HAL
open science

remblais allégés en déchets de matière plastique : étude du procédé plastbloc

D. Daudon

To cite this version:

D. Daudon. remblais allégés en déchets de matière plastique : étude du procédé plastbloc. Géotechnique. Université Claude Bernard Lyon 1, 1992. Français. NNT : . tel-02286162

HAL Id: tel-02286162

https://theses.hal.science/tel-02286162

Submitted on 13 Sep 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 3592 année 1992

THESE

présentée devant

L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

SPECIALITE : GENIE CIVIL

par

Dominique DAUDON

Ingénieur I.N.S.A.
Titulaire D.E.A. (I.N.S.A.- Lyon)

REMBLAIS ALLEGES EN DECHETS DE MATIERES PLASTIQUES : ETUDE DU PROCEDE PLASTBLOC

soutenue le :12 février 1992 devant la Commission d'Examen

Jury :

M. GIELLY J. Président

M. BACOT J. Rapporteurs
M. KASTNER R.

M. COULET C. Examinateurs
M. LONG N.T.
M. NAVARRO A.
M. PERRIN J.

N° d'ordre : 3592 année 1992

THESE

présentée devant

L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

SPECIALITE : GENIE CIVIL

par

Dominique DAUDON

Ingénieur I.N.S.A.
Titulaire D.E.A. (I.N.S.A.- Lyon)

REMBLAIS ALLEGES EN DECHETS DE MATIERES PLASTIQUES : ETUDE DU PROCEDE PLASTBLOC

soutenue le :12 février 1992 devant la Commission d'Examen

Jury :

M. GIELLY J. *Président*

M. BACOT J. *Rapporteurs*
M. KASTNER R.

M. COULET C. *Examinateurs*
M. LONG N.T.
M. NAVARRO A.
M. PERRIN J.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée au sein de l'équipe Géotechnique du laboratoire Génie Civil Habitat et Environnement de l'Institut Universitaire de Technologie de Villeurbanne (69).

Je suis très reconnaissante à son Directeur Monsieur Jacques GIELLY de m'avoir accepté au sein de son laboratoire, puis dans son équipe lors de ma reconversion. Je le remercie également d'avoir accepté la présidence de ce jury.

Je remercie très sincèrement Messieurs Jean BACOT de l'INSA de Rennes et Richard KASTNER de l'INSA de Lyon d'avoir accepté de juger ce travail. Je suis touchée de l'honneur qu'ils m'ont fait en participant à ce jury.

Je suis particulièrement heureuse d'accueillir Monsieur le Professeur Alain NAVARRO de l'INSA de Lyon. Sa collaboration permettra sans doute un nouvel essor aux travaux de notre laboratoire.

Que Monsieur LONG du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, il trouve ici ma reconnaissance pour sa participation au jury, et les conseils prodigués concernant ce travail.

Que Monsieur Jacques PERRIN du bureau d'étude INGEVAL initiateur de ce procédé trouve ici toute ma reconnaissance. Son enthousiasme a beaucoup contribué à la réalisation de cette étude.

Je ne saurait comment remercier Christian COULET de la confiance qu'il m'a témoignée lors du suivi quotidien de cette recherche. Nul doute que sans lui le jour de cette soutenance n'aurait existé.

Que mes collègues enseignants du Département Génie Civil, et notamment Jean Marie PALLIER, reçoivent ici mes remerciements les plus vifs. Leur sympathie et leurs conseils m'ont permis d'assumer avec plaisir ma fonction d'enseignante.

C'est avec beaucoup de plaisir que j'adresse mes remerciements à Robert BADOUX qui, avec René THUILLIER, a concu et réalisé tous les appareillages nécessaires aux essais expérimentaux.

Que les récents Docteurs du département, et les futurs lauréats soient remerciés ici de leur amitié qui permet l'unité de notre équipe pluridisciplinaire. Leur aide ponctuelle est précieuse.

RESUME

REMBLAIS ALLEGES EN BLOCS DE DECHETS DE MATIERES PLASTIQUES: ETUDE DU PROCEDE PLASTBLOC

Le problème de stockage des déchets de toutes sortes, et notamment des matières plastiques, devient de plus en plus préoccupant. Les méthodes de recyclage existantes sont souvent coûteuses, et nécessitent un traitement préalable des déchets.

De plus, l'urbanisation grandissante oblige les pouvoirs publics à construire sur des terrains de plus en plus difficiles.

Le procédé Plastbloc est un procédé de remblais allégés en déchets de matières plastiques compactées. Il permet de résoudre les problèmes d'allégement des terrains compressibles et constitue un recyclage efficace et peu coûteux de grandes quantités de déchets.

