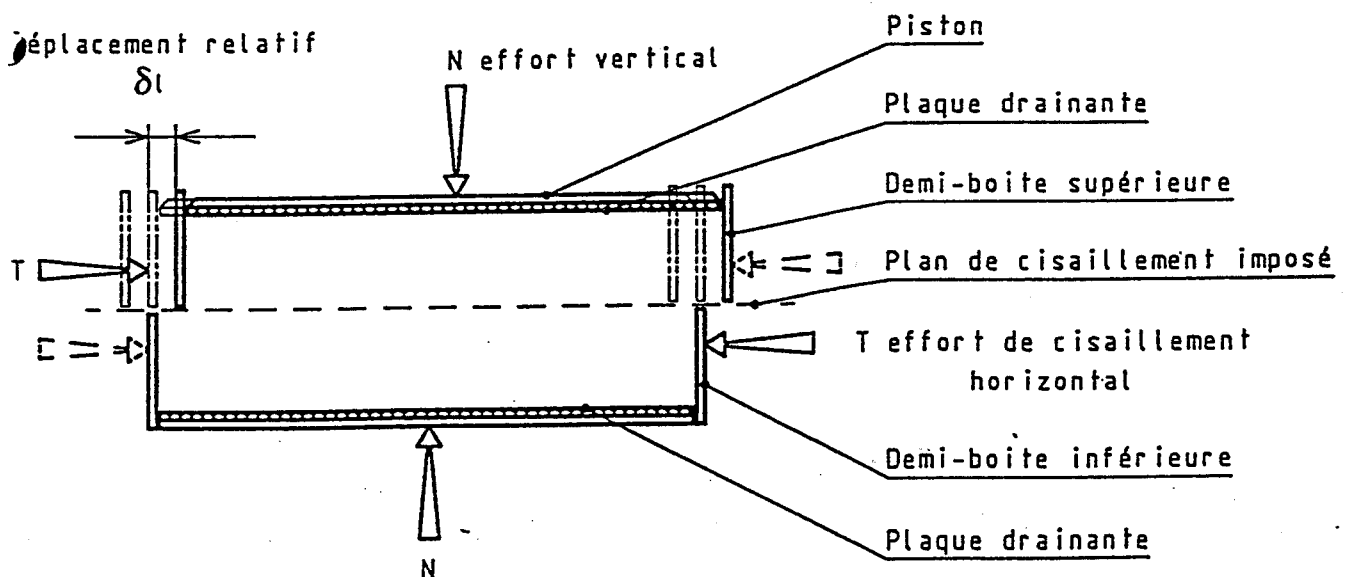


Fig 79: Principe d'un essai de cisaillement rectiligne alterné à la boîte.

Les mesures se font grâce à un anneau étalonné en traction/compression de 135 kg. La valeur de sa déformation est donnée au 1/1000e de mm. Un comparateur gradué au 1/100e de mm mesure la déformation réelle de l'échantillon car il est solidaire de l'anneau dynamométrique. Un deuxième comparateur de même graduation mesure le tassement gonflement durant l'essai.

Il est nécessaire d'avoir une centrale d'acquisition ou un appareillage qui trace automatiquement les courbes car l'essai dure longtemps. Pour ce qui est de la machine, l'automatisme d'aller et retour est assuré par deux rupteurs réglables qui transmettent l'inversion de sens de marche du moteur, par l'intermédiaire d'un condensateur.

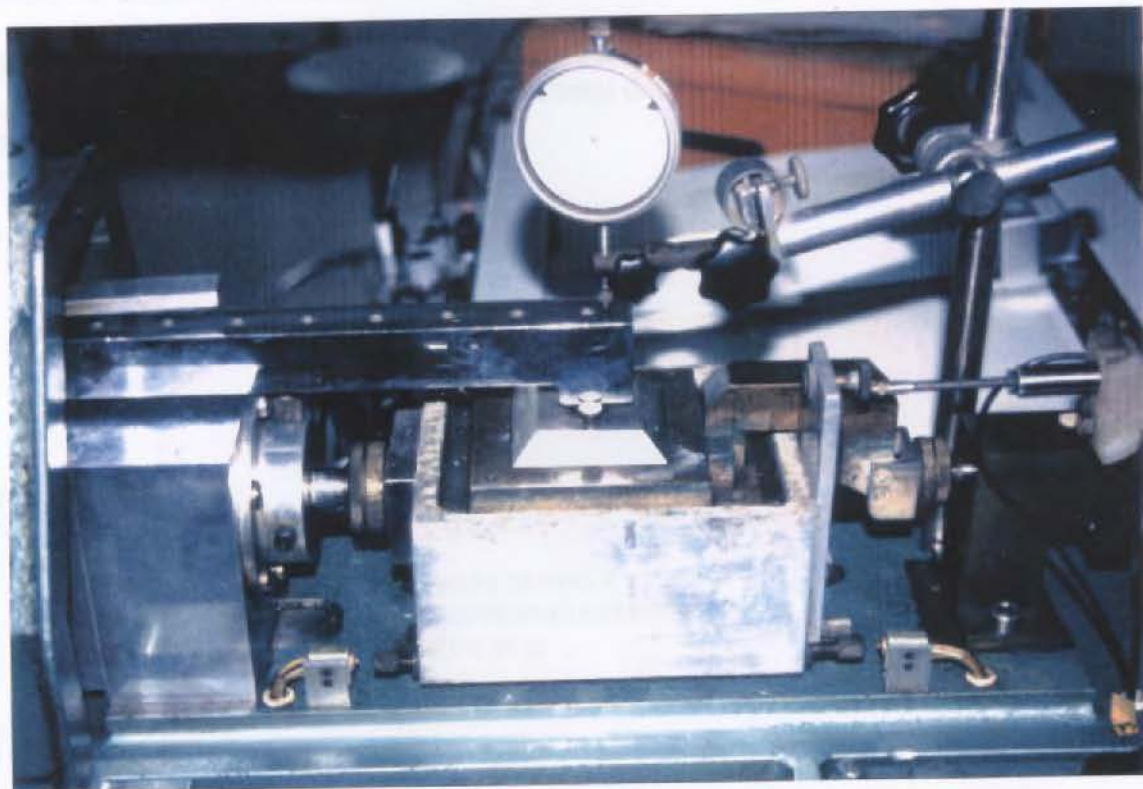


Photo 31: Machine de cisaillement alterné LRPC de Strasbourg.

4.2. Essai sur les marnes noires de la coulée

Les essais se sont fait au LRPC de Strasbourg. Seuls deux échantillons ont pu être cisailés. Le découpage des échantillons est le même que pour le cisaillement direct. La boîte de Casagrande, au lieu d'être ronde est carrée, soit une surface de 36 cm^2 . Les essais sont effectués dans des conditions drainées (CD). Les consolidations (6 jours au minimum) et les contraintes verticales soumises aux deux échantillons sont respectivement de 100 et 300 Kpa. Afin d'obtenir les caractéristiques à long terme, les cisaillements sont effectués à des vitesses très lentes (de 0.0005 mm/mn pour la première et la dernière alternance, et 0.0012 pour les alternances intermédiaires). Ce passage à des vitesses plus élevées est possible car l'échantillon, déjà cisailé, devient plus perméable et permet une bonne dissipation des

surpressions interstitielles, malgré des vitesses de cisaillements élevées. La course, définie de chaque côté de la position initiale de la boîte, est de 6 mm.

Les deux échantillons soumis à l'essai proviennent de la première fosse creusée au niveau du transect E (E4F1 0.30 m). Les courbes de déplacements cumulés et les courbes de Mohr sont présentées sur les figures 80 et 81. Quelques problèmes de variation de résistances ont été rencontrés au cours des essais. En effet la pression hydraulique avait tendance à varier en fonction de la température ambiante.

Logiquement, pour bien déterminer la courbe de Mohr, il faut trois points au minimum. Or, seulement deux essais ont été effectués. En considérant que la cohésion résiduelle est nulle, les deux points s'alignent très bien. Ceci nous permet de déduire un angle de frottement résiduel de 20° . Pour les critères de pic, en faisant passer la droite exactement par les deux points, les résultats paraissent tout à fait cohérents : L'angle de frottement est de 36° pour une cohésion de 20 Kpa.

On ne peut en aucun émettre des conclusions sur les résultats du cisaillement alterné car ils ne se basent que sur un essai (incomplet). Cependant, cet essai donne un aperçu des caractéristiques résiduelles des marnes de la coulée.

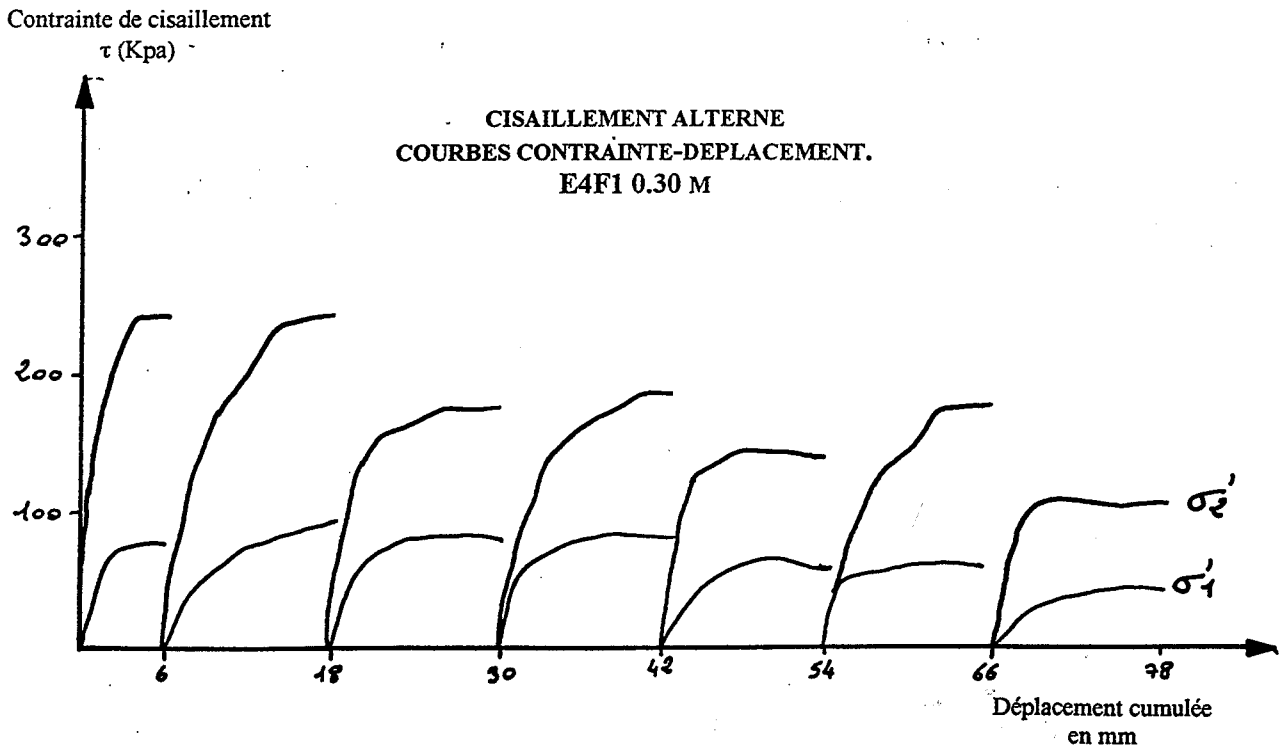


Fig 80 : Courbes de déplacements cumulés.

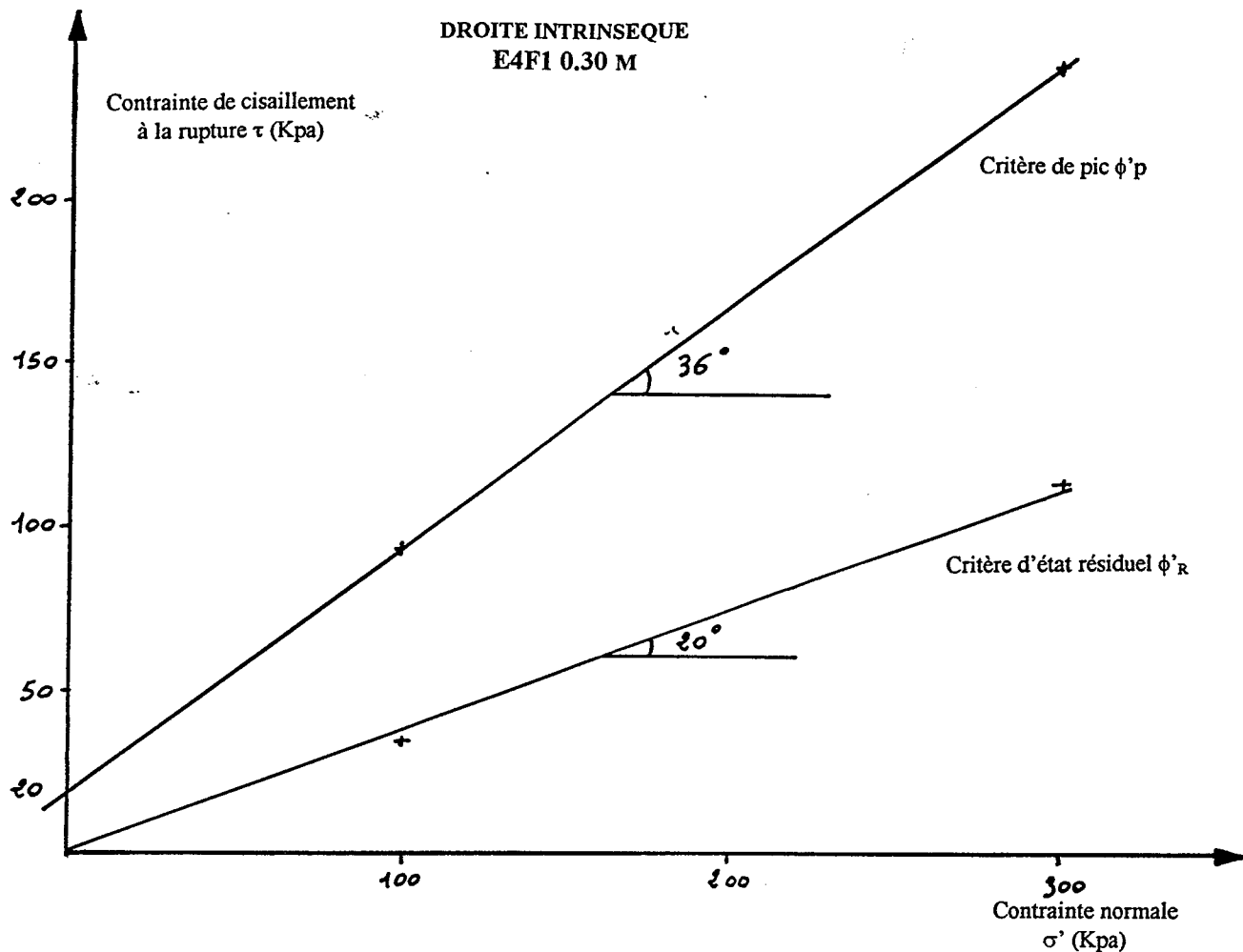


Fig 81 : Courbes de Mohr.

5. CONCLUSION

Les essais de cisaillement ont permis de connaître les caractéristiques intrinsèques à long terme de la coulée, à savoir la cohésion C et l'angle de frottement ϕ . Les matériaux de la coulée ont été soumis à trois types d'essais :

- **le cisaillement rectiligne à la boîte de Casagrande.** Les valeurs intrinsèques donnent une cohésion C de 8 Kpa et un angle de frottement ϕ de 33°. Les contraintes normales appliquées se situent entre 50 Kpa et 300 Kpa. Les marnes noires ne présentent donc pas de pic de rupture et les résultats sont semblables à ceux trouvés sur des marnes noires altérées (T.S.H. Phan, 1993). Des variations de résistances, observées sous des mêmes contraintes normales, s'expliquent par la présence d'éléments grossiers sur la surface de rupture. Les contraintes maximales correspondent plus à un réarrangement des grains qu'à une réelle rupture. Il faudrait donc réaliser des cisaillements dans des boîtes de plus grande dimension (10 cm de diamètre) afin de prendre en compte les éléments grossiers. Une plus grande boîte permettrait aussi d'atteindre des déplacements de plus grande amplitude qui permettraient d'obtenir un pic correspondant plus à la rupture des paillettes marneuses. Pour avoir de bonnes caractéristiques à long terme, il faut aussi diminuer les vitesses de cisaillement pour qu'elles soient inférieures à 0.005 mm/mn ;

- **le cisaillement triaxial.** Un seul essai consolidé non drainé avec mesure de pression interstitielle a été effectué sur un échantillon remanié à l'optimum Proctor. On obtient un angle de frottement effectif de 24° pour une cohésion de 50 Kpa. Ce résultat ce doit d'être complété par d'autres essais effectués sur des matériaux de la coulée ;

- **le cisaillement alterné** permet de donner les caractéristiques résiduelles des matériaux de la coulée, soit une cohésion résiduelle considérée comme nulle et un angle de frottement résiduel de 20° .

Ces résultats se doivent donc d'être améliorés par plus d'essais et par la prise en compte des éléments grossiers.

CONCLUSION GENERALE

A ce jour, les caractéristiques physiques, déterminées en laboratoire sur des marnes noires, sont de mieux en mieux définies. Il apparaît donc nécessaire de faire un bilan des connaissances acquises jusqu'à maintenant et des questions qui restent en suspens.

- Les teneurs en eau naturelles moyennes sont de 13 % et ne dépassent pas un maximum de 18%. Les résultats des limites d'Atterberg (W_p : 32% et W_L : 17%) définissent les marnes noires comme étant peu plastiques. Ceci confirme les résultats obtenus par D. Herrmann (1997). Il est important de remarquer que les teneurs en eau naturelles atteignent rarement la limite de plasticité.

Les poids spécifiques secs et humides des matériaux de la coulée sont respectivement de **18.9 KN/m³** et de **21.4 KN/m³**. Les résultats sont statistiquement fiables car ils ont été obtenus à partir de plus de 20 échantillons. **Les poids spécifiques secs obtenus sur des plaquettes marneuses cohérentes sont en moyenne de 17.8 KN/m³**, mais ils doivent être complétés par d'autres essais. Il nous est encore difficile de déterminer les causes des fortes variations des résultats.

- Comme nous pouvions le prévoir à travers les observations de surface, les marnes noires de la coulée sont très altérables (**coefficient d'altérabilité de 77 %**). Elles sont, au préalable, fragilisées par :

- **la tectonisation** (Alexandre A., 1995) qui commande les plans de fracturation élémentaires de la roche (Schistosité et linéation). Cette micro-tectonisation explique la forme des débris rencontrés en surface (plaquettes, frites et écailles) ;

- **les décompressions** subies à l'échelle des temps géologiques par l'érosion, au sens large du terme, et à la suite de glissements structuraux. Le foisonnement des blocs de la coulée est relativement important ;

- Le taux de carbonate des marnes noires, en moyenne de 34%, et leur cortège argileux (peu d'argiles gonflantes) **contribuent à les rendre plus fragmentables**, sans pour autant en être les facteurs principaux.

Les panneaux marneux de la coulée sont donc sévèrement attaqués en surface et en subsurface par les processus climatiques, qui sont principalement l'**hydroclastie** (alternances humectation/dessiccation) et la **cryoclastie** (alternances gel/dégel). Les essais en laboratoire ont montré qu'il suffisait d'une trentaine de cycle gel/dégel ou humectation/dessiccation pour transformer des plaquettes marneuses pluridécimétriques en un amas de débris inférieurs au centimètre. **L'altérabilité des panneaux marneux contribue à alimenter rapidement la coulée, en surface et en subsurface, d'une multitude de débris.**

Plusieurs modifications méthodologiques ont été apportées à l'analyse granulométrique, afin de prendre en compte l'altérabilité des marnes noires et l'hétérogénéité de la coulée. Elles consistent essentiellement à prélever les matériaux en surface de la coulée et sur des quantités importantes (30 kg au minimum sont nécessaires). Avec cette méthode, les fines ($> 50 \mu\text{m}$) représentent 10% et les éléments grossiers ($> 2 \text{ mm}$), près de 45 %. Cependant, les granulométries ont été réalisées sur des quantités allant de 4 kg à 177 kg et il semble que, **plus la quantité de matériaux est importante, plus les fines sont minorées**. Les résultats obtenus par D. Herrmann, en suivant le protocole habituel, semblaient exagérer les fines (73% inférieures à $50 \mu\text{m}$) et minorer les éléments grossiers (26 % supérieurs à 2 mm).

• **Des essais de compactage** (essai Proctor) ont permis de déterminer les valeurs de la densité sèche maximale de la marne remaniée pour la teneur en eau optimale, **soit 19.2 KN/m³ pour une teneur en eau de 12 %**. Le degré de compacité des marnes noires s'avère élevé (80 à 100%). Soumis à l'essai oedométrique, les marnes noires de la coulée apparaissent comme peu compressibles et surconsolidées.

Les caractéristiques intrinsèques à long terme (cohésion C et angle de frottement φ) ont été déterminées à partir d'essais de cisaillement rectiligne à la boîte de Casagrande, soit :

$$\varphi = 33^\circ$$
$$C = 8 \text{ Kpa.}$$

Les caractéristiques résiduelles ont pu être approchées par un essai de cisaillement alterné, soit :

$$\varphi = 36^\circ \text{ et } \varphi \text{ résiduel} = 20^\circ$$
$$C = 20 \text{ Kpa et } C \text{ résiduel} = 0 \text{ (estimé)}$$

Un essai triaxial de type CU + U (consolidé non drainé avec mesure de pression interstitielle) à aussi pu être effectué. Il donne les caractéristiques suivantes :

$$CU = 55 \text{ Kpa et } C'U = 50 \text{ Kpa}$$
$$\varphi U = 20^\circ \text{ et } \varphi'U = 24^\circ$$

Par mesure de sécurité, pour un éventuel calcul de stabilité, il est préférable de se baser sur les résultats obtenus par le cisaillement rectiligne à la boîte, car plusieurs essais ont été effectués. Les résultats des deux autres types de cisaillement, obtenus à partir d'un seul échantillon, ne peuvent pas présenter un appui statistique correct.

Cependant, ces résultats nécessitent de nombreuses améliorations au niveau de la méthodologie et de l'adaptation du matériel à utiliser, à savoir :

- le prélèvement des matériaux pour le calcul des teneurs en eau naturelles, devrait toujours être faits dans des pots fermés hermétiquement. La détermination des poids humides in situ, avec une balance de précision (au 1/10e de gramme), munie d'une batterie, apporterait encore plus de précision ;

- la plupart des essais demandent un prédécoupage des éprouvettes (cisaillements) et nécessite un matériau homogène. L'hétérogénéité de la coulée est donc un problème quant à la détermination de tous les essais. La variation des résultats est souvent assez forte, alors que les prélèvements se sont faits au même endroit et à une même profondeur. Le problème se pose notamment pour les poids spécifiques, déterminés à partir de prélèvements effectués dans des carottiers métalliques de 251.3 cm³. Des carottiers métalliques de plus grandes dimensions permettraient de mieux considérer l'hétérogénéité de la coulée. Un cylindre de 15 cm de diamètre et de 10 cm de hauteur, soit un volume de 1800 cm³, serait plus adéquat. De plus, il permettrait, pour les essais triaxiaux, de tailler les éprouvettes aux bonnes dimensions;

- les essais hydroclastiques ont démontré que, **dès le premier cycle, les plaquettes marneuses se désagrègent**. Or, la méthode granulométrique adaptée nécessite encore trop de passage des particules dans l'eau. Des solutions semblent difficiles à trouver pour ne plus soumettre les particules à des phases d'humectation/dessiccation lors de la granulométrie car, il faut aussi séparer les particules entre elles ;

- les boîtes de Casagrande de 36 cm², utilisées pour le cisaillement rectiligne, ne permettent pas non plus d'accepter les éléments grossiers. Des plus grosses boîtes seraient mieux adaptées (10 cm de diamètre) ;

- l'essai de compactage des matériaux de la coulée, réalisé dans un moule proctor normal, ne fut pas très satisfaisant pour la détermination du degré de compacité (> à 100%). T.S.H. Phan (1993) a aussi effectuée ce type d'essai sur des marnes noires, mais dans un moule de plus grande dimension (type CBR). En adaptant les résultats obtenus par cet auteur aux poids spécifiques de la coulée, les degrés de compacités semblent mieux appropriés (80 à 100%).

Un axe important qui n'a pas été abordé dans ce travail, est la caractérisation hydro-dynamique des matériaux de la coulée. Elle pourra se faire par la détermination de courbe de rétention hydrique K(h) et de courbe de conductivité hydraulique. Quelques mesures de conductivité hydraulique à saturation K_{sat} ont été réalisées sur les matériaux de la coulée par M. Bohy (1998). Ces essais se doivent cependant d'être poursuivis.

La détermination des caractéristiques intrinsèques demande encore de nombreuses précisions. De nouveaux essais de cisaillement rectiligne à la boîte de Casagrande et des essais triaxiaux doivent être continués.

Les terres noires ont un 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 (Phan T.S.H, 1993). Il serait donc intéressant de lancer quelques observations au microscope électronique à balayage (M.E.B).

Lume Minca

Il semble indispensable de continuer les analyses granulométriques, mais cette fois sur tous les transects (A, B, C, D et E), afin de pouvoir mettre en place une relation entre la granulométrie et l'évolution de la coulée d'amont en aval.

Enfin, un dernier point consisterait à continuer l'exploration du devenir des blocs, d'amont en aval et de la surface vers la profondeur, notamment avec l'observation des blocs sur les versants ou dans le fond des ravines intra-coulées. Ceci implique aussi la poursuite des recherches en laboratoire sur les processus responsables de l'altérabilité des marnes noires mais en rapport avec les conditions de terrain.



BIBLIOGRAPHIE

CARTES

CARTES TOPOGRAPHIQUES 1/25 000 de Jausiers Le Sauze, Institut Géographique National, 1989.

CARTE GEOLOGIQUE 1/50 000 de Barcelonnette, BRGM.

CARTE GEOMORPHOLOGIQUE 1/1 000 du glissement de Super-Sauze, dressée par J.C FLAGEOLLET, O. MAQUAIRE & D. WEBER, 1995.

OUVRAGES ET PERIODIQUES

ALEXANDRE A., 1995. « Suivi expérimental du ravinement des marnes dans les Baronnies. » N°23, travaux du Laboratoire de géographie physique, Paris, 154 p.

AL HAYARI M., P. ANTOINE, G. BIGUENET, J. MONNET, H. MORA., 1990. « Détermination des caractéristiques mécaniques au cisaillement des argiles litées : cas du glissement de la combe d'Harmalière. » Revue Française de Géotechnique, n° 50, pp. 71-77.

AL HAYARI M., 1989. « Une détermination des caractéristiques mécaniques résiduelles de versants naturels. Méthodes à l'équilibre limite et des éléments finis. » Thèse de doctorat, université Joseph Fournier, Grenoble I, 214 p.

ARTRU P., 1972. « Les terres noires du Bassin rhodanien (Bajocien supérieur à Oxfordien moyen) : stratigraphie, sédimentologie, géochimie. Thèse de doctorat, université Claude Bbernard, Lyon, 182 p.

AWONGO M.L., 1984. « Stratigraphie, Sédimentologie et géochimie des terres noires du Jurasique moyen et supérieur de la Provence (Sud-est de la France). Thèse de doctorat, mention sédimentologie. Université Aix-Marseille, 180p

BALLAIS J.L., 1996. « L'âge du modelé des roubines dans les préalpes du Sud : exemple de la région de Digne. » Géomorphologie, relief, processus, environnement, 1996, n°4 pp 61-68.

BLANCHET F., 1988. « Etude géomécanique de glissements de terrain dans les argiles glacio-lacustres de la vallée du Drac. » Thèse de doctorat. université J. Fournier, Grenoble, 157p.

BLONDEAU & JOSSEAUME, 1976. « Mesure de la résistance au cisaillement résiduelle en laboratoire. » Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées. n° spéciale II. pp. 90-106.

BRYAN R.B., YAIR A., HODGES W.K., 1978. « Factor controlling the initiation of runoff and pipping in Dinosaur Provincial Park badlands, Alberta, Canada. » Géomorphologie Zeitchrift. Supplement n° 29. pp. 151-168.

BUFALLO M., 1989. « L'érosion des terres noires dans la région du Buëch (Haute-Alpes, France). » Thèse de doctorat. Univesité Aix-Marseille III, 230p.

CARTIER G., 1983. « Relation entre la pluviosité et le déclenchement des mouvements de terrain. » Bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées, n°124. pp.

CARIS J.P.T. et VAN ASCH. T., 1991. « Géophysical, géotechnical and hydrological investigations of a small landslide in the French Alps. ». Engineering geology 31, pp 249-276.

CHODZKO J., LECOMPTE. M., 1992. « Ravinement dans les Baronnies. » n°20, travaux du laboratoire de géogtraphie physique. Paris. 111p.

COLAS G. & LOCAT J., 1993. « Glissement et coulée de La Valette dans les Alpes de Hautes-Provence. » Bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées. n° 187. pp 19-28.

Breheret
1994

- DARVE F., « Rupture d'argiles naturelles par surfaces de cisaillement à l'essai triaxial. » Revue Française de Géotechnique.
- DEVEAUX D., VUEZ A., AMOROS D., MIEUSSENS C., DUCASSE P. 1981. « Essais triaxiaux à chargement contrôlé. » Bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées. Spéciale XI F. pp
- DELAHAYE A. & LEROUX., 1975. « Désordre sur les remblais en marnes » Bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées. n° 75. pp. 113-124.
- DESCROIX L., 1985. « Contribution à l'étude de la dynamique érosive dans les baronnies orientales et les pays du Buëch moyen. Problème d'aménagement. » Thèse de doctorat. Université de Lyon II. 260p. ✓
- DESCROIX L., 1994. « L'érosion actuelle dans la partie occidentale des Alpes du Sud » Thèse de Doctorat, Université de Lyon II. ✓
- D.U.T.I., 1985 « rapport final. » Ecole polytechnique fédérale de lausanne. 229p.
- EVIN M., 1994 « Géologie de L'ubaye » Edité par l'association *sabença de la Valeia*. 30p.
- FINLAYSON B.L., GERITS J., VAN WESEMAEL B., 1987. « Crusted microtopographie on badlands slopes in southest Spain. » In *Catena*. Vol 14, pp131-144.
- FILLIAT G. & CAMELAN J.C. « Analyses et essais de sols en laboratoire. » Chap n°5: pratique des sols et fondations. pp 157-196.
- FLAGEOLLET J.C. MAQUAIRE O. & WEBER D., 1996. Stage in the development of the Super-Sauze landslide. workshop : « Landslides and Flash flood ». Barcelonnette- vaison la Romaine, 30 sept.-3 oct. 1996, pp 5-7.
- FLAGEOLLET J.C. MAQUAIRE O. & WEBER D.(1996). Géotechnical investigations into the Super-Sauze landslide. Géomorphological and hydrogeological results. Workshop : « Landslides and Flash flood ». Barcelonnette-vaion la romaine, 30 sept.-3 oct. 1996, pp 30-39.
- GARNIER P. & LECOMPTE M., 1996. « Trials carried out on the désintégration méchanisms of marls in the Baronnies Mountains (Southern Alps, France). Géomorphologie, relief, processus, environnement. n°1 pp23-50.
- GAZIEV E., MOROZOV A., CHAGANIAN V., 19 . « Comportement expérimental des roches sous contraintes et déformations triaxiales. » Revue Française de Géotechnique.n°29 pp 43-48.
- GAUDIN B., FOLACCI J.P., PANET M., SALVA L., 1981. « Soutènement d'une galeries dans les marnes du cénonanien. » Bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées. Spécial XI. pp 11-27.
- GENET J. et MALET J.P., 1997 « Détermination de la structure tri-dimensionnelle du glissement de terrain de Super-Sauze par une investigation géotechnique ». Mémoire de maîtrise en géographie physique. Strasbourg, ULP. 138p.
- GIGAN J.P., 1974. « Relation entre composition, texture et quelques propriétés géotechniques des marnes et caillasses du lutétien superieur. » Bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées. n° 72. pp.
- Guide technique Du laboratoire des ponts et chaussée. 1998. « Stabilisation des glissements de terrain. » 96p.
- HERMANN D., 1997. « Recherche des caractéristiques physiques et géotechniques des terres noires du glissement de terrain de Super-Sauze (Alpes de Haute-Provence). » Mémoire de maîtrise en géographie physique, Strasbourg ULP.
- LAUTRIDOU J.P. & OZOUF J.C., 1987. « Définition de normes d'analyses physiques de roche. ». Acquisition nouvelles sur la porosité et sur la perméabilité des roches au cours des dix dernières années. CNRS de Caen. 30p.
- Etude critique des normes employées, proposition de nouvelles normes. CNRS de Caen 46p.

« La vallée de Barcelonnette. » 1980. Bulletin de la société scientifique et littéraire des Alpes de Haute-Provence. Tome XLIX, n°289. 290p.

LEGIER A., 1977. « Mouvements de terrain et évolution récente du relief dans la région de Barcelonnette (Alpes de Haute Provence). Thèse de Doctorat. Université Joseph Fournier. Grenoble. 163p.

LE TIRANT P., 1964. « Appareillage triaxial pour l'étude des sols fins » Bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées. n°10, 11p.

MAQUAIRE O., 1990. « Les mouvements de terrain de la côte du calvados. Recherche et prévention. » Document du BRGM, n° 197. 431p.

« Météorologie et terrassement. » SETRA

MOTTET G., 1993. « Géographie physique de la France. » Presse Universitaire de France. 655p

MALLET J.P., 1998. « Caractérisation et modélisation hydro-mécanique du glissement-coulée de Super-Sauze dans l'optique de la gestion du risque » Mémoire de DEA, 176p.

OLIVRY J.C. & HOORELBECK, 1989-1990. « Erodabilité des terres noires de la vallée du Buëch (France, Alpes du Sud). » Cahier ORSTOM, série pédologique, vol XXV, n°1-2. pp 95-111.

PHAN S.H., 1993. « Propriétés physiques et caractéristiques géotechniques des terres noires du Sud-Est de la France. » Thèse de doctorat, université Joseph Fournier. Grenoble I. 246p.

PHILIPPONNAT G., 1987 « Fondations et ouvrages en terre. » Eyrolles, Paris. 402p.

« Réalisation des remblais et des couches de forme ». Fascicule I. Principes généraux.

« Processus de gélifraction sur sol calcaire. »

Projet de D.T.U. « étude géotechnique et reconnaissance des sols. » Revue Française de Géotechnique. n°22. Presse des ponts et chaussées. pp 121-143.

« Recherche de gélifraction expérimentale du centre de géomorphologie. » 1974. Centre de géomorphologie de Caen. Bulletin n°18 (31p) et n° 19 (42p).

TERZHAGI K. & PECK R.B., 1965. « La mécanique des sols appliquée. » Dunod, Paris. 565p.

TOURENQ C. « Gélivité des roches, application aux granulats » Mars, 1970. Laboratoires des ponts et chaussées. Rapport de recherche n°6. 55p

VERDEYEN J., ROISIN V., NUYENS J., 1968. « Mécanique des sols. » Presse universitaire de Bruxelles et Dunod, Paris. 508p

NORMES

Association Française de normalisation (AFNOR), 1991. Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale des sols-Méthode par étuvage. NF P 94-050.

Association Française de normalisation (AFNOR), 1991. Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire-Méthode de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau. NF P 94-053.

Association Française de normalisation (AFNOR), 1992. Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique des sols-Méthode par sédimentation. NF P 94-057.

Association Française de normalisation (AFNOR), 1993. Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. NF P 94-051.

Association Française de normalisation (AFNOR), 1993. Sols : reconnaissance et essais. Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol. NF P 94-093.

Association Française de normalisation (AFNOR), 1994. Sols : reconnaissance et essais. Essai de cisaillement rectiligne à la boîte (cisaillement direct). NF P 94-071-1.

Association Française de normalisation (AFNOR), 1994. Sols : reconnaissance et essais. Essai de cisaillement Alterné. NF P 94-071-2.

Association Française de normalisation (AFNOR), 1994. Sols : reconnaissance et essais. Essais à l'appareil triaxial de révolution. NF P 94-074.

Association Française de normalisation (AFNOR), 1992. Sols : reconnaissance et essais. Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux. NF P 94-067.

Modes opératoires du laboratoire central des ponts et chaussées. Essai de compressibilité à l'oedomètre. Mode opératoire MMS. L-2. Dunod, paris, 1970.

ANNEXE 1

LA TENEUR EN EAU NATURELLE (NF P 94-050).

Matériels :

- balance de précision (1/10e ou 1/1000e de gramme) ;
- spatule ;
- barquettes en aluminium ;
- étuve (105°C).

Protocole :

- 150 à 500 g. de matériaux prélevés par échantillon selon la méthode du quartage (homogénéiser l'échantillon puis le diviser en quatre et en prélever le quart) ;
- pesée d'une barquette en aluminium (tare) puis la masse totale humide (échantillon + tare) ;
- passage à l'étuve pendant 48 heures à 105°C ;
- masse totale sèche (pesée rapide afin d'éviter une réhumidification de l'échantillon à l'air libre) ;
- calcul des masses humide et sèche.

ANNEXE 2

LES POIDS SPECIFIQUES (NF P 94-053)

Définition :

La masse volumique d'un sol ρ est le quotient de la masse (m) par le volume (V) qu'il occupe.

$$\rho = m/V$$

Pour le volume, deux méthodes sont utilisables : La méthode géométrique et la méthode par pesées.

Appareillage :

- Méthode la trousse coupante :

- trousse coupante circulaire, rigide et aux dimensions adaptée à la nature du matériau ;
- règle à araser ;
- balance de précision (comme pour les teneurs en eau).

- Méthode par pesée :

- une balance de précision (comme pour les teneurs en eau) munie d'un étrier et d'un panier pour les pesées hydrostatiques ;
- un bac de paraffine avec son système de chauffage ;
- un récipient rempli d'eau déminéralisée pour immerger le panier à l'étrier de la balance ;
- un thermomètre de contrôle.

Mode opératoire :

- Méthode la trousse coupante :

Prélèvement de matériaux (0.1 à 1.5 kg) par poinçonnement en appliquant une pression sur la trousse. Les faces de la prise d'essai sont ensuite arasées aux extrémités. La trousse coupante étant pesée au préalable (m_2), l'ensemble trousse coupante et sol est pesé (m_1).

$$\rho = (m_1 - m_2)/V$$

- Méthode par pesée hydrostatique :

La masse de l'échantillon doit être entre de 0.1 et 0.5 kg. Il peut être nécessaire de la tailler afin de pouvoir le paraffiner facilement. L'échantillon est pesé (m) et il est paraffiné tout de suite. Une fois revenue à la température de la salle, il est pesé (m_p), puis il est placé dans le panier suspendu à l'étrier de la balance et est immergée afin d'être pesée (m_p') avec la balance hydrostatique.

$$V = (m_p - m_p')/\rho_w - (m_p - m)/\rho_p$$

ρ_w = masse volumique de l'eau, ρ_p = masse volumique de la paraffine (880 kg/m³).

ANNEXE 3

LIMITE D'ATTERBERG (NF P 94-051)

- la limite de liquidité Wl sépare l'état liquide de l'état plastique ;
- la limite de plasticité Wp sépare l'état plastique de l'état solide ;
- la limite de retrait Ws sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait.
- l'indice de plasticité Ip définit l'étendue du domaine plastique;

$$Ip = Wl - Wp$$

- l'indice de consistance Ic relative est défini par la relation ;

$$Ic = (W - Wp) / Ip$$

Préparation du matériau :

Immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 12 heures au minimum puis tamisage par voie humide à l'aide du tamis 0.40 mm. En cas de présence d'une phase liquide trop importante, séchage préalable de l'échantillon à l'air libre.

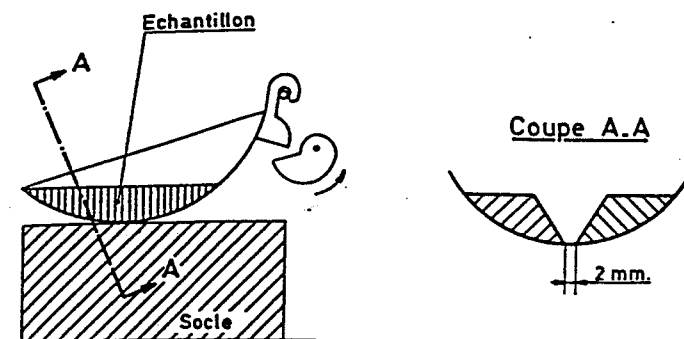
Détermination de la limite de liquidité :

On utilise l'appareil de Casagrande. La coupelle sphérique est remplie de matériau. On trace, à l'aide d'un outil spécial, une rainure dans le sens longitudinal. On fait ensuite subir à la coupelle une série de chocs égaux réguliers jusqu'à ce que la rainure se soit refermée sur longueur de 1 cm. On note le nombre de coups N appliqués, puis on effectue un prélèvement de la pâte et on détermine la teneur en eau. On réalise au minimum trois opérations successives. Le nombre de coup doit se situer entre 15 et 35. Le couple de valeur (N ; W) permet de déterminer la valeur moyenne sur un graphique.

Détermination de la limite de plasticité.

Il s'agit de former, à l'aide d'une plaquette en bois, un rouleau de pâte que l'on amène progressivement à trois mm de diamètre. Par définition, on dit que la teneur en eau de la pâte est la limite de plasticité lorsqu'en soulevant légèrement le rouleau par le milieu, il se fissure et se casse. Ce rouleau est pesé et mis à l'étuve pour déterminer sa teneur en eau.

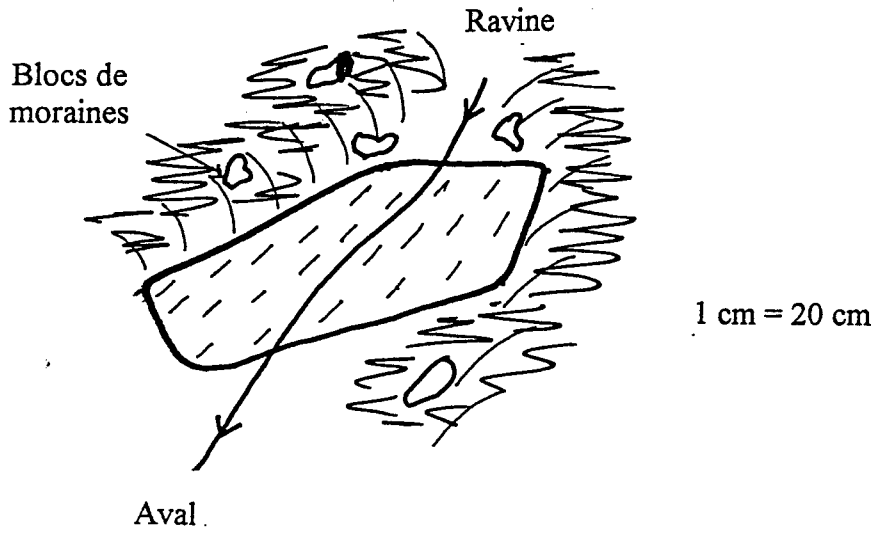
Schéma de l'appareil de Casagrande.



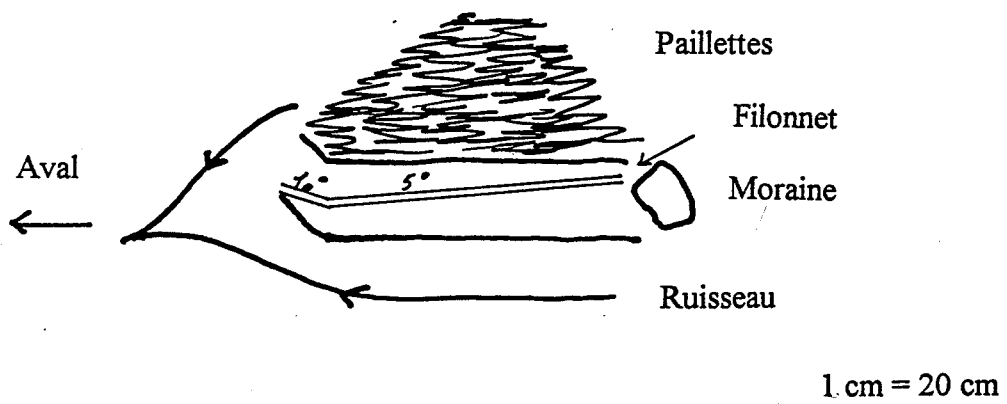
ANNEXE 4.