Nous présentons ici des études en laboratoire et en vraie grandeur. Les tassements et l'action sur un écran ont été suivis sur un remblai expérimental instrumenté. Une étude en laboratoire du comportement des différentes interfaces en présences : bloc sur bloc, bloc sur sol, ainsi que le cisaillement d'un bloc est effectuée et conduit à une méthode de prédimensionnement. Une deuxième étude concernant le comportement du matériau sous des charges cycliques simulant un trafic lourd montre que le comportement est essentiellement liée à la densité initiale au démarrage des cycles de chargement.

ABSTRACT

PLASTIC WASTE LOW WEIGHT EMBANKMENTS : STUDY OF THE PLASTBLOC PROCESS.

The improve of waste products is going to be more and more worrying especially plastic waste. The existing techniques are generaly expensive and plastic waste need to be prepared.

However, because of rising urbanization, the Authorities are tend to build on difficult areas.

Plastbloc is a process of low weight embankments using compressed plastic waste blocks. It allows peoples to solve the problems of compressive soil lightening and is able to use up great quantities of waste.

We present here some full scale and laboratory studies. An instrumented embankment was build uponwhich settlings and active pressure were supervise during time. Laboratory studies was concerned with primarly the interface behavior : block against block, block against soil and shear of a block. This result in a design method being produced. The second study deals with the behavior of material under simulated cyclical heavy traffic loads , and shows the importance of the initial block density at the begining of the cyclical loading.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION 23

CHAPITRE 1 VERS UNE POLITIQUE DE RECYCLAGE 27

1.Déchets, les subir ou les maîtriser 27

1.1.Le déchet, une nouvelle matière première 27
1.2.La dure réalité des chiffres ou l'impérieuse nécessité du recyclage 28
1.2.1.La production 28
1.2.2.Le problème du stockage 29
1.2.3.Economiser l'énergie et les matières premières 30
1.3.Mise en place d'une politique de recyclage 31
1.3.1.Collecte et tri 31
1.3.2.Le prix à payer 34
1.4.Le problème des matières plastiques 34
1.4.1.Etat des lieux 34
1.4.2.Techniques nouvelles de recyclage 36
1.4.2.1.La régénération des PVC 36
1.4.2.2.Le recyclage des plastiques mélangés 38

2.Le génie civil au service de l'environnement 38

2.1.Impact de l'utilisation de déchets en construction 38
2.2.Revalorisation en génie civil des caoutchoucs et plastiques 40
2.2.1.Le PVC en couche de roulement 40
2.2.2.Le procédé PLASTERRE 40
2.2.3.Valorisation des pneus 41
Conclusion 44

CHAPITRE 2 GENESE D'UN PROCEDE 47

1.Quelques techniques de remblais allégés 48

1.1.Remblais allégés en sous-produits industriels 48
1.2.Utilisation de polypropylène alvéolaire 52
1.3.Les remblais en polystyrène expansé 54

1.3.1.Principe et mise en oeuvre 54
1.3.2.Contraintes d'emploi 56
1.3.3.Dimensionnement des ouvrages 57
1.3.4.Analyse économique 57
1.4.Un procédé intermédiaire: le béton de billes de polystyrène 57
1.5.Le procédé Pneuresil 58

2.Le procédé plastbloc 60

2.1.Principe et fabrication 60
2.2.Essais de laboratoire 62
2.2.1.Evolution des tassements 62
2.2.2.Essais de frottement 64

3.Propriétés des matériaux plastiques 65

3.1.Propriétés physiques des thermoplastiques 65
3.2.Propriétés mécaniques 67
3.3.Fluage des matières plastiques 68
3.4.Comportement cyclique 68
3.5.Vieillissement et dégradations des polymères 69
3.5.1.Dégradations physiques 70
3.5.2.Dégradations chimiques 70
3.6.Comportement mécanique des plastiques alvéolaires 70

Conclusion 75

CHAPITRE 3 REMBLAI EXPERIMENTAL 79

1.Construction d'un remblai expérimental 79

1.1.Fabrication des blocs de déchets 79
1.2.Caractéristiques 80
1.3.Mise en oeuvre 81

2.Etude des tassements 84

2.1.Dispositifs de mesure 84

2.2.Tassements des repères 85
2.2.1.Résultats 85
2.2.2.Analyse 86
2.3.Détermination de la déformation des blocs 88
2.4.Comparaison avec les essais de laboratoire 92

3.Etude de l'action sur un écran 95

3.1.Dispositifs de mesure et déroulement de l'essai 95
3.2.Suivi de la contrainte en fonction du temps 96
3.2.1.Résultats 96
3.2.1.1.Intensité de la contrainte sur l'écran 96
3.2.1.2.Inclinaison δ 97
3.2.2.Analyse 98
3.2.2.1.Phase de construction 98
3.2.2.2.Phase de suivi 100
3.3.Translation horizontale de l'écran 102
3.3.1.Résultats 102
3.3.2.Analyse 103