SCHEMAS DES BLOCS REPERTORIES DANS LES RAVINES DE LA COULEE.

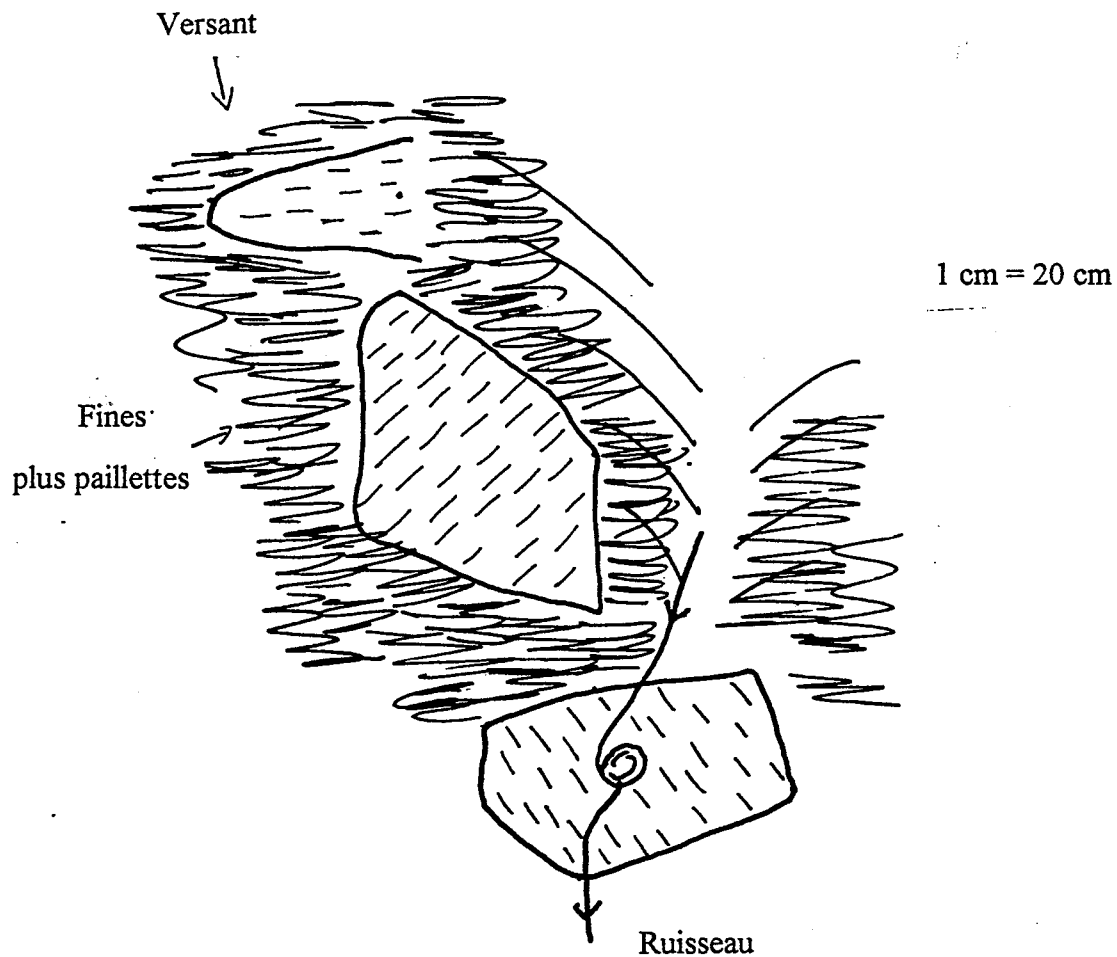
BLOC 1



BLOC 2

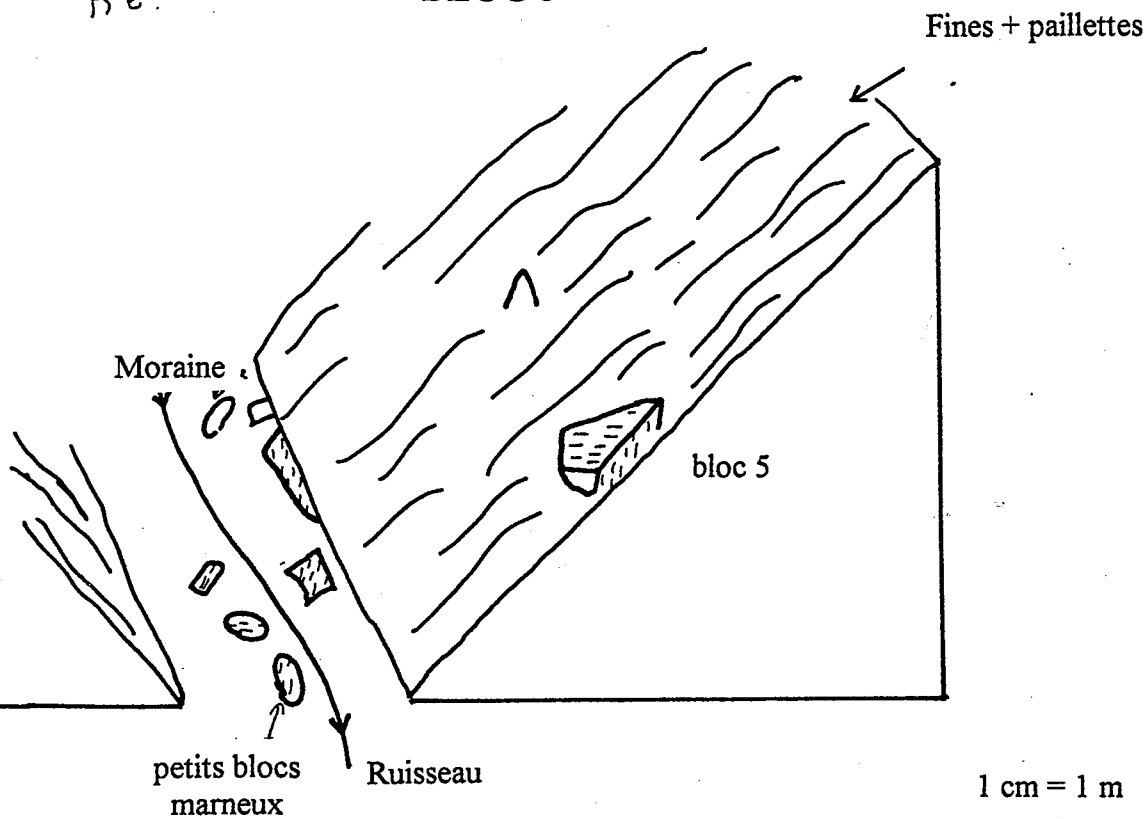


BLOC 4

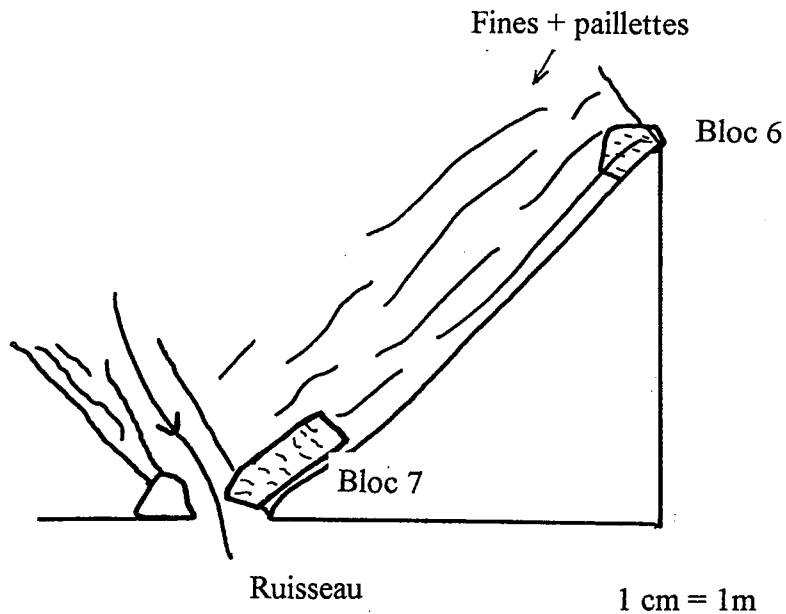


B 2.

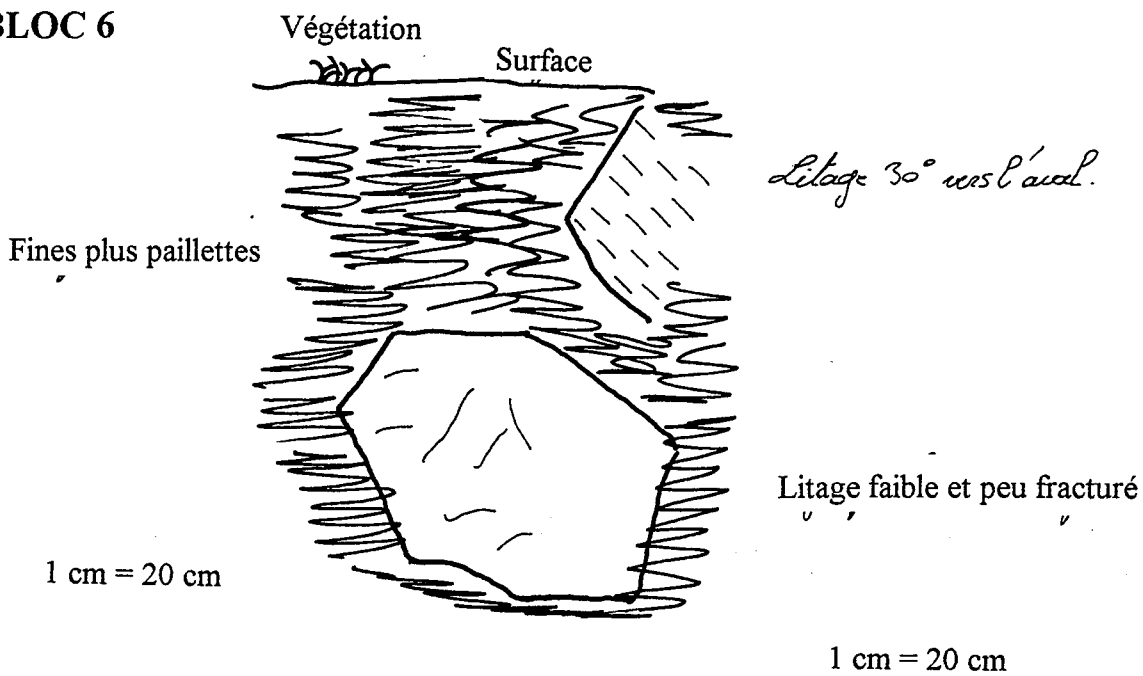
BLOC 5



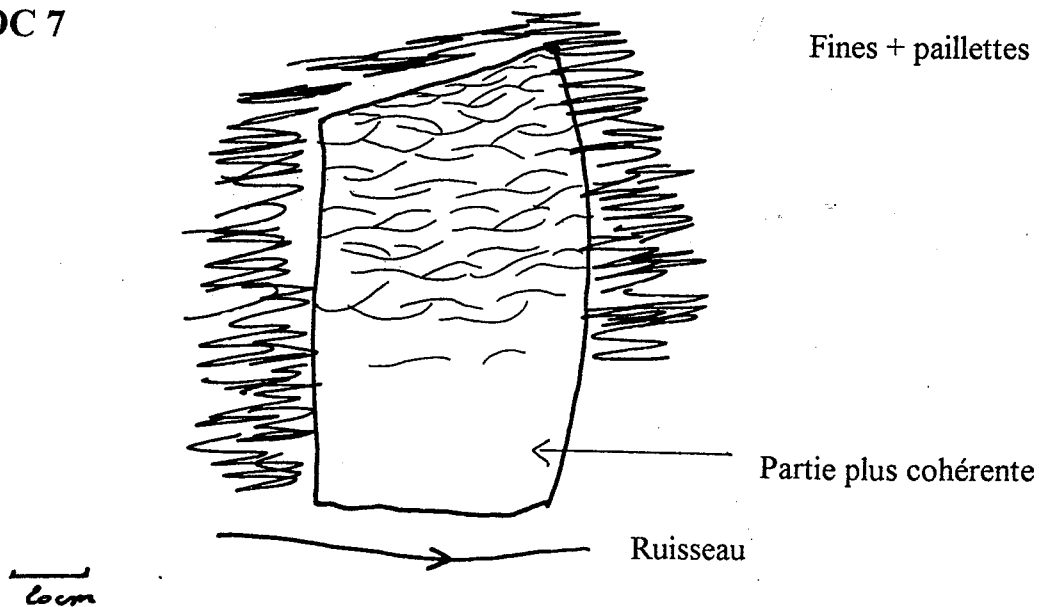
BLOC 6-7.

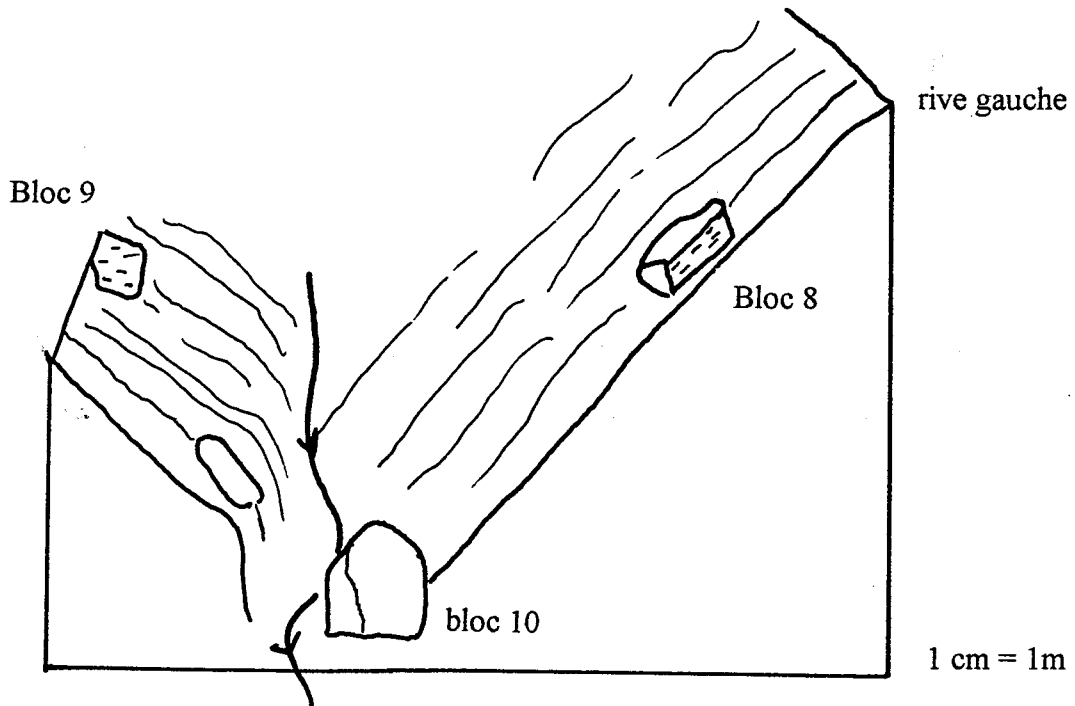


BLOC 6



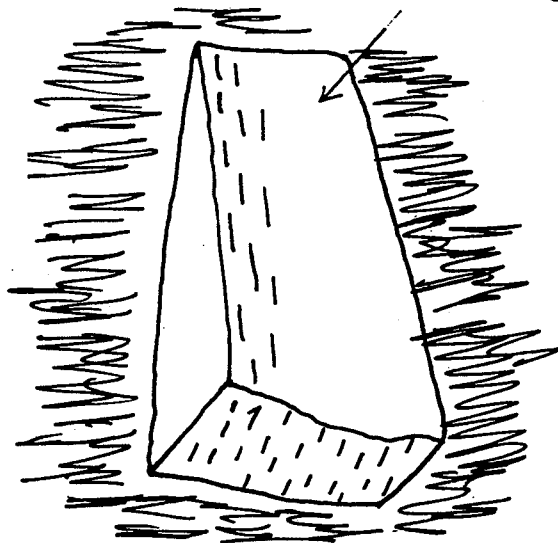
BLOC 7



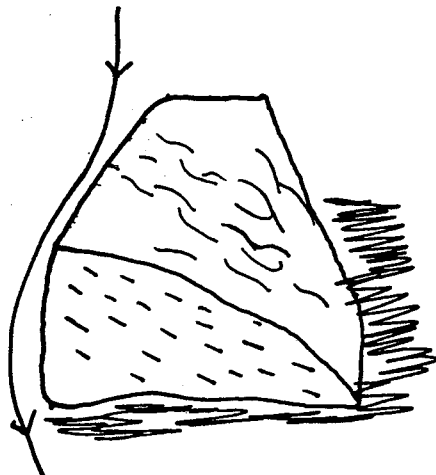


BLOC 8

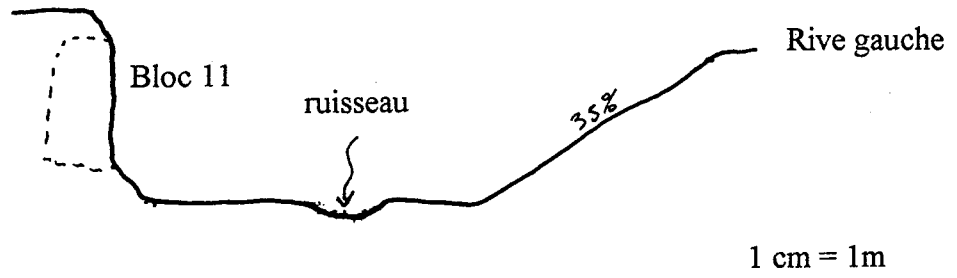
Zone dégagée et cohérente



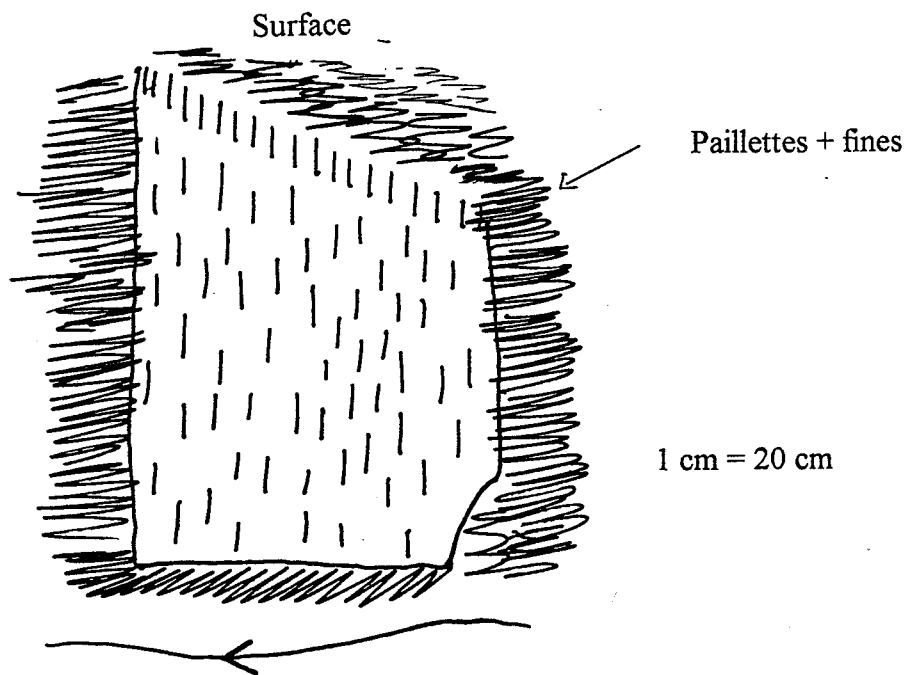
BLOC 10



BLOC 11



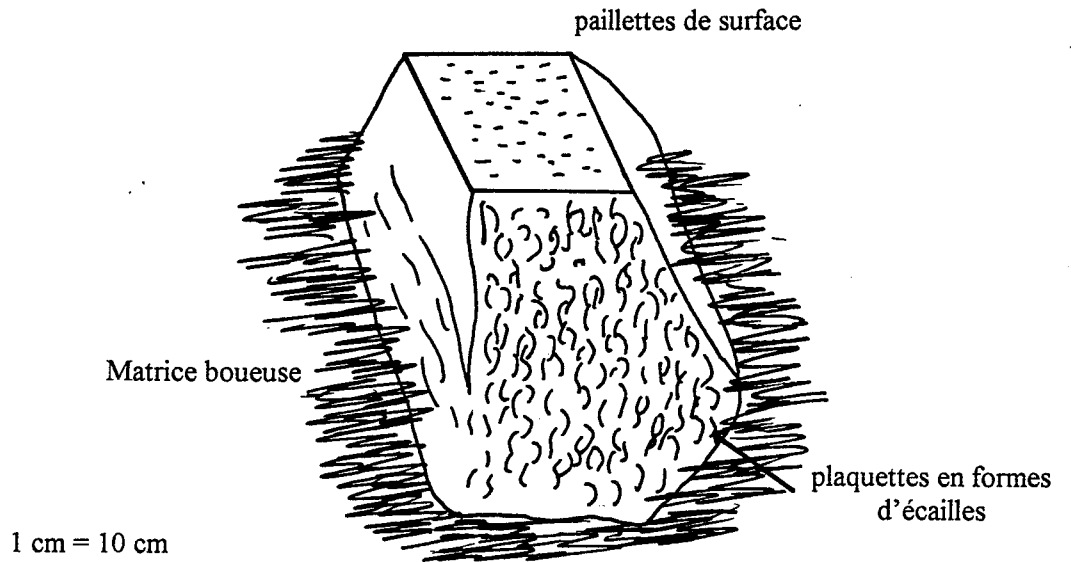
Vue de face



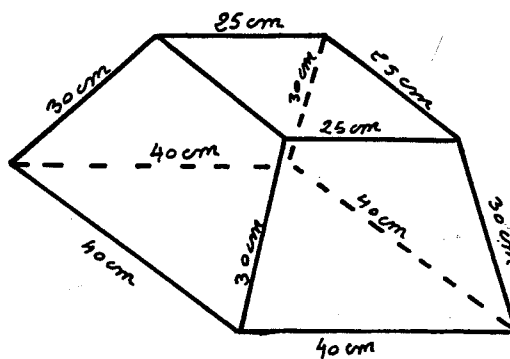
ANNEXE 5

LES BLOCS SUR LESQUELS ONT ETE EFFECTUES LES COEFFICIENT DE FOISSONNEMENT.

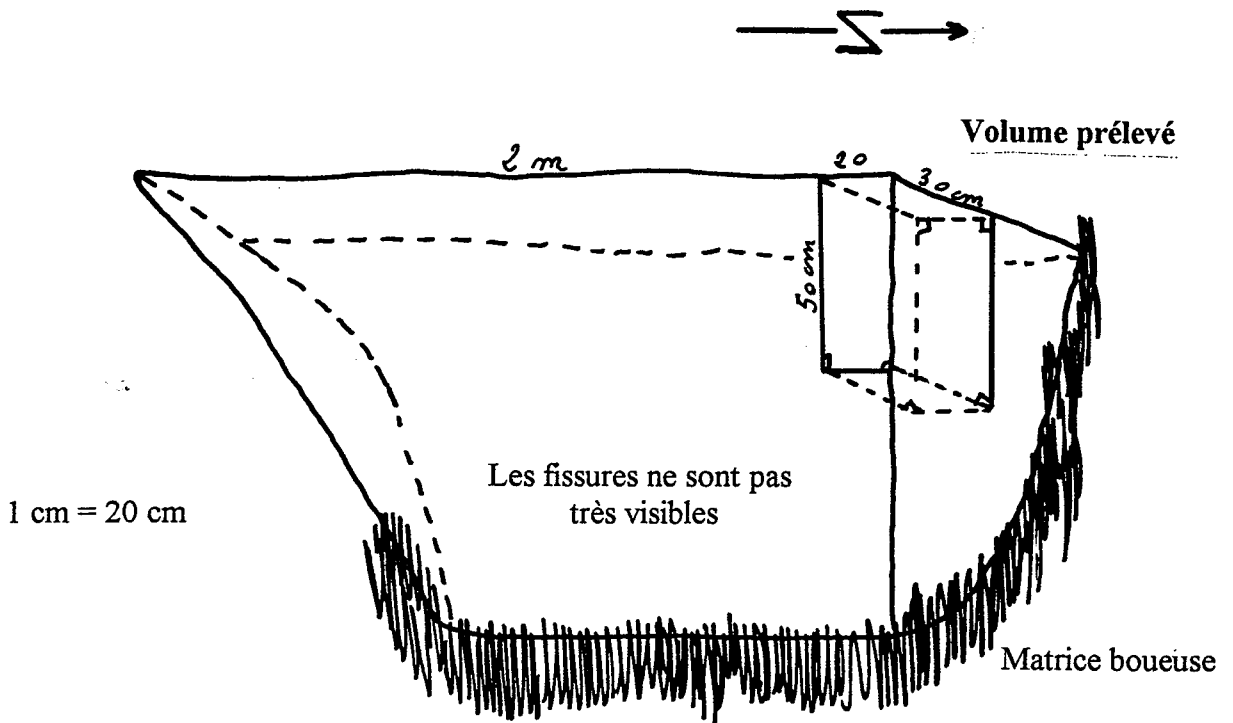
COEFFICIENT DE FOISSONNEMENT : BLOC 2



Volume prélevé

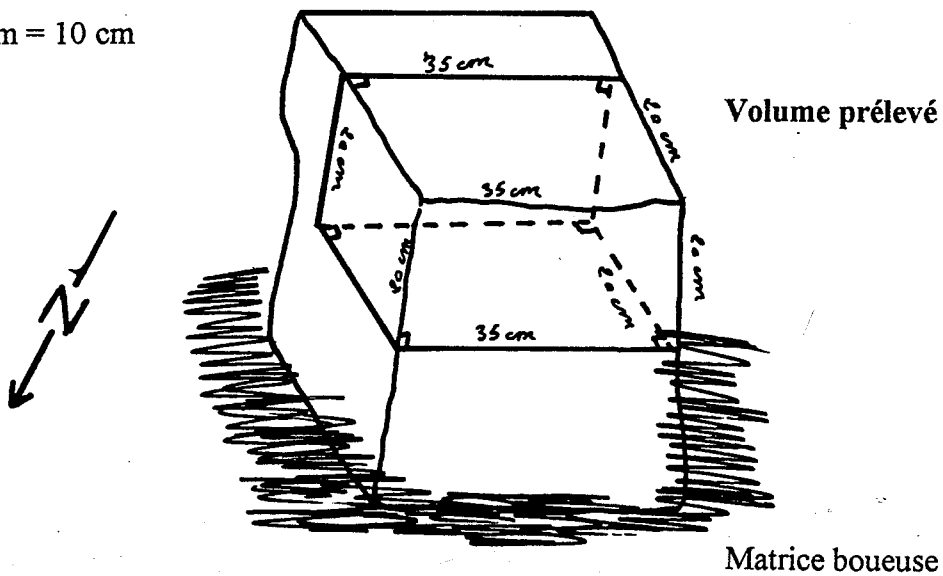


COEFFICIENT DE FOISSONNEMENT : BLOC 3



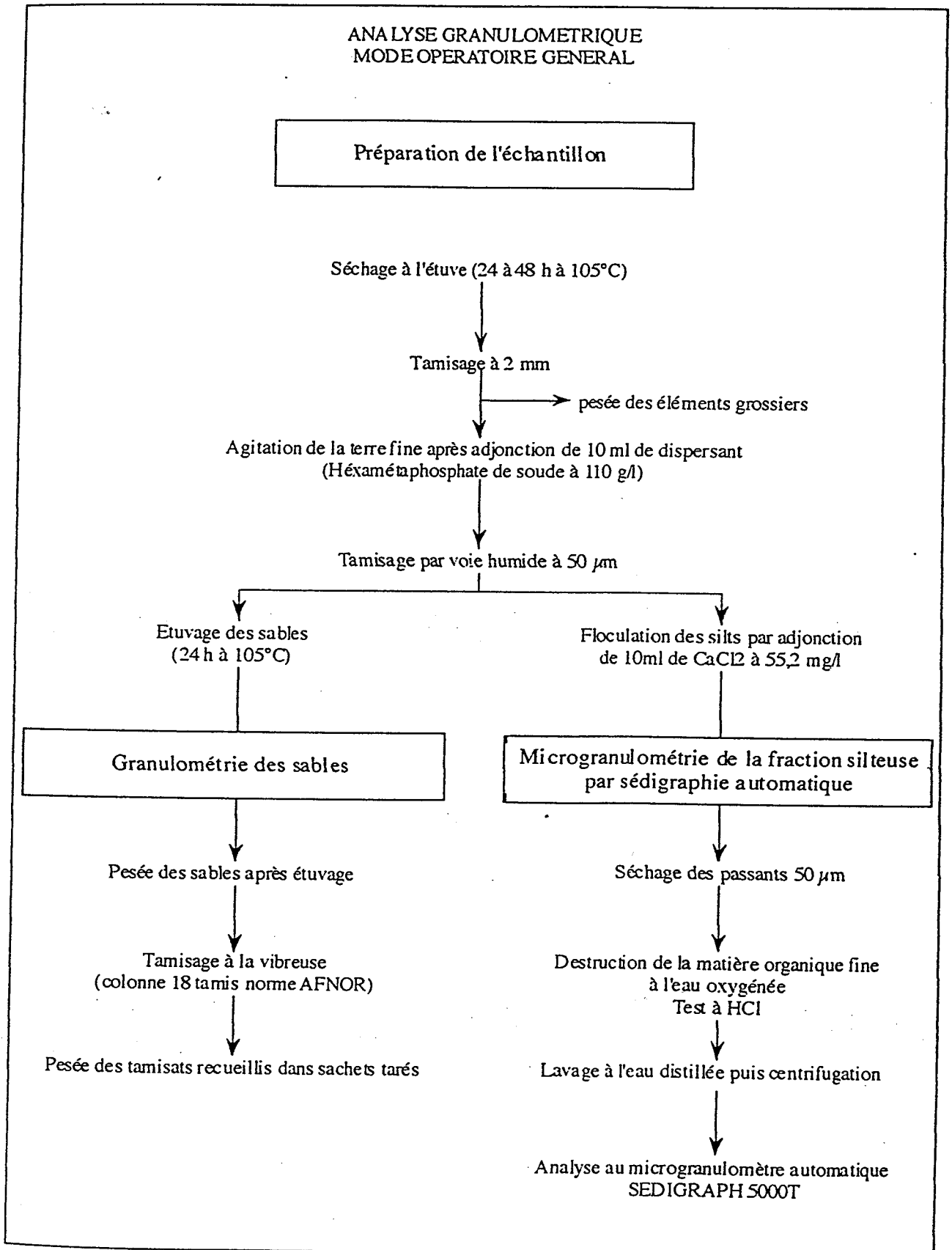
COEFFICIENT DE FOISSONNEMENT : BLOC 4

1 cm = 10 cm



ANNEXE 6.

MODE OPERATOIRE HABITUELLEMENT UTILISE AU LABORATOIRE DU CEREG.



ANNEXE 7.
 ESSAI PROCTOR.

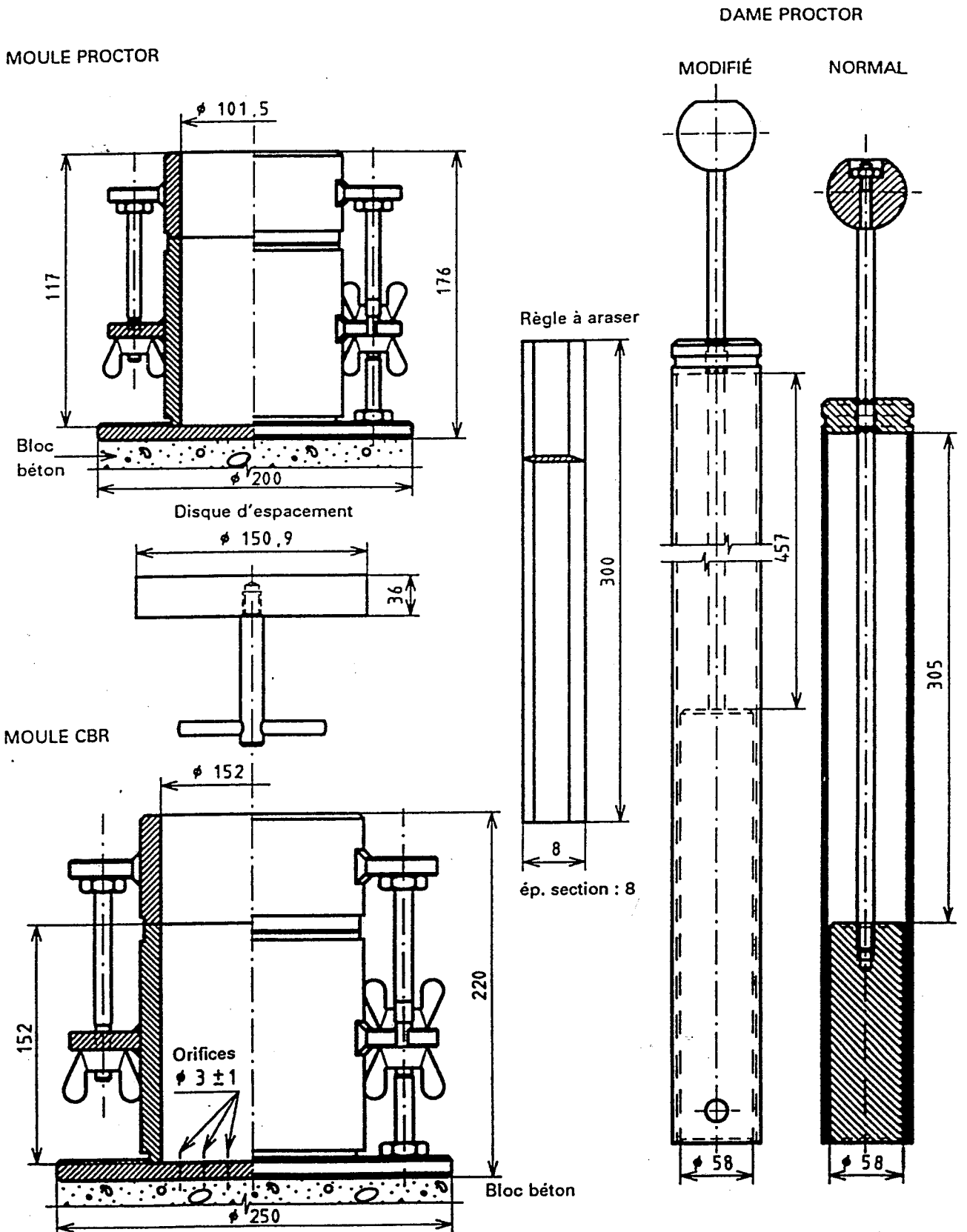
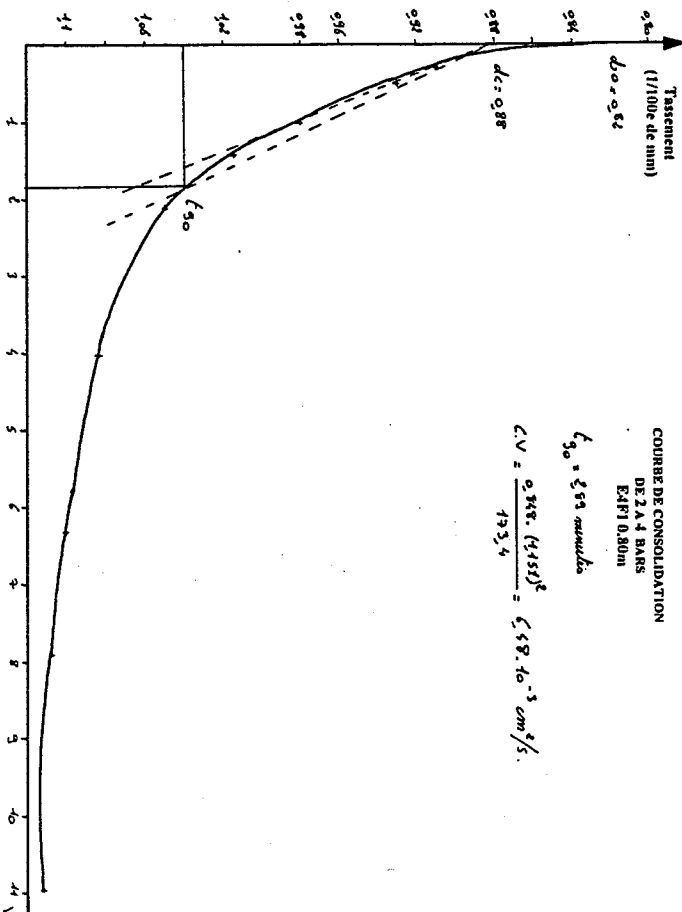
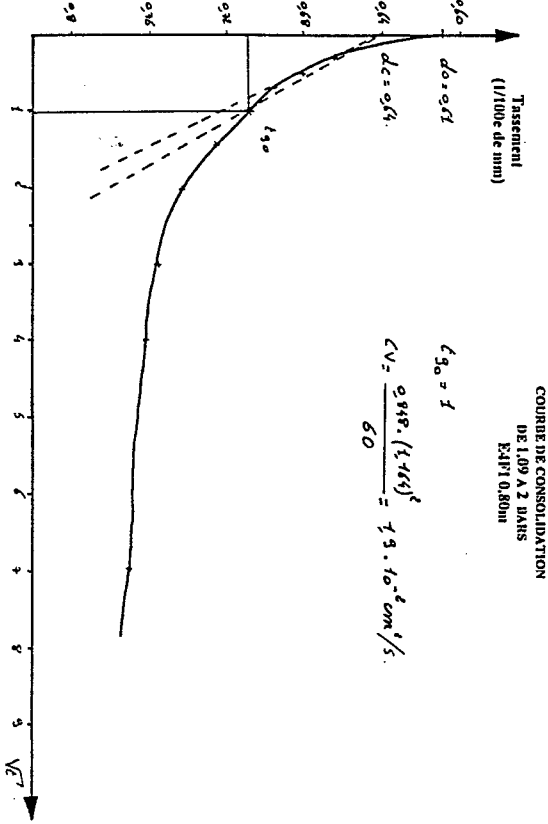
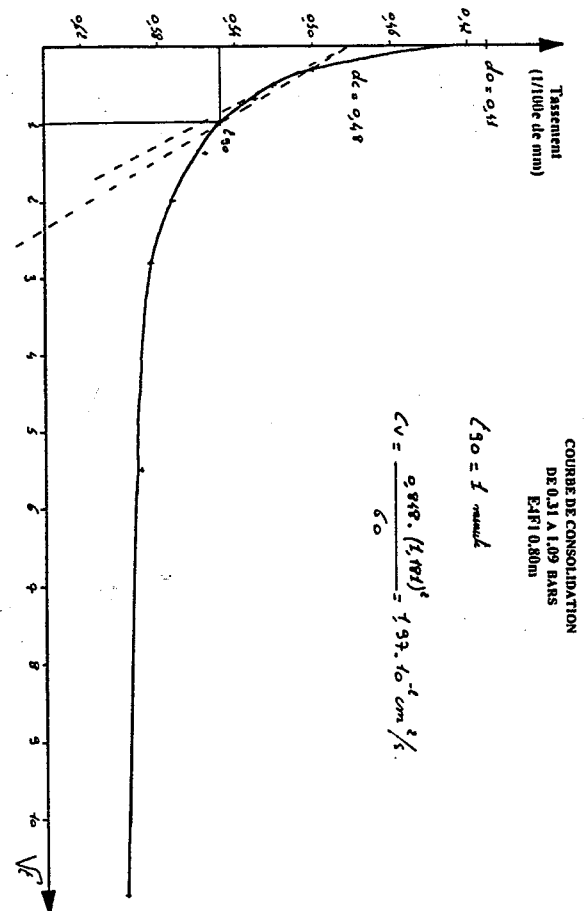
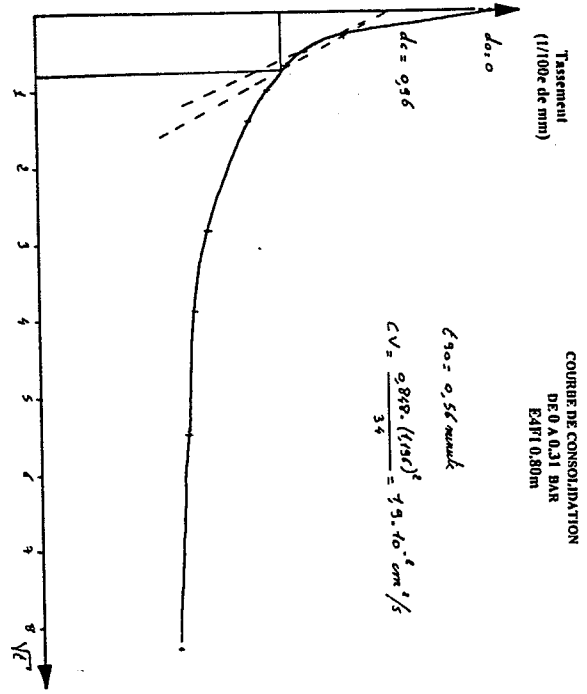


Figure 1 : Appareillage spécifique

ANNEXE 8.