4.Essai d'extraction d'un bloc 103

4.1.Dispositifs 103
4.2.Résultats et analyse 104
4.2.1.Résultats 104
4.2.2.Analyse 106
Conclusion 107

CHAPITRE 4 COMPORTEMENT DES INTERFACES EN LABORATOIRE 111

1.Dispositifs d'essais 111

1.1.Fabrication des blocs modèles réduits 111
1.2.Appareillages de frottement et de cisaillement 113
1.2.1.Appareillage 1 "type empilement". 113
1.2.2.Appareillage type cisaillement plan 116
1.2.3.Essais effectués 118

1.3.Conditions de similitude 119

2.Essais de frottement 120

2.1.Essais préliminaires 120
2.1.1.Frottement sur polyéthylène pur en bloc 121
2.1.1.1.Essai à sec 121
2.1.1.2.Essai humide 123
2.1.2.Frottement sur feuilles de polyéthylène 125
2.1.2.1.Essai à sec 125
2.1.2.2.Essai "humide" 127
2.2.Essai de frottement bloc sur bloc 130
2.2.1.Essais appareillage à deux surfaces 130
2.2.1.1.Rappel de la méthode d'exploitation 130
2.2.1.2.Résultats 130
2.2.1.3.Analyse 132
2.2.2.Essai appareillage à une surface 134
2.2.2.1.Résultats 134
2.2.2.2.Analyse 136
2.2.2.3.Determination de μ*bbmoyen 139
2.3.Interface sol-bloc 140
2.3.1.Résultats 140
2.3.2.Analyse 141

3.Essais de cisaillement 144

3.2.Essais avec l'appareillage n°1 144
3.2.1.Résultats 144
3.1.2.Analyse 147
3.2.Essais à l'appareillage n°2 147
3.2.1.Résultats 147
3.2.2.Analyse 148

4.Stabilité de l'ouvrage au glissement. 151

4.1.Vérification du glissement bloc sur sol 152
4.2.Vérification du glissement bloc sur bloc 154
4.3.Applications numériques 154
Conclusion 157

CHAPITRE 5 ESSAIS de CHARGEMENTS CYCLIQUES EN LABORATOIRE 161

1.Modélisation du trafic routier 161

1.1.Action sous la chaussée 161
1.2.Etudes cycliques antérieures (bibliographie) 162
1.3.Choix des paramètres de notre expérimentation 163
1.3.1.Détermination de σ_{max} 164
1.3.2.Largeur du signal et nombre de cycles 166

2.Description des essais 168

2.1.Appareillage 168
2.2.Essais effectués 170

3.Cycles contraintes déformations 172

3.1.Essais statiques 172
3.2.Essais cycliques 174
3.2.1.Notations 174
3.2.2.Résultats et analyse 175
3.2.2.1.Domaine de déformation 175
3.2.2.2.Evolution de la raideur des cycles 179
3.2.2.3.Transformation de l'allure des cycles 183
3.2.2.4 Interprétation 184

4.Evolution des déformations en fonction du nombre de cycles 186

4.1.Essais préliminaires 186
4.2.Déformations au cours des cycles 189
4.2.1.Déformation cyclique moyenne 190

4.2.1.1.Allure générale 190
4.2.1.2.Influence du préchargement 192
4.2.1.3.Influence du vieillissement 194
4.2.2.Déformation cyclique maximale et minimale 197
4.2.2.1.Allure générale 197
4.2.2.2.Influence du préchargement 200
4.2.2.3.Influence du vieillissement 201
4.2.2.4.Comparaison avec un chargement statique 201
4.2.3.Amplitude de déformation 202

5.Prévision du comportement d'un ouvrage 205

5.1.Choix de la fonction $a_1 = f(d_{oc})$ 206
5.2.Prevision des tassements 209
Conclusion 212

CONCLUSION GENERALE 213

BIBLIOGRAPHIE 215
ANNEXE 1 221
ANNEXE 2 225
ANNEXE 3 229
ANNEXE 4 237

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Notre civilisation a de plus en plus de mal à éliminer les grandes quantités de déchets qu'elle produit. Le recyclage et la valorisation sont en plein essor et chaque corps de métier essaie d'y participer. A ce titre, les Travaux Publics contribuent à l'effort depuis plusieurs années et ont proposé de nombreux procédés qui permettent de valoriser de grandes quantités de déchets sans traitement particulier et à un moindre coût.

Le procédé Plastbloc est un procédé de remblai allégé en déchets de plastiques compactés créé à l'initiative du laboratoire de l'IUT GENIE CIVIL de Villeurbanne, du bureau d'étude INGEVAL (38), et de la société d'étude et de conseil TRIVALOR (73).

Il est nécessaire de caractériser ce nouveau "matériau" tant sur le plan expérimental que dans un but de modélisation théorique. Le travail exposé dans ce rapport concerne essentiellement la part expérimentale, la modélisation théorique faisant l'objet d'un autre travail de thèse.

Cette étude expérimentale a débuté par la construction d'un remblai instrumenté. Le travail s'est ensuite poursuivi par des études de frottements aux diverses interfaces. Elles conduisent à une méthode de prédimensionnement indispensable à toute réalisation courante de chantiers.

Enfin, un remblai en Plastbloc étant destiné à être utilisé sous trafic routier, une étude du comportement du matériau sous une sollicitation cyclique a été effectuée.

CHAPITRE 1
VERS UNE POLITIQUE DE RECYCLAGE

CHAPITRE 1 VERS UNE POLITIQUE DE RECYCLAGE

1.DECHETS, LES SUBIR OU LES MAITRISER

1.1.Le déchet, une nouvelle matière première

Quelle définition donne-t-on au terme déchets ?
"détritus", "débris", "ordures", "résidus", en fait éléments indésirables du cycle de la production dont il faut se débarrasser au moindre coût.
Celle de NAVARRO, moins péjorative, semble mieux adaptée à l'heure actuelle:" un déchet est un objet qui n'a pas d'usage en un lieu donné, à un moment donné, et pour une personne donnée" (NAVARRO 1991).
On peut ainsi prévoir qu'en un autre lieu, ou pour une autre personne, ce déchet n'en serait pas un. Devenant alors objet utile, il ouvre la voie au recyclage . Mais, pour que celle-ci soit correcte, il faut caractériser cet objet et mettre en évidence la spécificité du problème déchet:

- le déchet est généralement un matériau solide.

- il est constitué d'une infinité de composants. Le problème est donc rendu plus complexe, l'interaction entre les différents composants nécessitant d'être connue (ou à connaître).

- ainsi en vertu de cette diversité, l'étude du déchet devient un problème pluridisciplinaire faisant appel aussi bien aux chimistes, logisticiens, géotechniciens qu' aux publicistes, tout comme un nouveau produit .

Et d'où vient le déchet? Le plus souvent d'un cycle de fabrication "d'objets utiles", et comme le signale NAVARRO (1991), sa production est liée à une multiple fatalité:

- **fatalité biologique**, où tout métabolisme est générateur de déchets.
- **fatalité chimique**, où la réaction de 2 produits permet d'obtenir le 3ème recherché, et un 4ème parasite, mais indissociable de la fabrication du 3ème.
- **fatalité de production technologique**, où les chutes (pièces mal moulées, ou découpe de disques dans des plaques rectangulaires...) sont nombreuses, et où les impératifs de qualité augmentent le nombre des "rebuts".
- **fatalité économique**, puisque aucun produit n'a une durée de vie infinie.
- **fatalité écologique**, où commence le casse tête de l'ultime déchet (scories d'incinération d'ordures ménagères par exemple).

Devant cette inexorable production de déchets, il n'est plus possible alors que "de subir, et de se laisser submerger ou de trouver le moyen de maîtriser".

1.2.La dure réalité des chiffres ou l'impérieuse nécessité du recyclage

1.2.1.La production

Les chiffres les plus divers sont associés à nos productions de déchets, tant ménagers, qu ' industriels:
1 kg d'ordures ménagères produites par jour et par habitant, la fabrication d'une bicyclette entraîne la production d'une quantité égale en déchets.....

La France produit chaque année 579 millions de tonnes de déchets (Agence Nationale pour la Récupération et l'Elimination des Déchets (ANRED) 1991). Le sort de 70 % d'entre eux (400 millions de tonnes) émis par l'agriculture et l'industrie agro-alimentaire, est réglé par recyclage direct et régénération dans cette même industrie. Le reste se répartit entre les déchets industriels (25 %) et les ordures ménagères (5 %) (Figure 1.1) .

figure 1.1 : production de déchets en France (ANRED 1991).

Cette production ne cesse d'augmente chaque année, et dans tous les pays.

Enfin si la récupération d'un certain nombre de matériaux est déjà ancienne et bien organisée, (ferraille, papier, carton...) elle ne s'intéresse pas toujours aux matériaux jeunes comme par exemple les matières plastiques (tableau 1.1).