ESSAI OEDOMETRIQUE

Courbes de Cosolidation :



Tassement
(1/100e de mm)

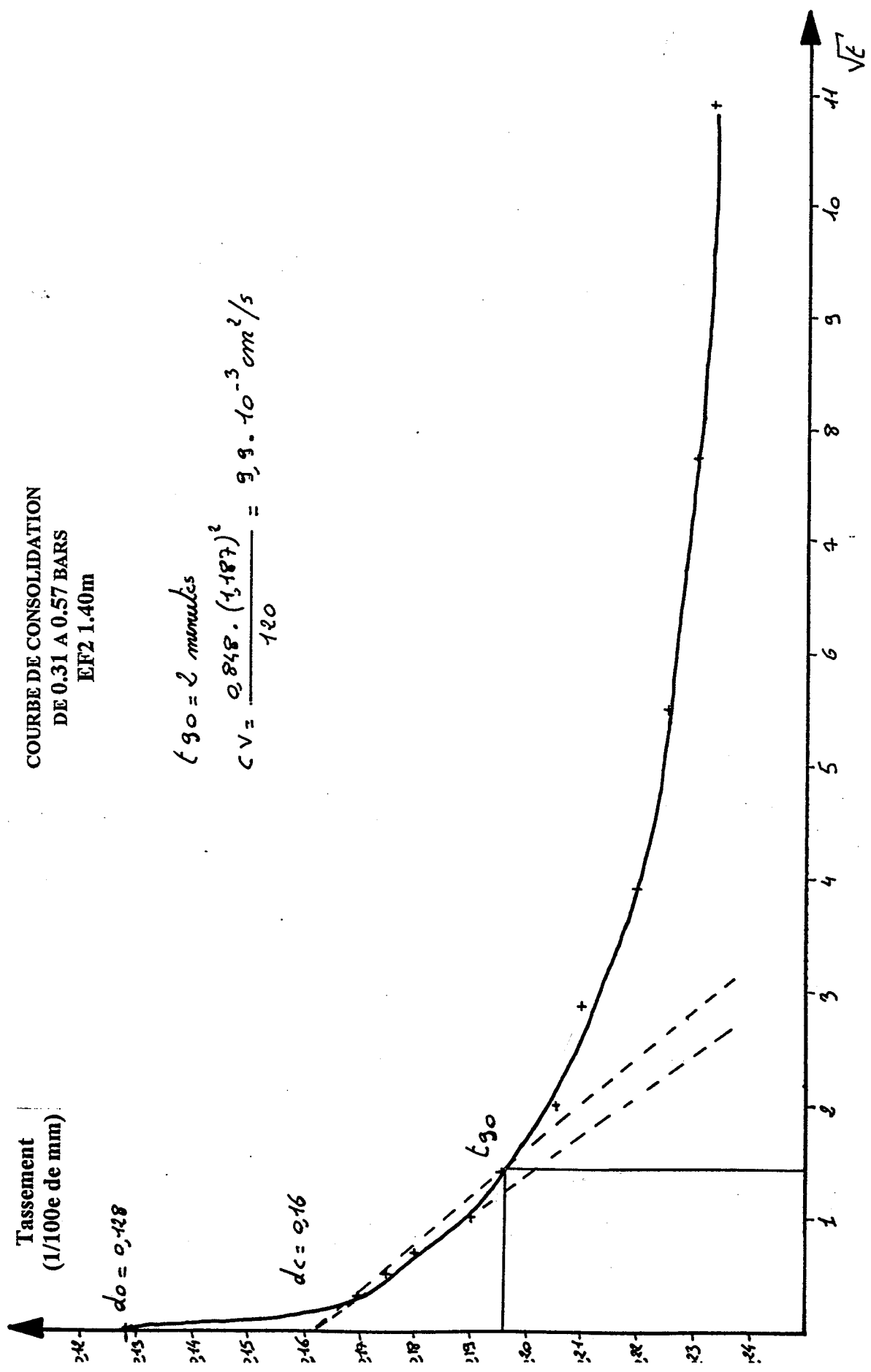
COURBE DE CONSOLIDATION
DE 0.31 A 0.57 BARS
EF2 1.40m

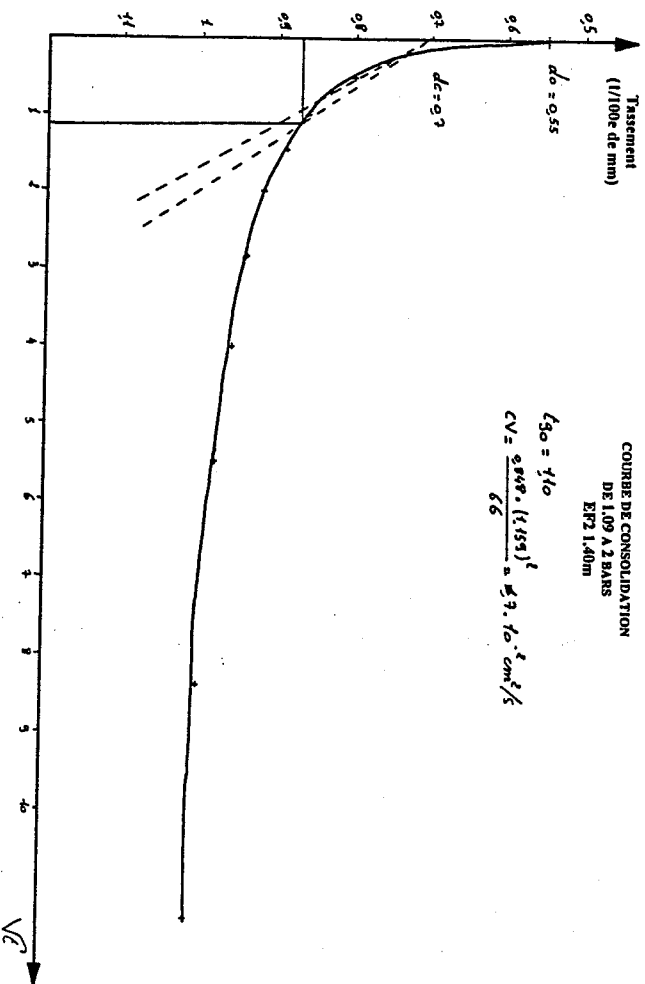
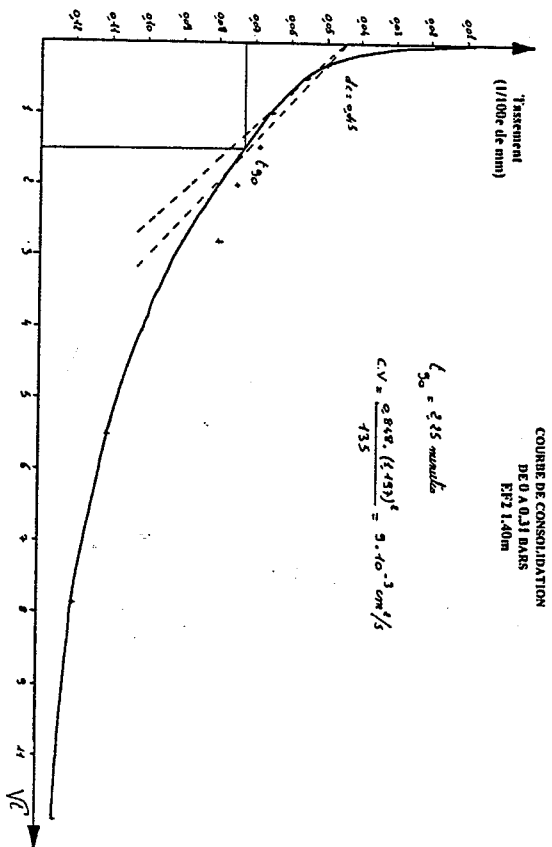
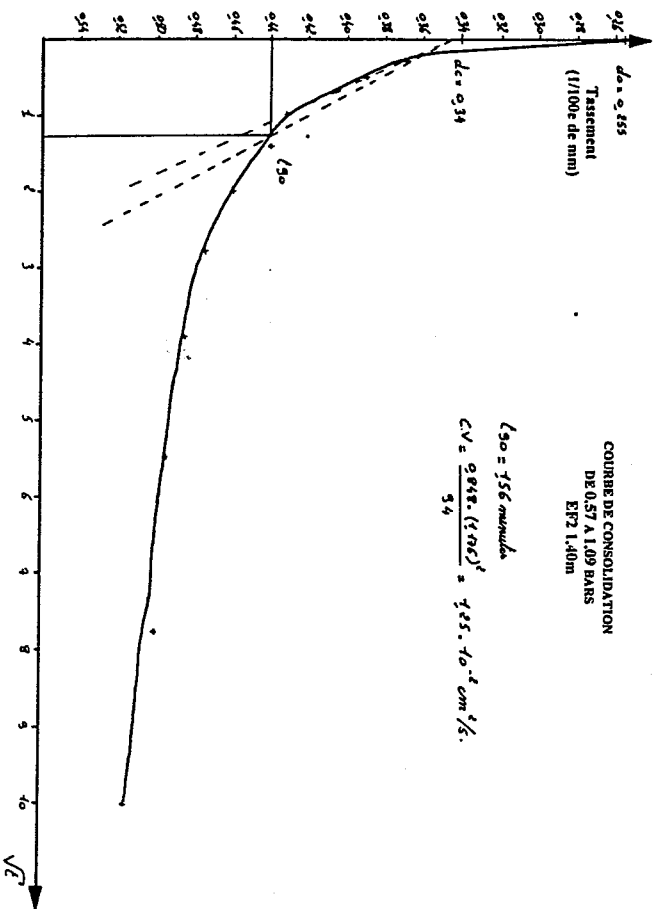
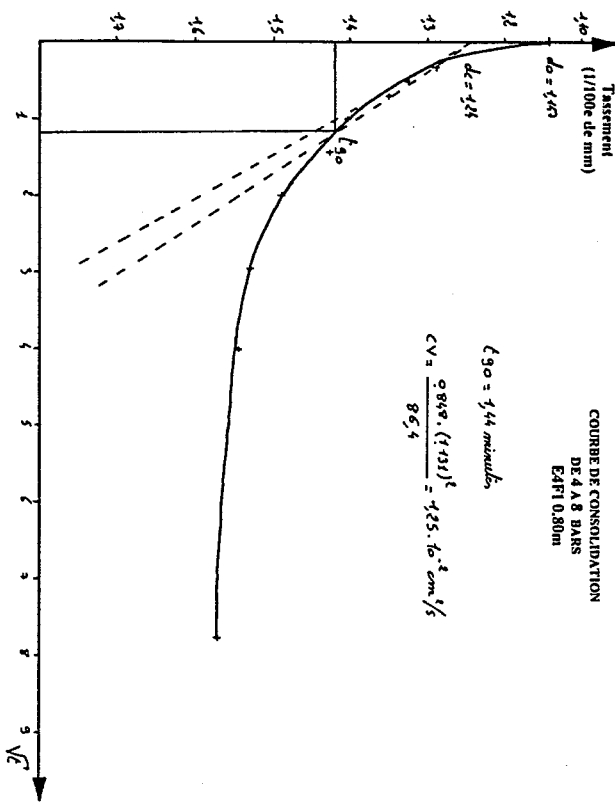
$d_0 = 0.128$

$d_c = 0.16$

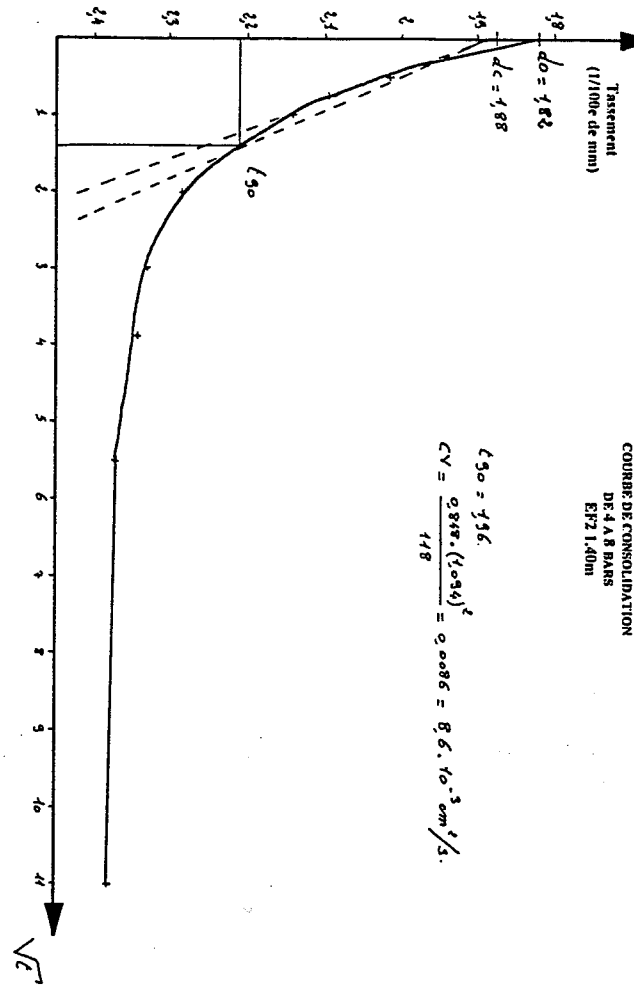
$t_{90} = 2 \text{ minutes}$

$$c_v = \frac{0.848 \cdot (1.187)^2}{120} = 9.9 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$$





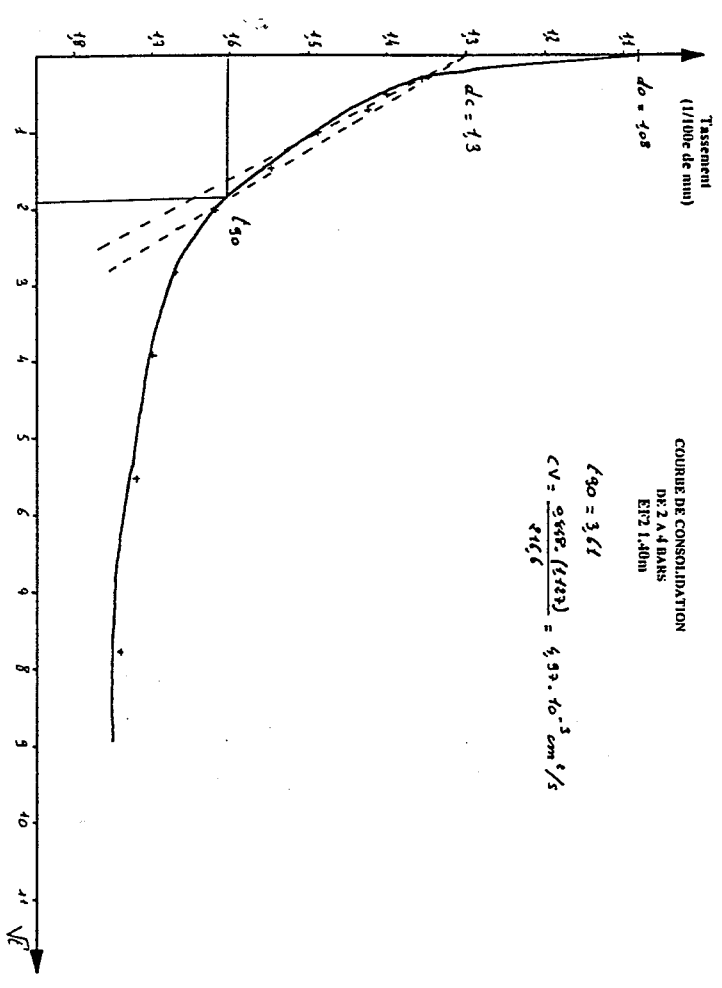
COURBE DE CONSOLIDATION
DE 4 A 8 BARS
Ecz 1,40m



$$L_{50} = 196$$

$$CV = \frac{0.848 \cdot (1.094)^2}{118} = 0.0086 = 8.6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$$

COURBE DE CONSOLIDATION
DE 2 A 4 BARS
Ecz 1,40m



$$L_{90} = 3.61$$

$$CV = \frac{0.848 \cdot (1.483)^2}{216.6} = 4.93 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Premier essai oedométrique

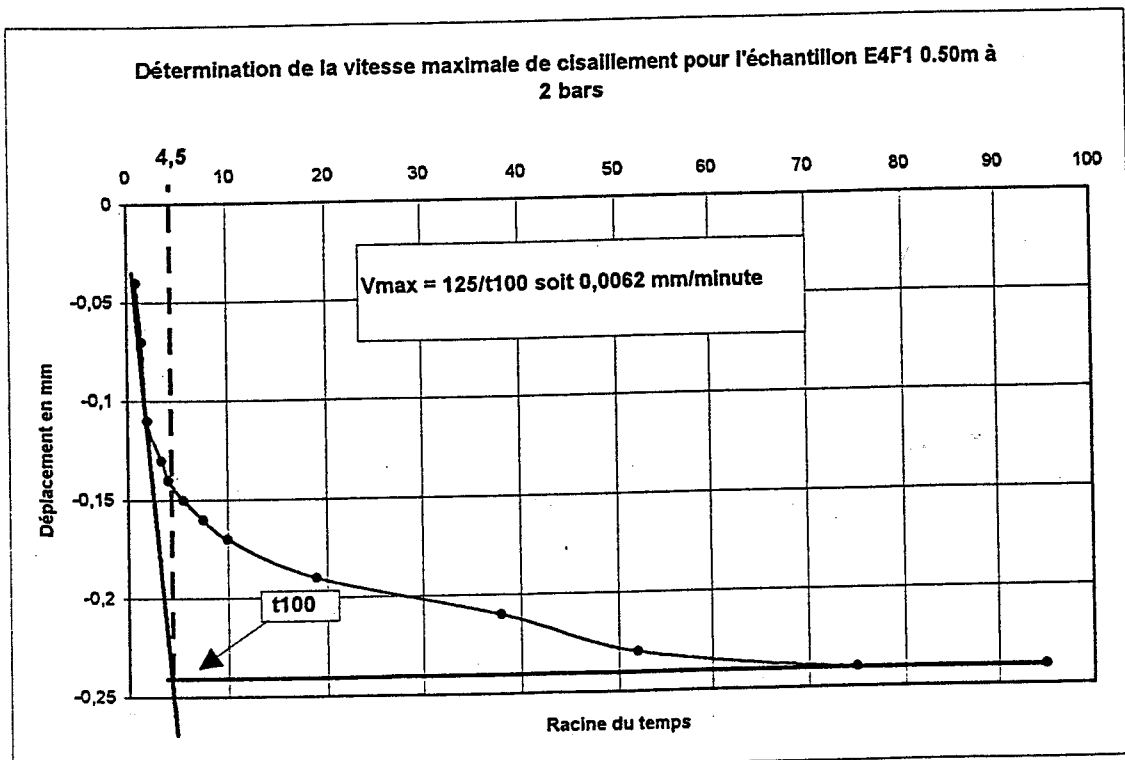
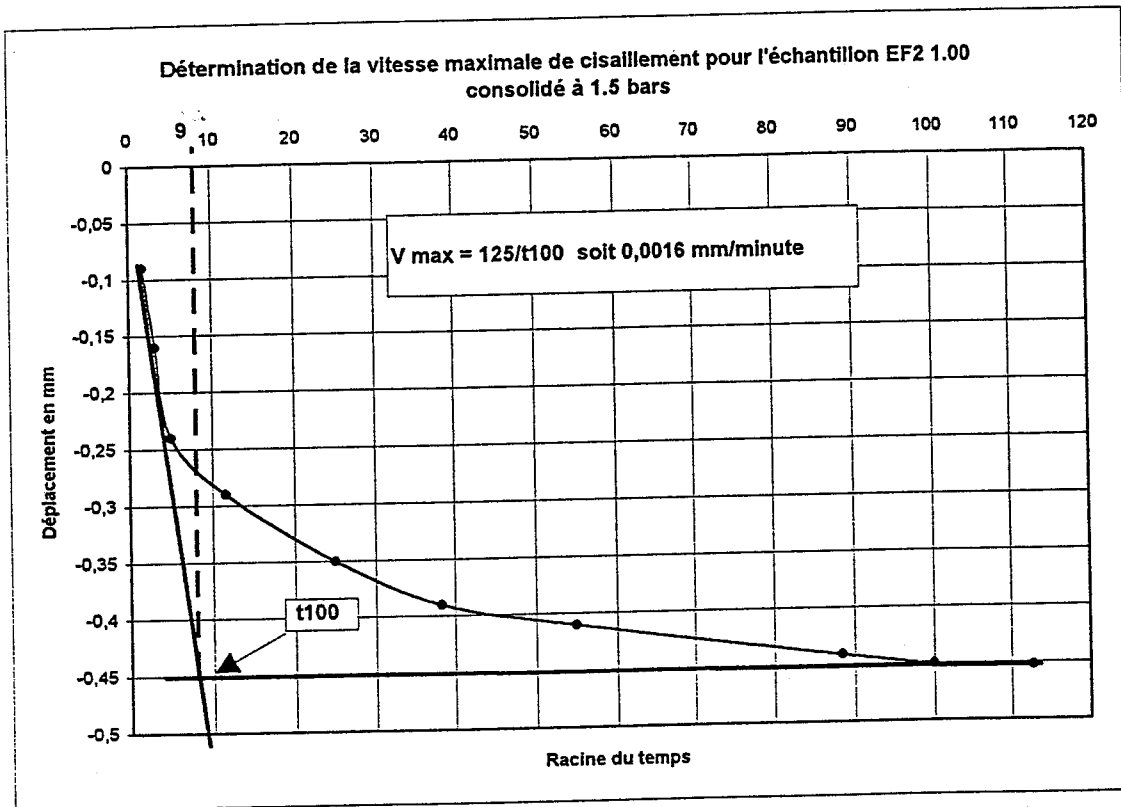
Provenance : Super- Sauze Echantillon : E4F2 Profondeur : 0,80 cm Nature du sol : Marnes noires contenant des éléments hétérogènes Densité des grains G : 2,72 (mesuré) WI = 28,4 Ip = 11,8				Date essai : 28/04/98 Section S = 38,5 cm² Hauteur initiale ho = 24 mm Hauteur des pleins hp = 16,04 mm Teneur en eau : 15,4 Observations : Quelques éléments supérieurs à 5 mm		
Courbe de compressibilité				Détermination de Cv (cm ² /s)		
Charges en Kg	Pressions en bar	Tassement Vh (mm)	Hauteur Eprouvette : h	Indice des vides	t 90 en seconde	Cv Racine de T
0	0	0	24	0,496	0	
2	0,31	0,16	23,84	0,486	34	0,019
8	1	0,61	23,39	0,462	60	0,0197
15	2	0,815	23,18	0,445	60	0,019
30	3,75	1,145	22,85	0,424	173,4	0,00648
60	7,85	1,62	22,38	0,395	86,4	0,0125
15	2	1,5	22,5	0,403		
2	0,31	1	23	0,434		

Deuxieme essai oedométrique

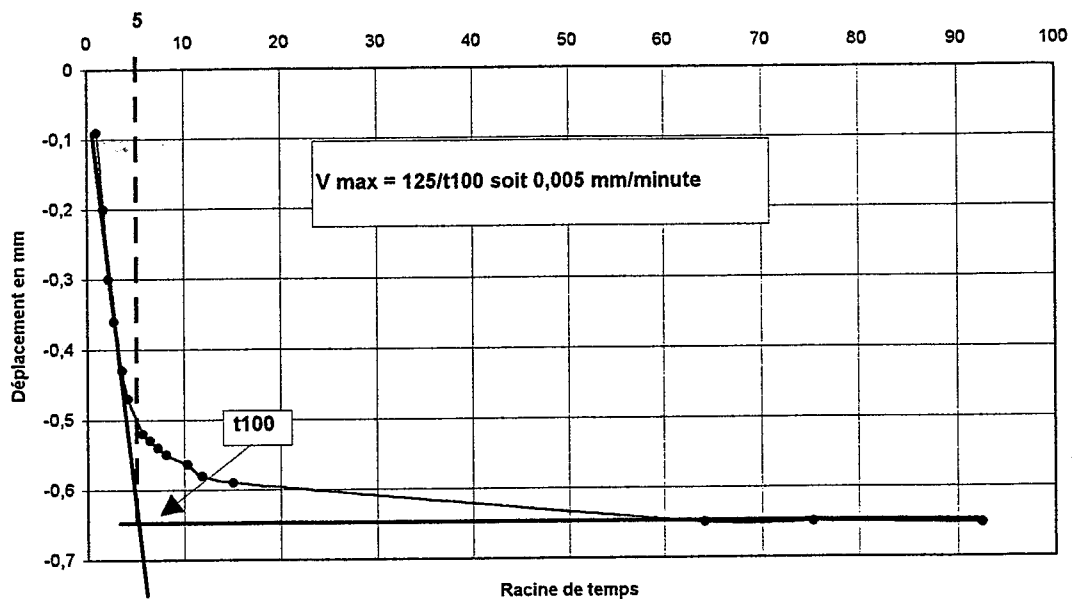
Provenance : Super- Sauze Echantillon : EF1 Profondeur : 1,40 cm Nature du sol : Marnes noires contenant des éléments hétérogènes Densité des grains G : 2,72 (mesuré) WI = 28,4 Ip = 11,8				Date essai : 03/06/98 Section S = 38,5 cm² Hauteur initiale ho = 24 mm Hauteur des pleins hp = 16,04 mm Teneur en eau : 15,5 Observations : Quelques éléments supérieurs à 5 mm Ph : 21,8 Pd : 18,4		
Courbe de compressibilité				Détermination de Cv (cm ² /s)		
Charges en Kg	Pressions en bar	Tassement Vh (mm)	Hauteur Eprouvette : h	Indice des vides	t 90 en seconde	Cv Racine de T
0	0	0	24	0,533	0	
2	0,31	0,128	23,87	0,526	135	0,009
4	0,57	0,255	23,615	0,5136	120	0,0099
8	1,09	0,55	23,45	0,497	94	0,0125
15	2	1,08	22,92	0,464	66	0,017
30	3,75	1,82	22,18	0,422	216,6	0,005
60	7,85	2,42	21,58	0,3748	118	0,0086
15	2	2,31	21,69	0,385		
2	0,31	1,88	22,12	0,412		