LES MATERIAUX RECUPERES ET LEUR TAUX D'UTILISATION (en 1989)

MATIERES 1989	QUANTITES RECUPERES (en tonnes/ an)	TAUX D'UTILISATION (quantité consommée/ production)
FERRAILLES		
(y compris vieilles fontes)	9 800 000	38 %
METAUX NON FERREUX (1988)		
Aluminium	284 000	30 %
Plomb	139 400	61 %
Cuivre	150 000	28 %
Zinc	156 300	24,5 %
PAPIERS CARTONS	**3 086 000**	**45,7 %**
VERRE (1)	**704 000**	**28 %**
PLASTIQUES	**100 000**	**1 %**
TEXTILES	**110 000**	**—**

tableau 1.1: Récupération des matériaux (ANRED 1991).

D'essor récent et actuellement très utilisée, l'industrie des plastiques, produit d'impressionnantes quantités de déchets, dont seule la part liée à la production du matériau plastique bénéficie d'une filière de recyclage ; or ils constituent 10 % en poids des ordures ménagères (figure 1.2). Egalement nombreux dans l'activité agricole, ils y représentent 10^5 tonnes .

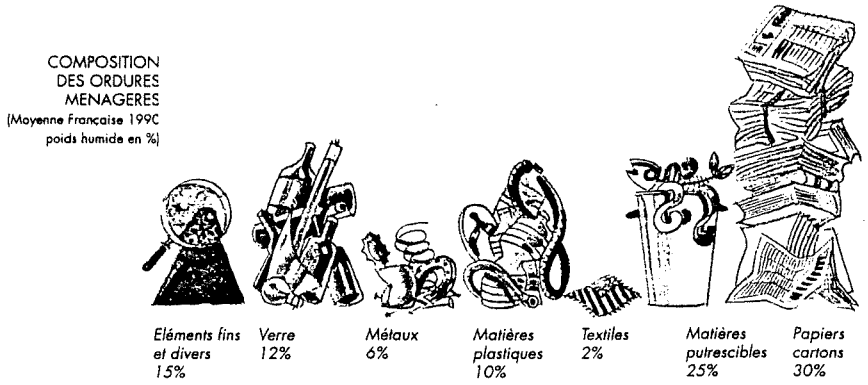


figure 1.2: composition des ordures ménagères(ANRED 1991).

1.2.2.Le problème du stockage

Le stockage est la plus ancienne et la plus facile des méthodes de gestion des déchets (mais y-a-t-il vraiment gestion ?): 45 % des ordures ménagères et des déchets industriels, non dangereux sont stockés en décharges. Ce stockage devient de plus en plus difficile devant les quantités mises en oeuvre, mais également devant la spécificité de certains déchets (encombrants, toxiques..)

Si différentes classes de décharges dites contrôlées ont été créées pour gérer cette spécificité, leur nombre ne peut être infini. Elles ferment les unes après les autres beaucoup plus rapidement que prévu (FORGES 1991).

Enfin, les communes acceptent de moins en moins que des nouvelles décharges, quelle qu'en soit la classe, s' implantent sur leur territoire. Si les élus y voient un apport

économique indéniable, les administrés, eux, ne veulent subir ni la ronde incessante des "camions poubelles" de France ou d'ailleurs, ni les odeurs et les risques.

On doit donc passer " d'une logique de déchets qui ne coûtaient rien, et que l'on entassaient dans des trous, à la notion de gestion et de qualité des déchets" comme le souligne R. CHABRILLAT (1991), " et c'est tout une révolution qui reste à faire".

1.2.3.Economiser l'énergie et les matières premières

Si depuis longtemps quelques "écologistes" ont dénoncé l'appauvrissement de la planète et la consommation anarchique des ressources naturelles, c'est le choc pétrolier de 1976 qui a servi de détendeur. A partir de cet événement, les entreprises et les particuliers ont pris conscience de la nécessité d'économiser les matières premières et les sources d'énergie (MAES 1990). On s'aperçoit alors que l'incinération des ordures ménagères produit de l'énergie calorifique, et peut remplacer dans une centrale thermique le charbon ou le fuel (`tableau` 1.2)(ANRED 1991).

UNE TONNE RECYCLEE FAIT ECONOMISER	ENERGIE (en kg de pétrole)	MATIERES PREMIERES (en kg)
Verre	80	1 200
Papiers cartons	200 à 400	1 700 à 2 400
Plastiques (PVC)	400	1 400
Ferrrailles	220 à 270	—
Aluminium	4 762	—
Huiles	850	1 500

tableau 1.2:Economies d'énergie (ANRED 1991).

La multiplication des initiatives prises çà et là par un industriel, une commune, ainsi que leur médiatisation entraîne une émulation dans la gestion des déchets, évinçant le gaspillage tout azimut des années 60. Ce retour en arrière (nos grand-parents étaient maîtres dans l'art d'accomoder les restes), avec une prise de conscience générale, et une volonté indéniable d'agir, devrait permettre l'essor du recyclage.

Nés de l'envahissement de la planète par des tonnes de déchets que l'on ne sait plus où et comment stocker, le recyclage et la valorisation constituent non seulement un enjeu écologique, mais aussi un enjeu économique indissociable. C'est en intégrant les deux paramètres que l'on pourra arriver à une véritable gestion des déchets.

1.3.Mise en place d'une politique de recyclage

La mise en place d'une telle politique n'est pas sans difficulté. Le recyclage ne peut être accepté que s'il est (BRUNYEELS 1986):

- logique: ne pouvant "faire du neuf avec du vieux" il convient de s'adapter en toute connaissance de cause aux problèmes qui découlent de la fabrication à partir d'un déchet (perte de résistance mécanique, esthétisme...)

- écologique: éviter impérativement de créer un autre déchet en ayant traité le premier.

- économique: l'introduction sur un marché bien établi d'un nouveau produit ne peut se faire que par sa qualité (peu probable dans le cas d'un déchet) ou par son prix.

1.3.1.Collecte et tri

Généraliser le recyclage des matériaux passe impérativement par l'organisation d'une collecte des déchets, et par leur tri. Le gisement est en effet disséminé dans tout le tissu industriel, et urbain ; il est nécessaire de prévoir, comme pour les ordures ménagères, une centralisation du gisement et une diminution du nombre d'interlocuteurs pour le "client". Enfin, il faut organiser le tri entre les matériaux recyclables, et les autres.

Il y a alors plusieurs types d'organisations possibles:

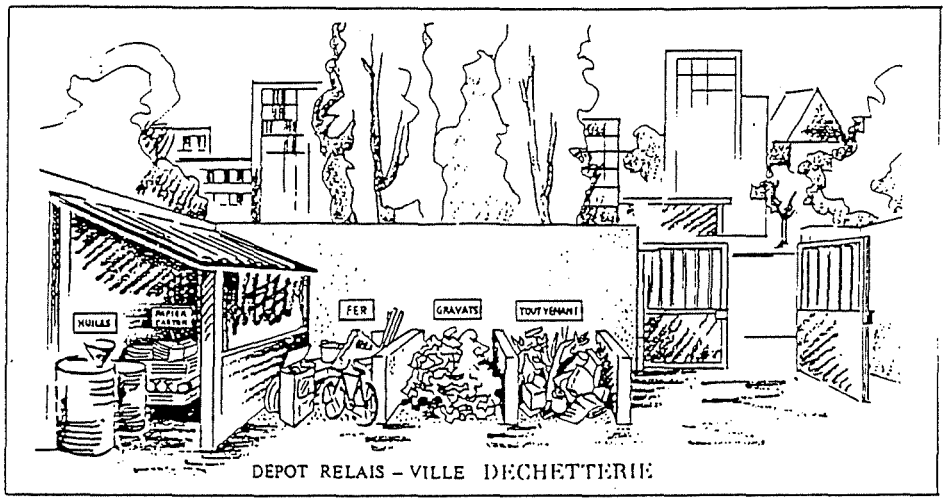
- soit en impliquant directement le consommateur dans la collecte et le tri.

- soit en créant une structure qui prend en charge les 2 étapes à la place du consommateur.

- soit un tri effectué par le consommateur puis une collecte collective.

La première organisation nécessite essentiellement la mise en place de "déchetteries" (figure 1.3) où le consommateur peut venir entreposer gratuitement ses déchets triés, mais est soumis à une réglementation concernant la quantité. Ce système

est le plus intéressant financièrement pour les collectivités locales. Par contre il ne résout pas le problème du tri des éléments recyclables des ordures ménagères.



De la simple aire aménagée aux quais surélevés, les coûts d'investissement correspondants peuvent varier de 50 000 F à 800 000 F.

Par son fonctionnement réduit en main-d'œuvre (transport, sélection faite par l'utilisateur), le coût d'une déchetterie peut être évalué à environ 8 F par habitant et par an.

Il est à noter que des économies substantielles peuvent être dégagées par l'installation d'une déchetterie :

— économies sur le coût de résorption des dépôts sauvages (enlèvement, remise en état des sites...),

— économies sur les coûts d'élimination et de transport des déchets dès lors valorisables.

figure 1.3:Principe de la déchetterie(LEFAUCHEUX 1985).