ANNEXE 9

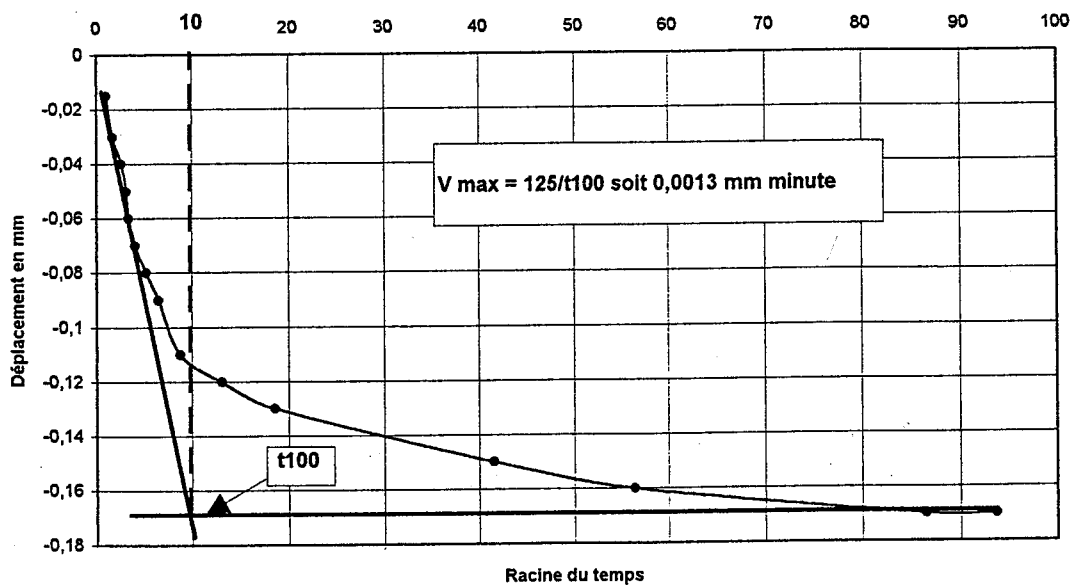
CISAILLEMENT DIRECT.



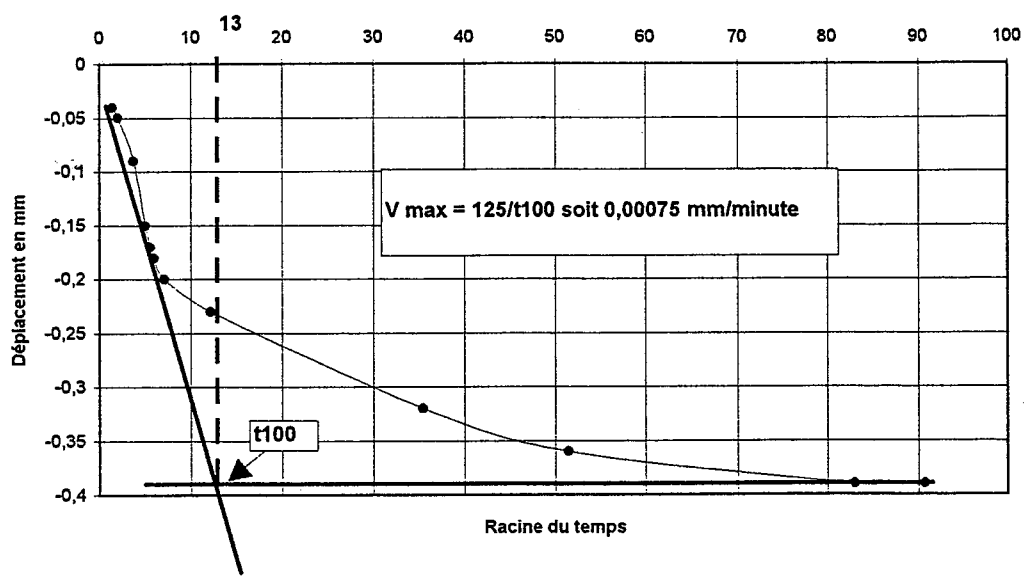
Détermination de la vitesse maximale de cisaillement pour l'échantillon E4F1 0,65 consolidé à 2 bars



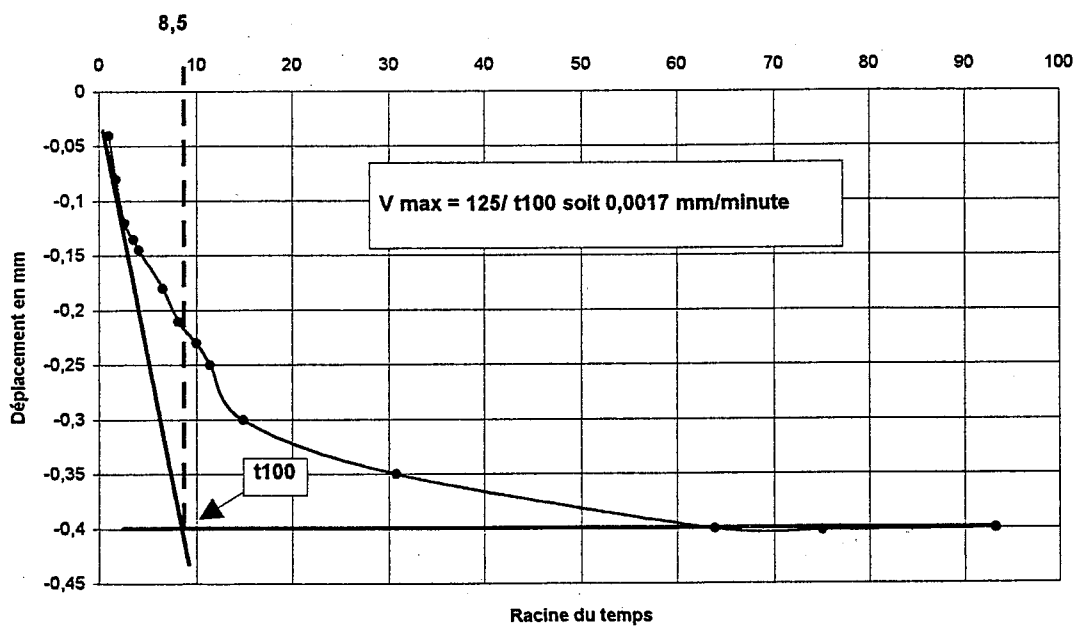
Détermination de la vitesse maximale de cisaillement pour l'échantillon EF2 1.00 consolidé à 0.5 bar



Détermination de la vitesse maximale de cisailment pour l'échantillon E4F1 0,65 consolidé à 0.5 Bar



Détermination de la vitesse maximale de cisailment pour l'échantillon E4F1 0,65 consolidé à 1 bar



CISAILLEMENT RECTILIGNE DIRECT . 2EF2 0.40 m

Sujet : Caractériser certains aspects géomécaniques des marnes noires callovo-oxfordiennes dans le but de mieux comprendre l'évolution du glissement de terrain de Super-Sauze affectant celles-ci		Cadre : Mémoire de maîtrise Géographie physique			
Site : Glissement de Super-Sauze dans la vallée de Barcelonnette Alpes du sud		Date essai : jun-98			
N° sondage : 2EF2	Profondeur : 40 cm	Caractéristique de l'éprouvette : Hauteur : 55 mm Diamètre : 70 mm			
Identification des éprouvettes :		Date de prélèvement : 25/05/1998			
		Vitesse de cisaillement Lent : 0,02 mm/min rapide : 1,2 mm/min (résiduel)			
		Densité réelle : entre de 2,7 et 2,74 t/m ³			
N°	Avant essai		Après consolidation : t100 (en min)	Après : W(%)	Contrainte normale effective (Kpa) :
	Ph(KN/m³)	Pd(KN/m³)			
1	21,3	18,5	?	14,8	100
2	22,6	20,4	?	15,3	150
3	22,1	19,7	?	14	300
Paramètres de résistance au cisaillement :					
N°	Tf,f(Kpa)	l (mm)	Angle de frottement : de 29° à 33°		
1	70	6	c' (cohésion en Kpa) : de 0 à 14		
2	98	6			
3	152	6			

CISAILLEMENT RECTILIGNE DIRECT : 2EF2 0.70 m

Sujet : Caractériser certains aspects géomécaniques des marnes noires callovo-oxfordiennes dans le but de mieux comprendre l'évolution du glissement de terrain de Super-Sauze affectant celles-ci		Cadre : Mémoire de maîtrise Géographie physique		
Site : Glissement de Super-Sauze dans la vallée de Barcelonnette Alpes du sud		Date essai : jul 98		
N° sondage : 2EF2	Profondeur : 70 cm	Date de prélèvement : 25/05/1998	Vitesse de cisaillement Lent : 0,02 mm/min rapide : 1,2 mm/min (résiduel)	
Identification des éprouvettes :				
N°	Avant essai		Après consolidation :	Après :
	<i>Ph</i> (KN/m ³)	<i>Pd</i> (KN/m ³)	<i>t</i> 100 (en min)	<i>W</i> (%)
1	21,1	18,5	?	15,3
2	21,3	18,7	?	14
3	20,7	18	?	14
				Contrainte normale effective (Kpa) :
				100
				200
				300

Paramètres de résistance au cisaillement :	
N°	<i>Tf, f</i> (Kpa)
1	82
2	184
3	206
	<i>l</i> (mm)
	6
	6
	6

Angle de frottement :	de 34° à 37°
c' (cohésion en Kpa) :	de 0 à 13

CISAILLEMENT RECTILIGNE DIRECT. 2EF2 0.90 m

Sujet :		Caractériser certains aspects géomécaniques des marnes noires callovo-oxfordiennes dans le but de mieux comprendre l'évolution du glissement de terrain de Super-Sauze affectant celles-ci		Cadre :		Mémoire de maîtrise Géographie physique		
Site :		Glissement de Super-Sauze dans la vallée de Barcelonnette Alpes du sud		Date essai :		Jul-98		
N° sondage :		2EF2		Profondeur :		90 cm		
				Date de prélèvement :		25/05/1998		
Identification des éprouvettes :				Vitesse de cisaillement				
				Lent : 0,02 mm/min rapide : 1,2 mm/min (résiduel)				
				entre de 2,7 et 2,74 μm^3 Densité réelle :				
N°	Avant essai			Après consolidation :			Après : W(%)	Contrainte normale effective (Kpa) :
	Ph(KN/m ³)	Pd(KN/m ³)	W(%)	t100 (en min)	W(%)			
1	21,3	18,6	14,2	?	14,8	100		
2	21,5	18,9	13,5	?	15,3	200		
3	21	18,4	13,7	?	14	300		
N°		Tf,fi(Kpa)		l (mm)		Angle de frottement :		
						de 31° à 33°		
1	84	6	6	c' (cohésion en Kpa) :				
2	148	6	6	de 18 à 22				
3	208	6	6					

Paramètres de résistance au cisaillement :

Angle de frottement : de 31° à 33°
c' (cohésion en Kpa) : de 18 à 22

CISAILLEMENT RECTILIGNE DIRECT : 2EF2 1.10m

Sujet :		Caractériser certains aspects géomécaniques des marnes noires callovo-oxfordiennes dans le but de mieux comprendre l'évolution du glissement de terrain de Super-Sauze affectant celles-ci			Cadre :	Mémoire de maîtrise Géographie physique	
Site :		Glissement de Super-Sauze dans la vallée de Barcelonnette Alpes du sud			Date essai :	Jun-98	
N° sondage :		2EF2	Profondeur :	110 cm	Date de prélèvement :	25/05/1998	
Identification des éprouvettes :					Vitesse de cisaillement Lent : 0,02 mm/min rapide : 1,2 mm/min (résiduel)		
					Densité réelle : entre de 2,7 et 2,74 V/m ³		
N°	Avant essai			Après consolidation :		Après :	
	Ph(KN/m³)	Pd(KN/m³)	W(%)	t100 (en min)	W(%)	Contrainte normale effective (Kpa) :	
1	20,5	17,7	13,7	?	14,2	100	
2	21,6	19	16,1	?	13,5	200	
3	?	?	14,3	?	14,5	300	
Paramètres de résistance au cisaillement :					Angle de frottement :		
N°	Tf,f(Kpa)	l (mm)		c' (cohésion en Kpa) :			
1	80	6		37°			
2	154	6		0			
3	216	6					

CISAILLEMENT RECTILIGNE DIRECT E4f1 50 cm

Sujet : Caractériser certains aspects géomécaniques des marnes noires calavo-oxfordiennes dans le but de mieux comprendre l'évolution du glissement de terrain de Super-Sauze affectant celles-ci		Cadre : Mémoire de maîtrise Géographie physique	
Site : Glissement de Super-Sauze dans la vallée de Barcelonnette Alpes du sud		Date essai : mar-98	
N° sondage	E4F1	Profondeur : 50 cm	Date de prélèvement : 08/07/1997
Identification des éprouvettes :			
N°	Avant essai		Après consolidation :
	Ph(KN/m³)	Pd(KN/m³)	t100 (en min)
1	21,7	18,8	?
2	21,13	18,2	?
3	21,3	18,7	20,25
		W(%)	Après :
			W(%)
			Contrainte normale effective (Kpa) :
			50
			100
			200
Paramètres de résistance au cisaillement :		Angle de frottement : de 29° à 30°	
N°	Tf, f(Kpa)	l (mm)	c' (cohésion en Kpa) : de 0 à 10
1	66	6,24	
2	58	6	
3	116	6,22	

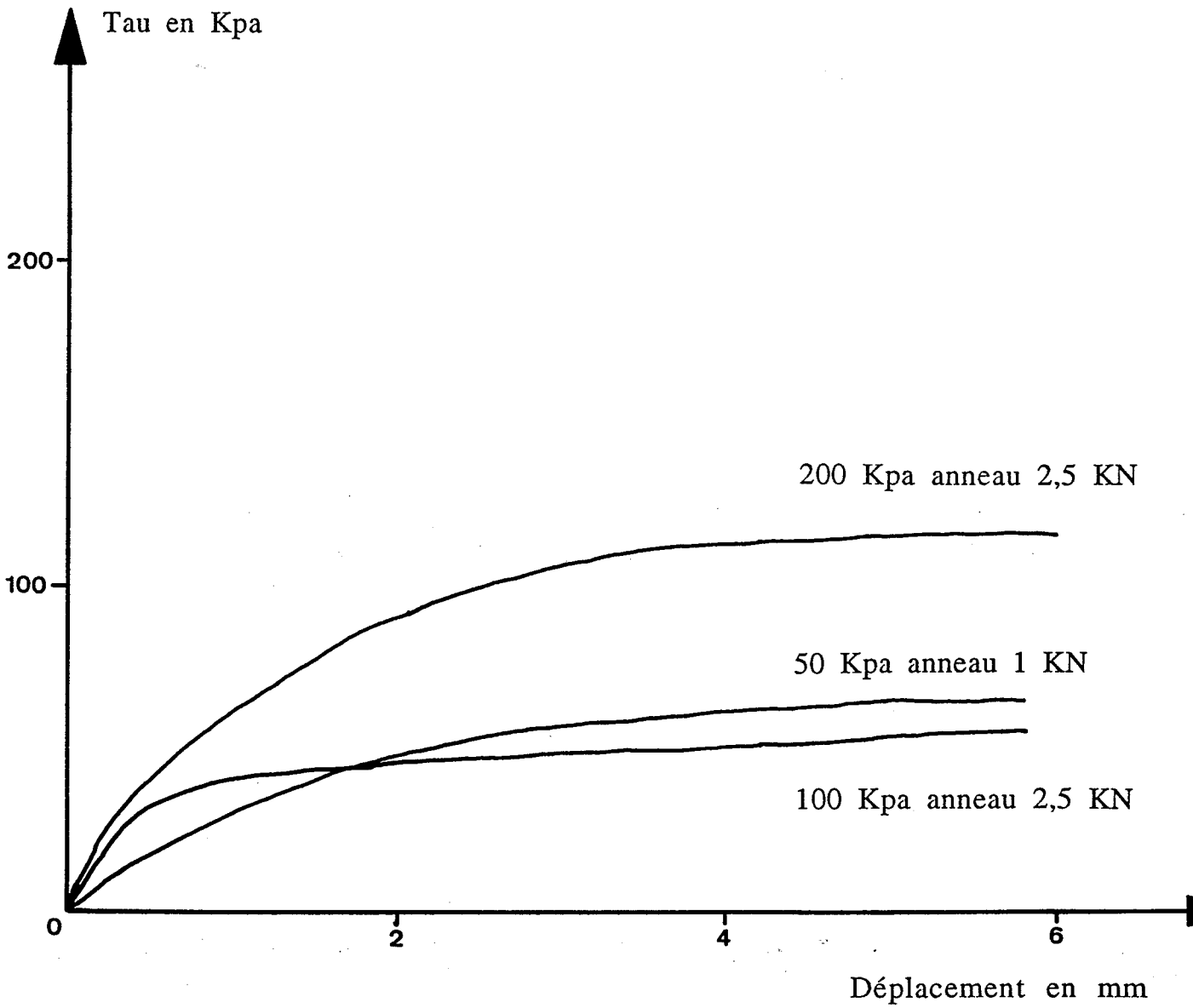
Vitesse de cisaillement
Lent : 0,02 mm/min
rapide : 1,2 mm/min (résiduel)

Densité réelle :
entre 2,7 et 2,74 t/m³

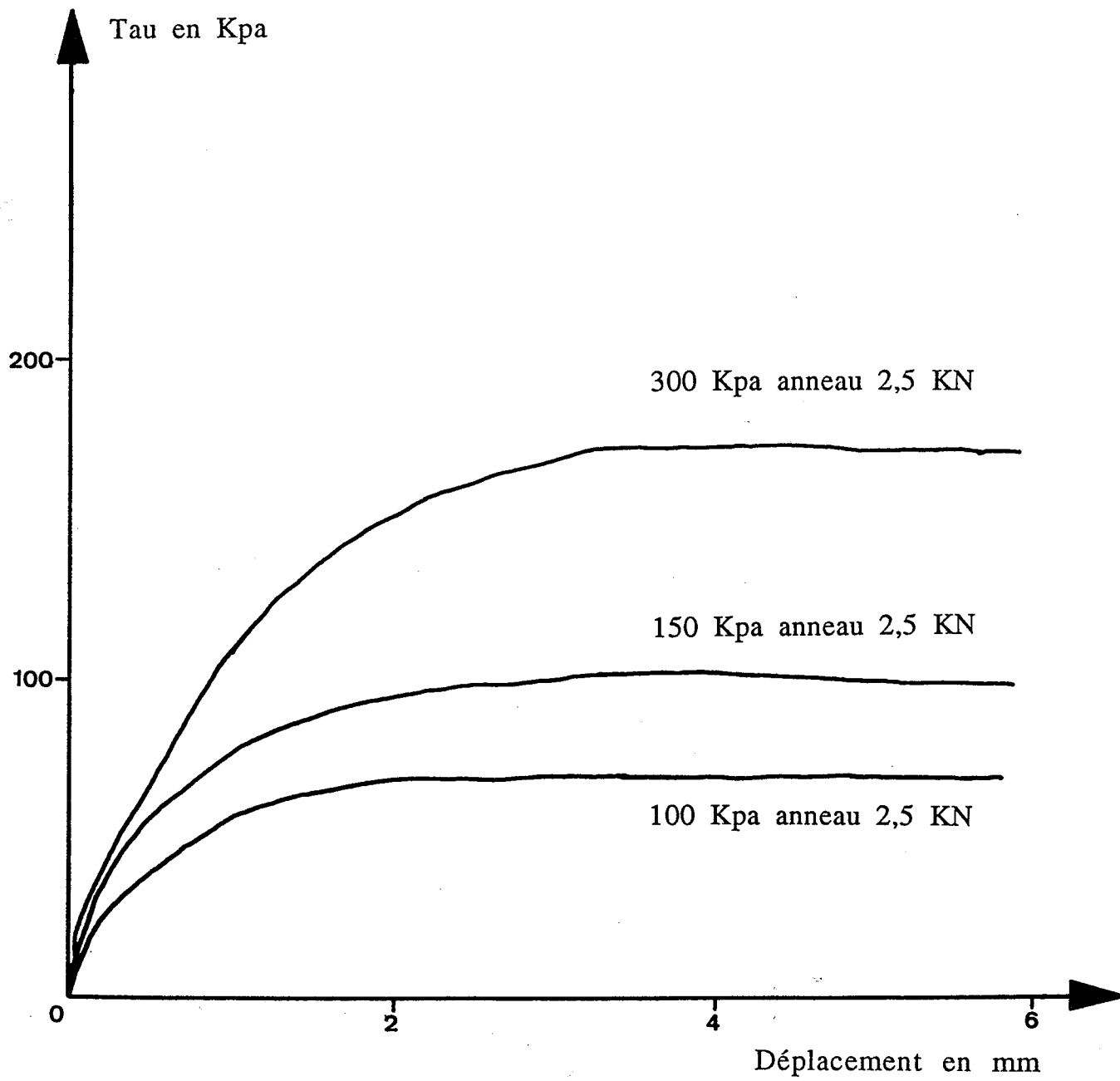
CISAILLEMENT RECTILIGNE DIRECT
E4F1 65 cm

Sujet : Caractériser certains aspects géomécaniques des marnes noires callovo-oxfordiennes dans le but de mieux comprendre l'évolution du glissement de terrain de Super-Sauze affectant celles-ci		Cadre : Mémoire de maîtrise Géographie physique		
Site : Glissement de Super-Sauze dans la vallée de Barcelonnette Alpes du sud		Date essai : Mars/avril 1998		
N° sondage E4F1	Profondeur : 65 cm	Date de prélèvement : 08/07/1997	Vitesse de cisaillement Lent : 0,02 mm/min rapide : 1,2 mm/min (résiduel)	
Identification des éprouvettes :		Densité réelle : entre 2,7 et 2,74 t/m ³		
N°	Avant essai		Après :	Contrainte normale effective (Kpa) :
	<i>Ph(KN/m³)</i>	<i>Pd(KN/m³)</i>	<i>W(%)</i>	<i>W(%)</i>
1	21,5	18,8	14,3	50
2	22,18	19,4	14,4	100
3	21,61	18,8	14,8	200
		Après consolidation :	t100 (en min)	
			169	
			72,25	
			25	
Paramètres de résistance au cisaillement :		Angle de frottement : entre 33° et 35°		
N°	<i>Tf(f(Kpa))</i>	<i>l (mm)</i>	c' (cohésion) : entre 4 et 12	
1	38	6		
2	68	6		
3	150	6		

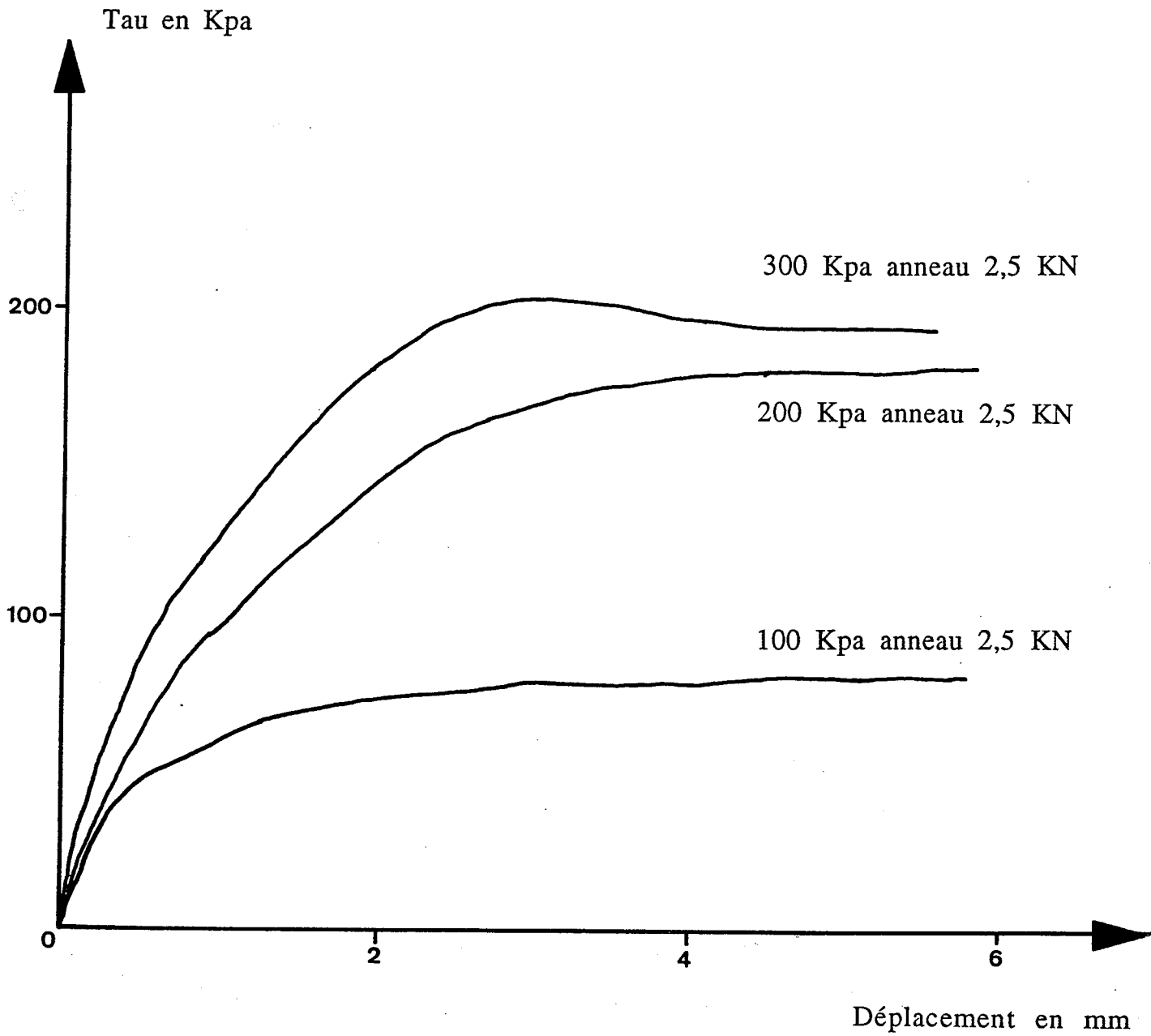
CISAILLEMENT RECTILIGNE DIRECT
E4F1 0.50 m
Courbes contrainte-déplacement



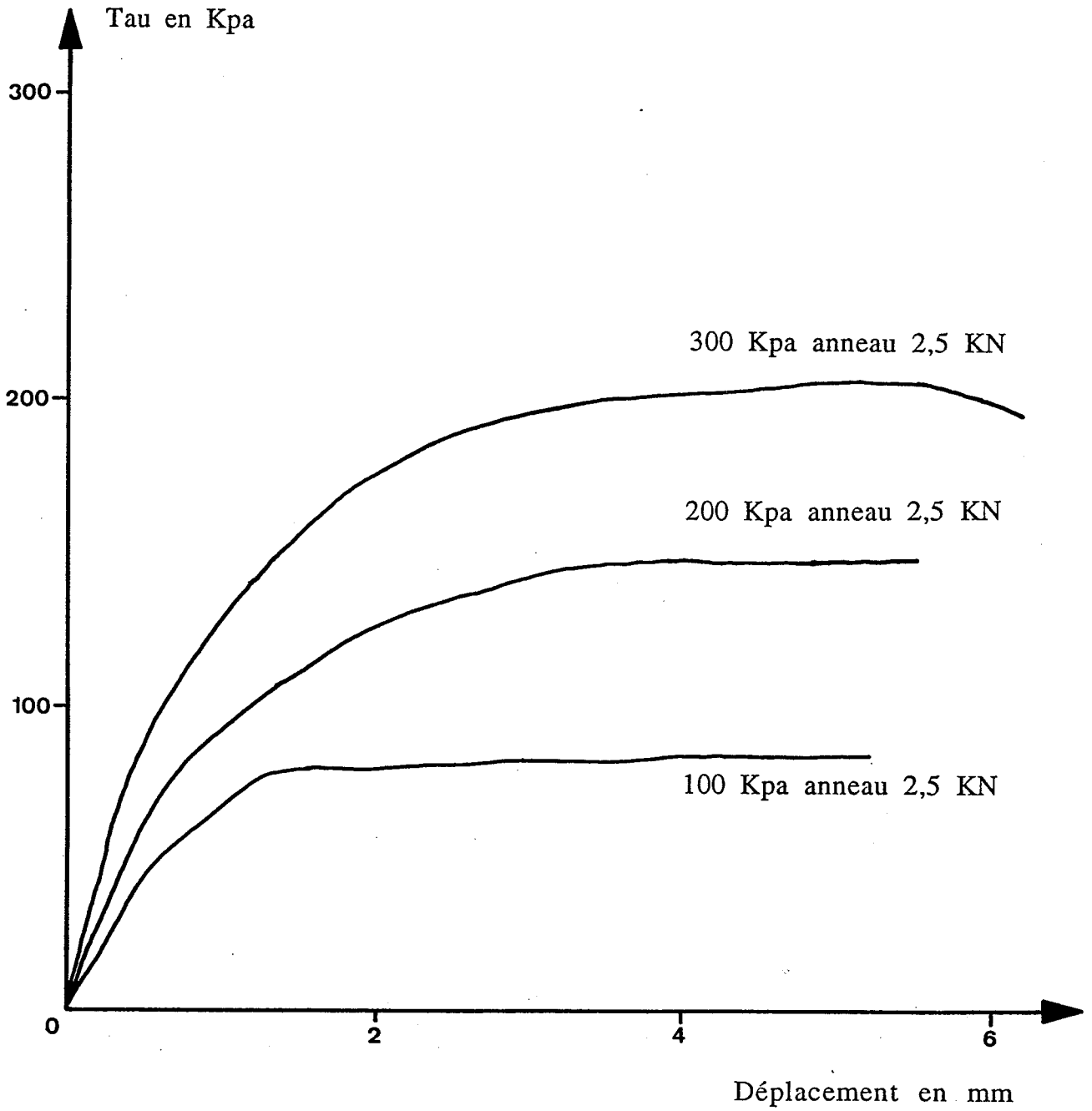
CISAILLEMENT RECTILIGNE DIRECT
2EF2 0,40 m
Courbes contrainte-déplacement



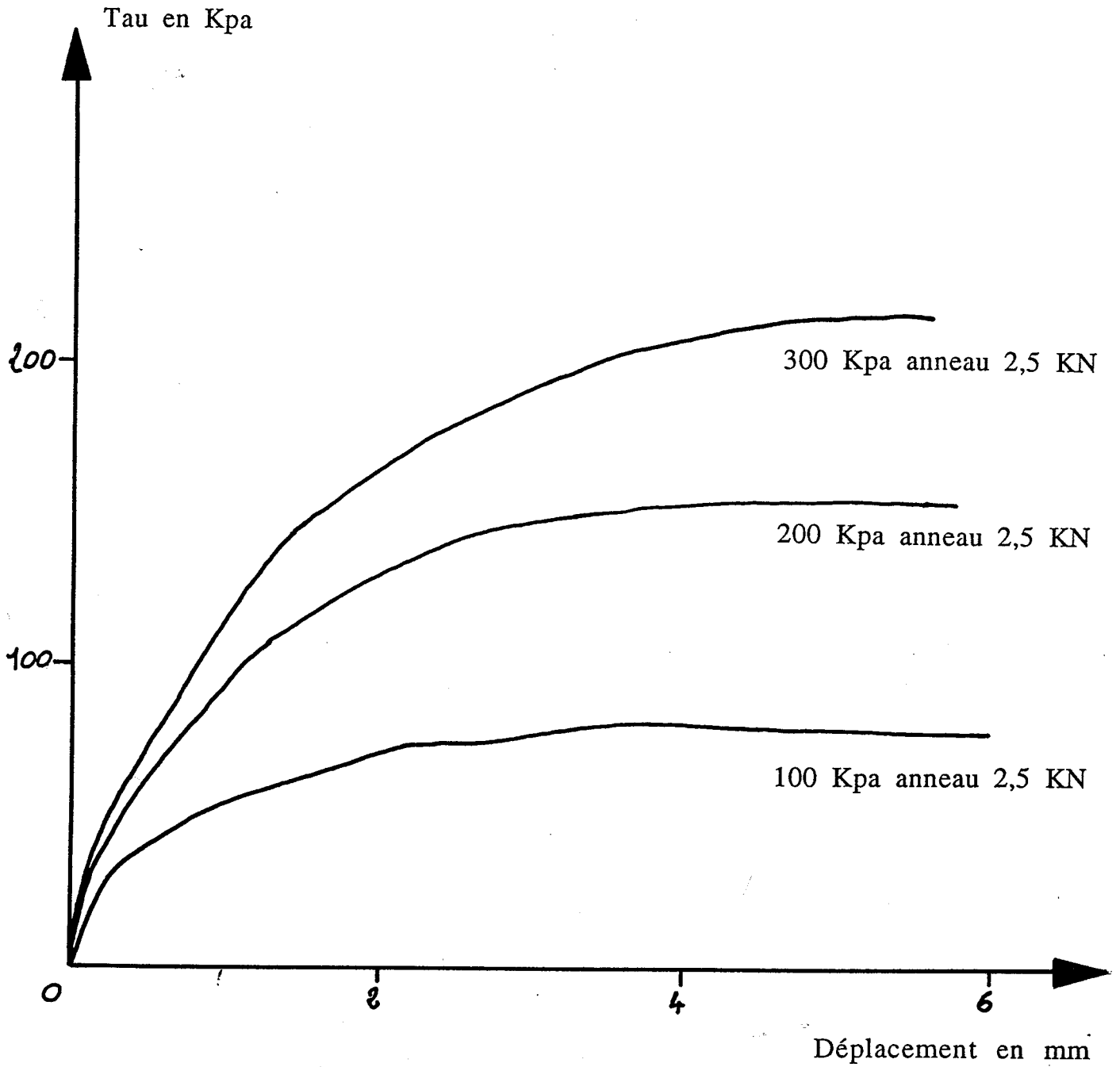
CISAILLEMENT RECTILIGNE DIRECT
2EF2 0.70 m
Courbes contrainte-déplacement

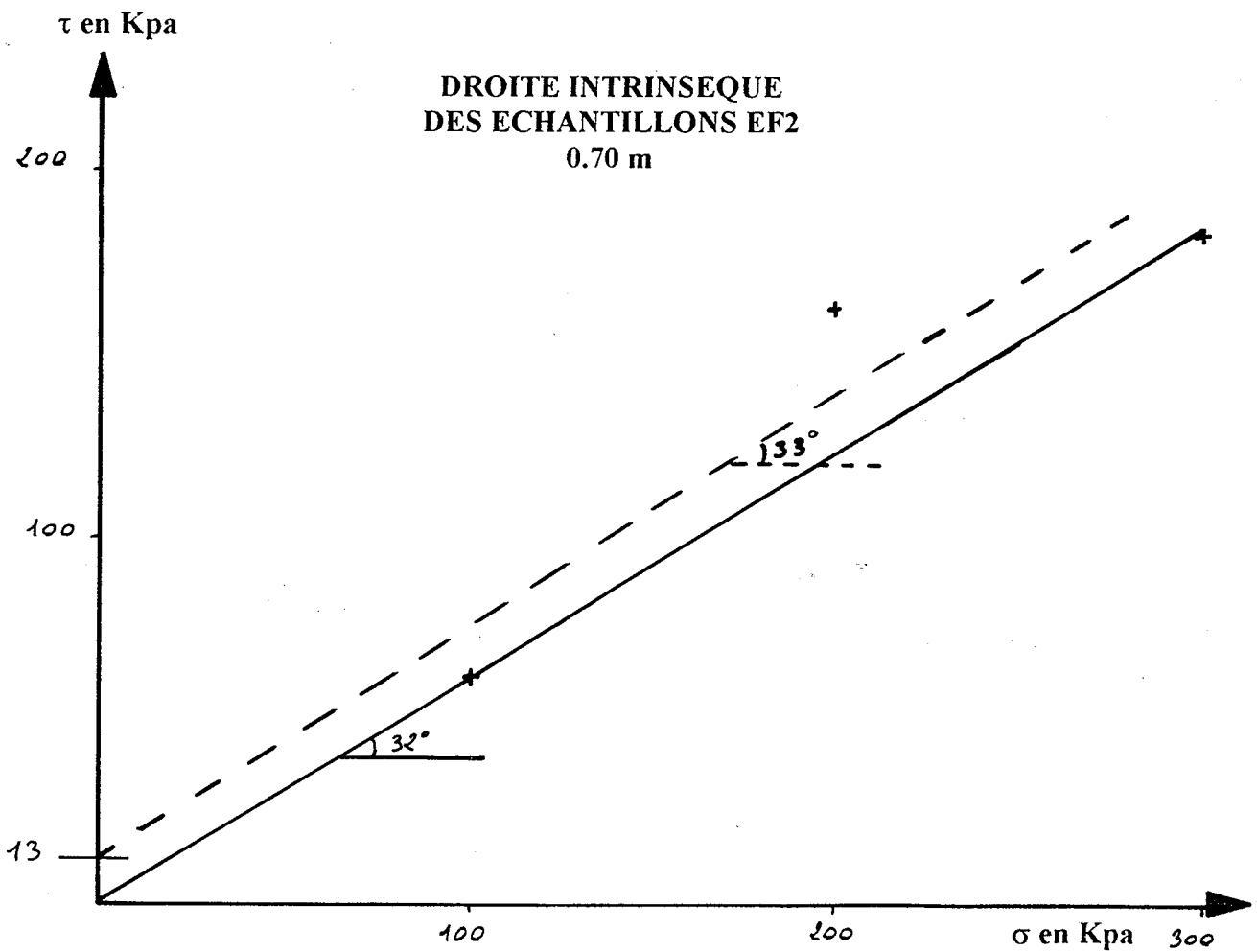
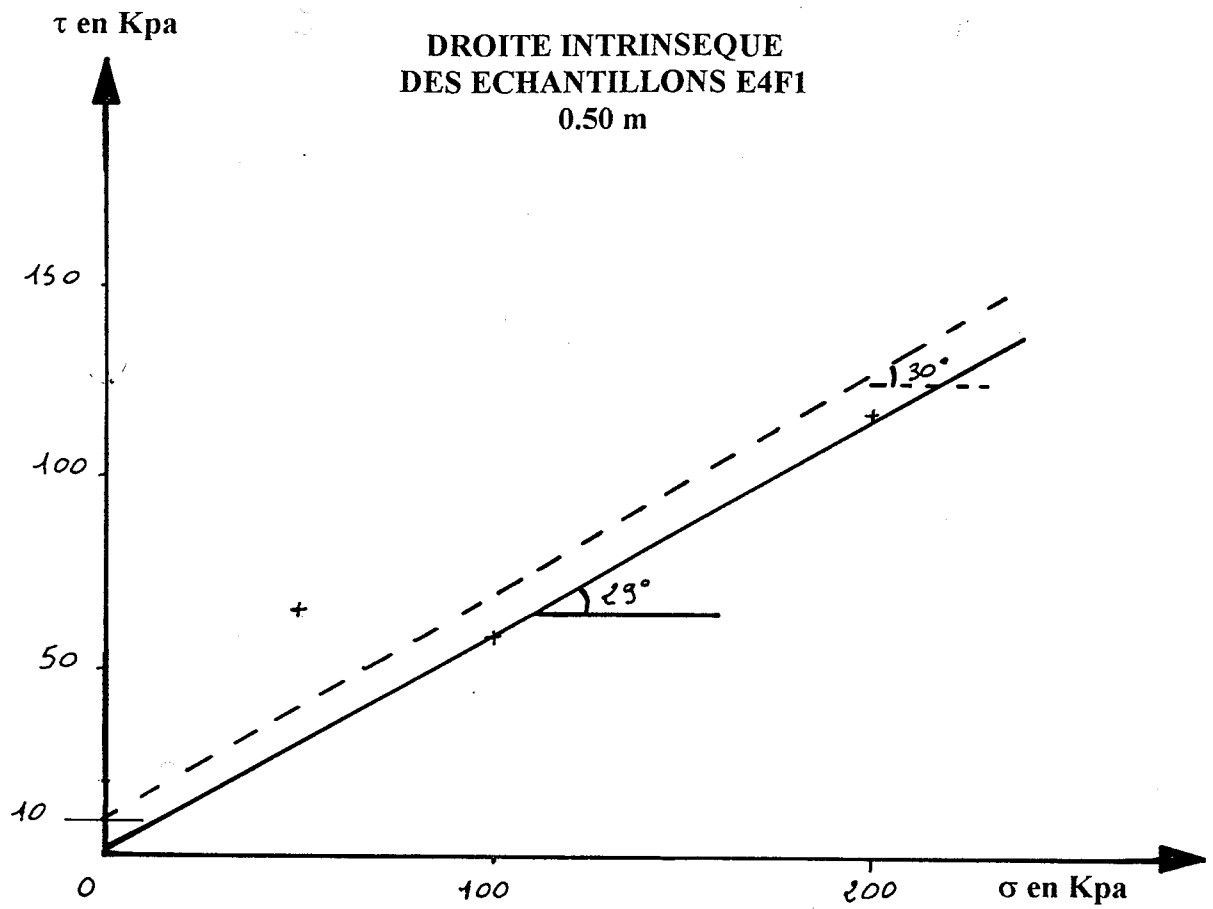