Dans ce cas là, on peut organiser le "tri à la source", c'est à dire avant la collecte par le consommateur. La mise en place des écopoubelles (ANRED 1990), "bleues" pour les plastiques, "vertes" pour les cartons..., suppose une grande discipline de la part des habitants. Une fois ce tri réalisé, la structure de collecte existante peut alors prendre le relais. Ce tri est généralement plus facile à mettre en oeuvre pour l'habitat individuel, que pour l'habitat collectif où l'utilisation du vide-ordures est courante.

Il reste enfin le tri et la collecte effectués par une structure unique. En dehors de celles d'évacuation des ordures ménagères, il existe des sociétés privées, essentiellement au service des industriels. Elles collectent leurs déchets, qu'elles se contentent généralement de mettre en décharge. La société MOS (Monin Ordures Services) commence à proposer toutes les étapes: collecter, trier, recycler (figure 1.4).

Les autres expériences de triage sont marginales, et souvent mises en place dans un double but écologique et social : de jeunes chômeurs, ou marginaux, sont recrutés par une "entreprise association " qui, tout en devenant un maillon de la chaîne du recyclage, contribue à la réinsertion de ces jeunes.

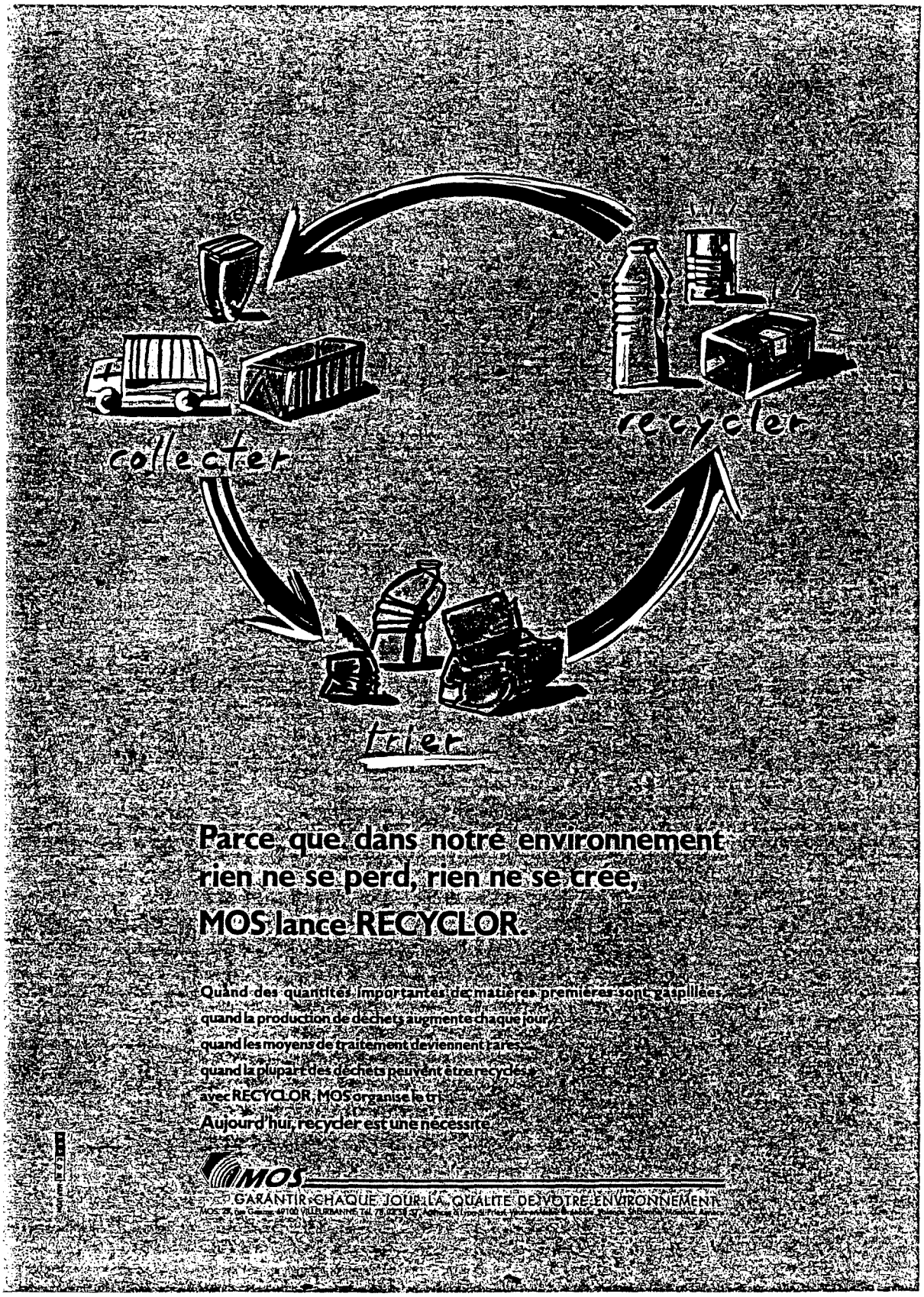


figure 1.4: "collecter, trier, recycler".