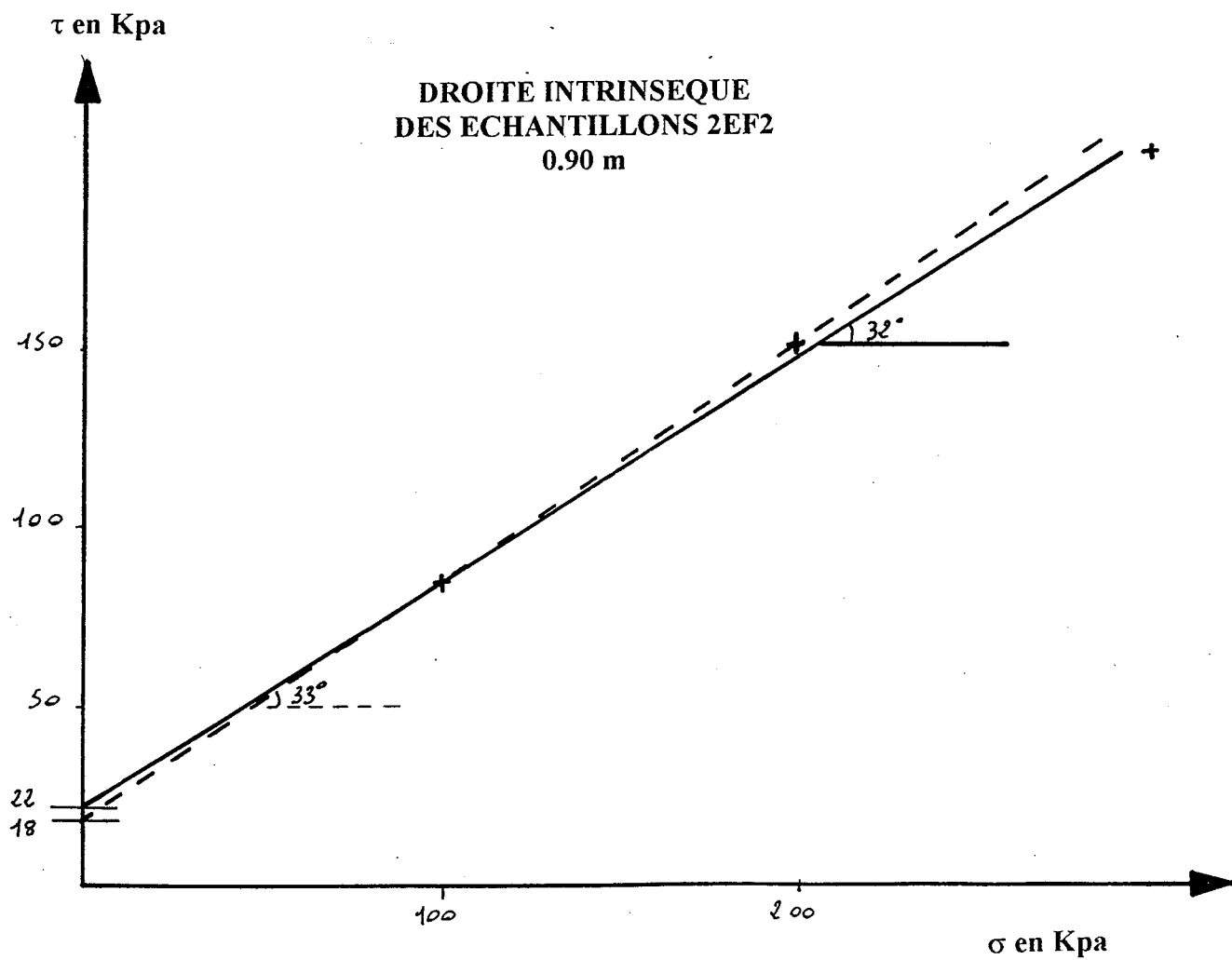
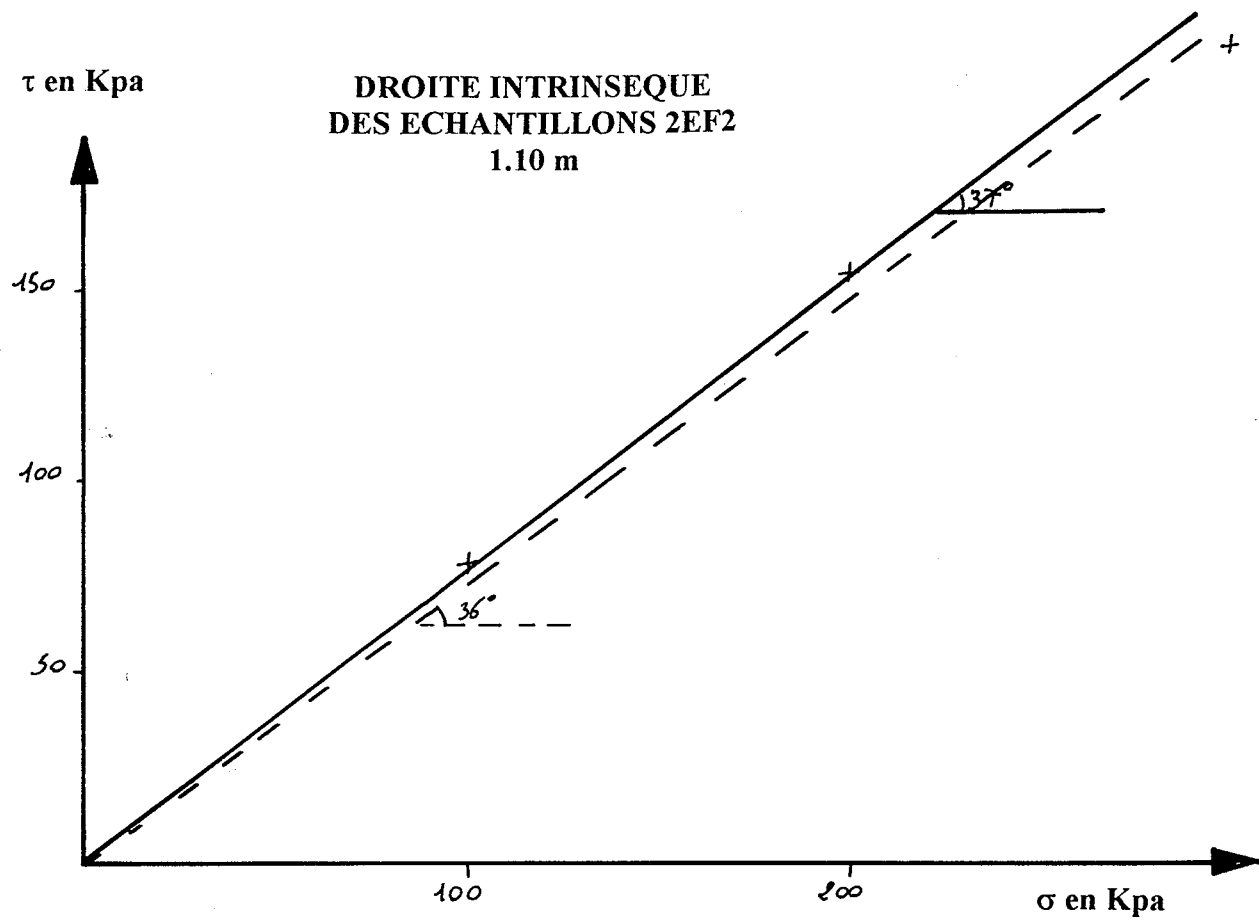
CISAILLEMENT RECTILIGNE DIRECT
2EF2 0.90 m
Courbes contrainte-déplacement

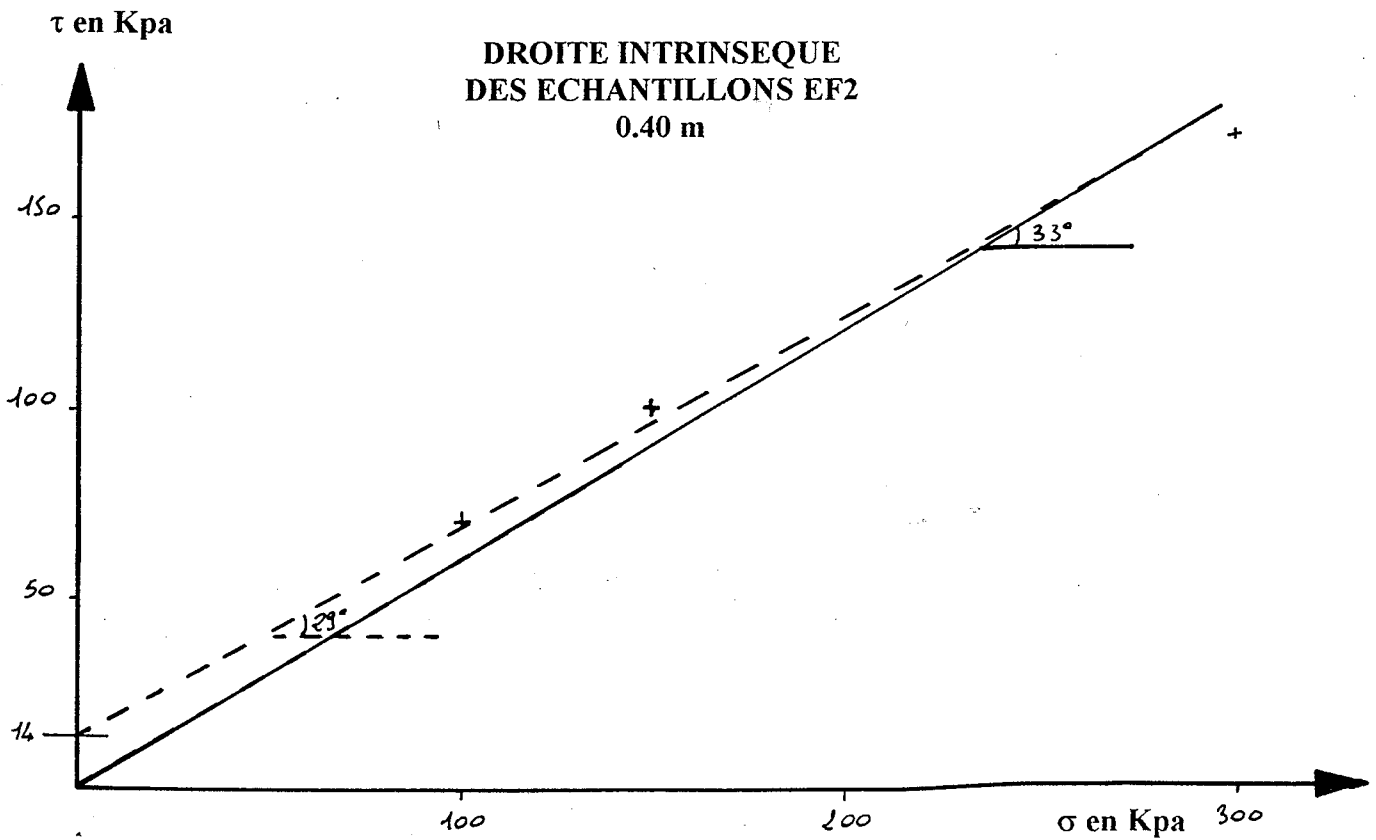
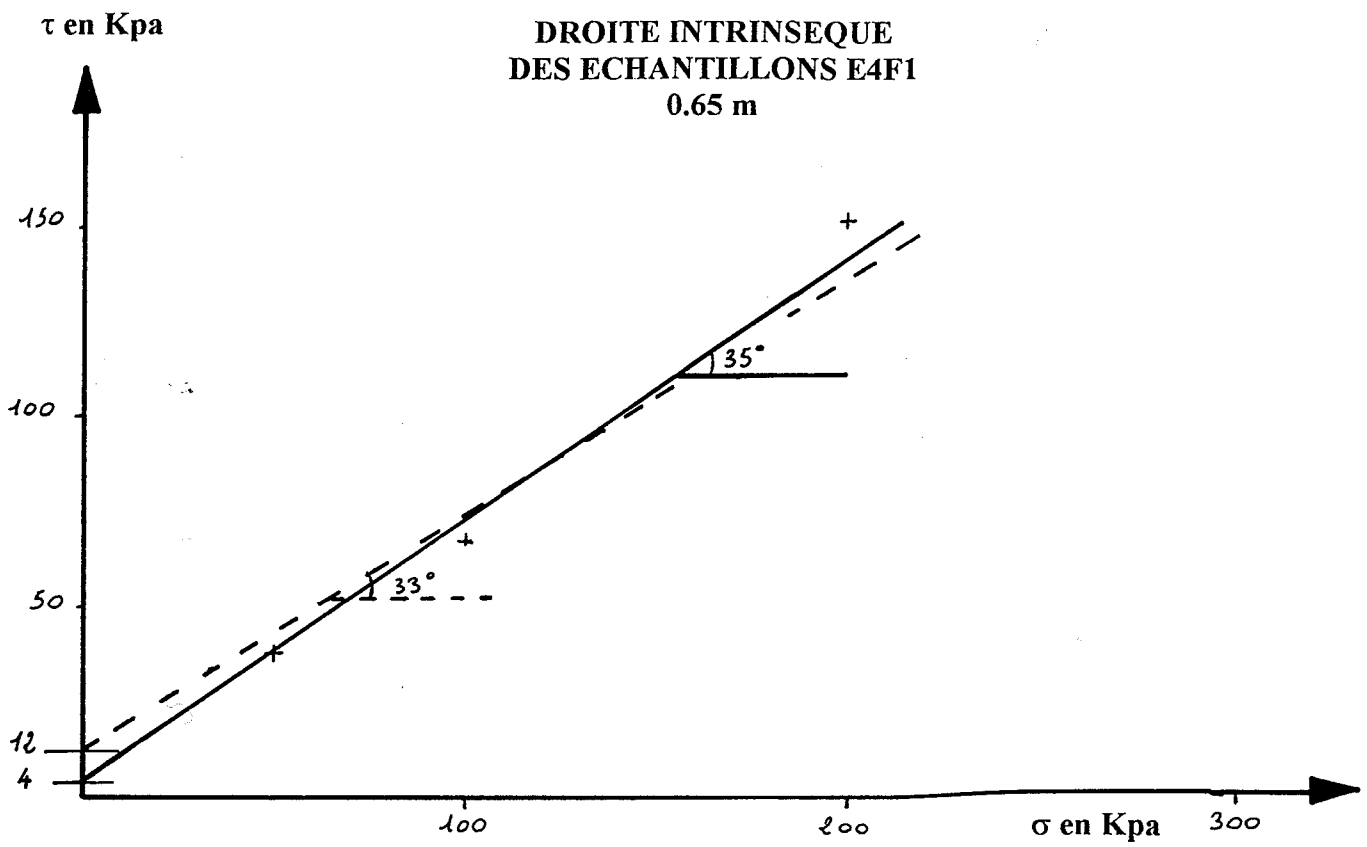


CISAILLEMENT RECTILIGNE DIRECT
2EF2 1.10 m
Courbes contrainte-déplacement



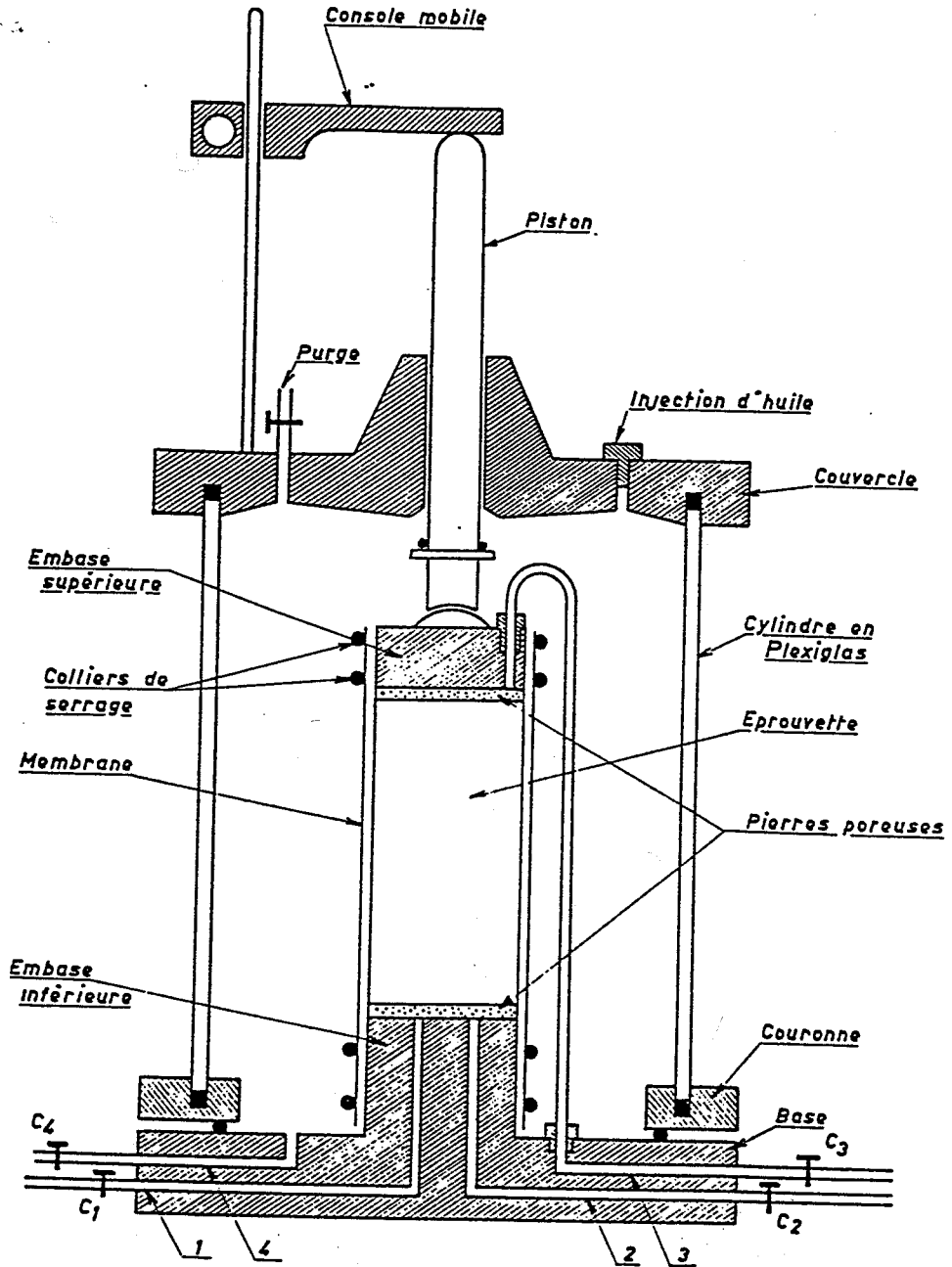






ANNEXE 10.

CISAILLEMENT TRIAXIAL

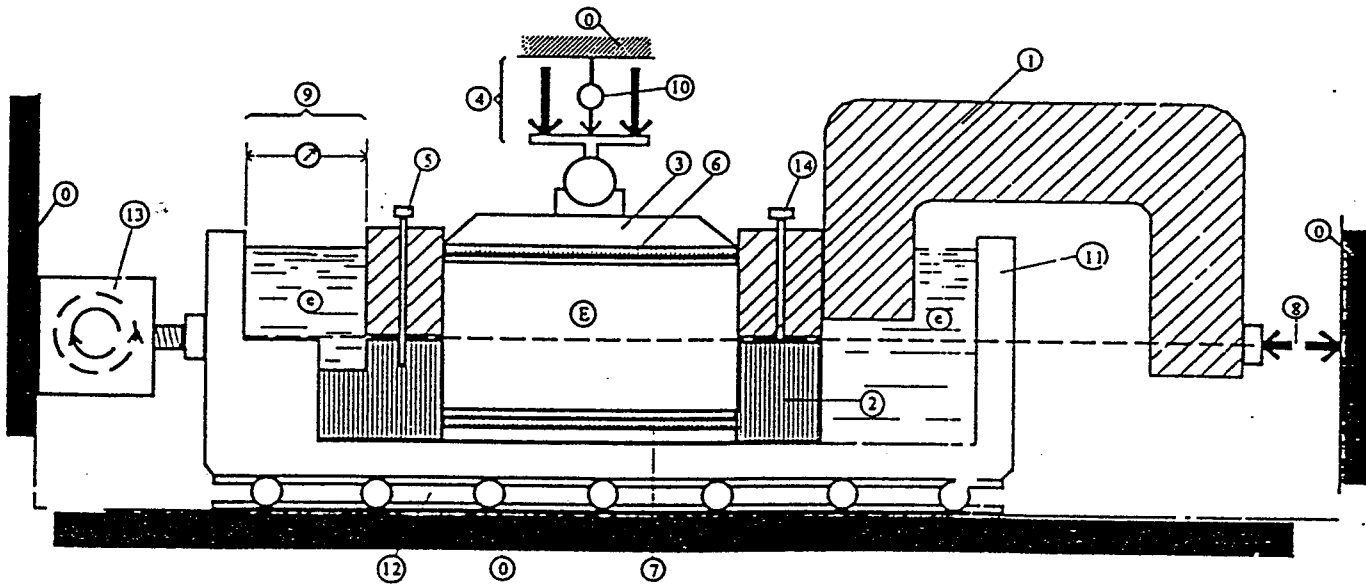


Essai consolidé non drainé CU + u à l'appareil triaxial avec mesure de la pression interstitielle.

SITE : Glissement de terrain de Super-Sauze dans les Alpes du Sud (France).		Date essai : Juin 1998		
		Profondeur : échantillon reconstitué		
Caractéristiques des éprouvettes				
Valeurs initiales		1	2	3
H ₀	mm	79	80	82
D ₀	mm	37	38	38
W (optimum proctor)	%	12	12	12
ρ _d	KN/m ³	19,2	19,2	19,2
ρ _s mesurée	Kg/m ³	2,72	2,72	2,72
ΔV saturation	cm ³	7	0,8	2,4
S _o		10,74	11,34	11,18
ΔVs consolidation	cm ³	0	0	0
s ₃	Kpa	100	300	400
Valeurs finales				
H	mm	68	69	69
D	mm			
W	%	15	14,3	14
Critère de rupture				
σ ₁ - σ ₃ max	Δh/h en %	11,7	13	11,7
	τ Kpa	280	490	580
U	Δh/h en %	2,8	3	4
	τ Kpa	16	70	90
Résultats				
C		20		
C'		24		
φ		50		
φ		55		

ANNEXE 11.

CISAILLEMENT ALTERNE.



- | | |
|--|---|
| 0 Bâti | 9 Dispositif de mesure du déplacement relatif horizontal δl |
| 1 Demi-boîte supérieure | 10 Dispositif de mesure du déplacement vertical δh |
| 2 Demi-boîte inférieure | 11 Châssis étanche |
| 3 Piston rigide | 12 Glissière sans frottement |
| 4 Dispositif d'application de l'effort vertical N centré sur le piston | 13 Système de déplacement à vitesse constante |
| 5 Solidarisation des demi-boîtes | 14 Vis de soulèvement de la demi-boîte |
| 6 Plaque drainante supérieure | e Eau déminéralisée |
| 7 Plaque drainante inférieure amovible | E Éprouvette de sol |
| 8 Dispositif de mesure de l'effort horizontal T | |

Cisaillement alterné : Procès verbal

Date de l'essai :	été 1998	Vitesses de cisaillement			
Sondage :	E4F1	en mm/mn			
Profondeur :	0,30 m	première et dernière alternances : 0,5			
ρ_s mesuré	2,72 t/m ³	les autres alternances : 1,2			
	Eprouvette avant essai		après essais		
n°	γ_d	γ_h	W%	σ en Kpa	W%
1	21,4 KN/m ³	18,5 KN/m ³	13,3	100	15
2	21,4 KN/m ³	18,8 KN/m ³	12	300	14,5
3					
	Cp	Cr	ϕ_p	ϕ_r°	
	20	0	36	20	