1.3.2.Le prix à payer

Le traitement d'une tonne d'ordures ménagères s'élève à environ 500 Francs, dont 350 Francs uniquement pour la collecte. Ce coût est supporté par la collectivité et le contribuable.

Mais le choix de l'une ou l'autre des méthodes de "tri-collecte" dépend généralement du type de déchet. Le tri à la source, adapté aux besoins des particuliers, beaucoup moins cher est le plus souhaitable, tant que l'on ne sera pas prêt à payer le prix de l'élimination de nos déchets.(ANRED 1990) (tableau 1.3).

COUTS DES DIFFERENTS TRAITEMENTS (exploitation + amortissement, recettes éventuelles liées à la valorisation déduites) / MODES DE TRAITEMENT (en 1989)	COUTS OBSERVES (en francs par tonne) MINI	MAXI	MOYEN
Incinération simple	80	270	170
Incinération avec récupération d'énergie	96	253	165
Compostage lent	100	175	132
Compostage accéléré	110	260	176
Broyage et mise en décharge	66	196	116
Décharge contrôlée	35	100	63
Décharge contrôlée compactée	35	100	63

tableau 1.3:Coût de traitement des ordures ménagères (ANRED 1991).

Dans le cas de déchets industriels, le service de tri sera en supplément de celui déjà offert (collecte) par les entreprises spécialisées. Selon elles, l'industriel devra trier lui-même, ou bien payer.

1.4.Le problème des matières plastiques

1.4.1.Etat des lieux

En 1988, le gisement français des déchets de matières plastiques s'élevaient à 1,2 millions de tonnes, dont 60 % provenaient des ordures ménagères. Le reste est constitué de films agricoles, et des chutes de l'industrie de transformation. Mais s'ils sont estimés à 10 % du poids total de déchets, ils n'en constituent pas moins de 25 à 30 % du volume, entraînant un problème de stockage, lié également à leur durée de vie (200 ans environ).

Les matières plastiques ne bénéficient pas d'un réseau de récupération bien organisé, car le matériau est jeune. 45 mille tonnes sont recyclées chaque année, essentiellement les chutes propres de l'industrie de transformation. Actuellement donc, seuls les déchets nobles, c'est à dire propres et homogènes bénéficient d'un recyclage

important. De plus certaines matières plastiques sont parfois chimiquement incompatibles entre elles, ce qui constitue un obstacle au recyclage systématique des matières mélangées.

La phase plastique contenue dans les ordures ménagères est donnée à la figure 1.5:

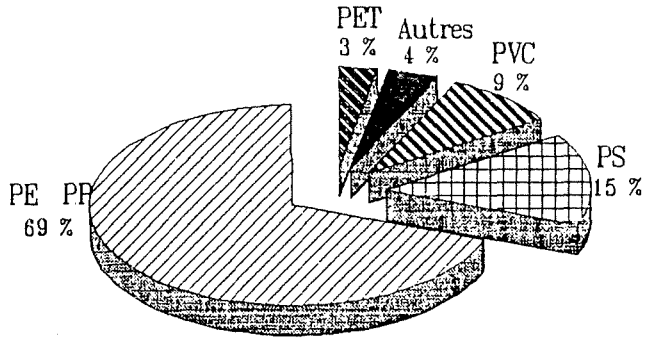


figure 1.5 :phase plastique des ordures ménagères (CHRETIEN 1988).

La part la mieux recyclée actuellement ne concerne que le PVC, soit seulement 9 % du total. Il est donc indispensable, pour valoriser ces déchets, de mettre en place des filières avec une phase de triage des plastiques parmi les ordures ménagères, puis des plastiques entre eux (figure 1.6).

Cette phase de tri se fait souvent manuellement et nécessite de l' expérience pour reconnaître les différents plastiques. Les initiatives de tris mécaniques sont marginales car très coûteuses et difficiles à implanter.

Actuellement la principale filière de valorisation de ces plastiques est l'incinération énergétique des ordures ménagères (35 % des plastiques). Mais on lui reproche justement de dégager dans l'atmosphère des gaz toxiques(chlore) liés à la combustion des PVC notamment.

Pour le reste des matières plastiques, c'est souvent la mise en décharge qui constitue la solution actuelle (à plus de 80 % des cas); le taux de recyclage du plastique des ordures ménagères étant de moins de 1 % (hors incinération).

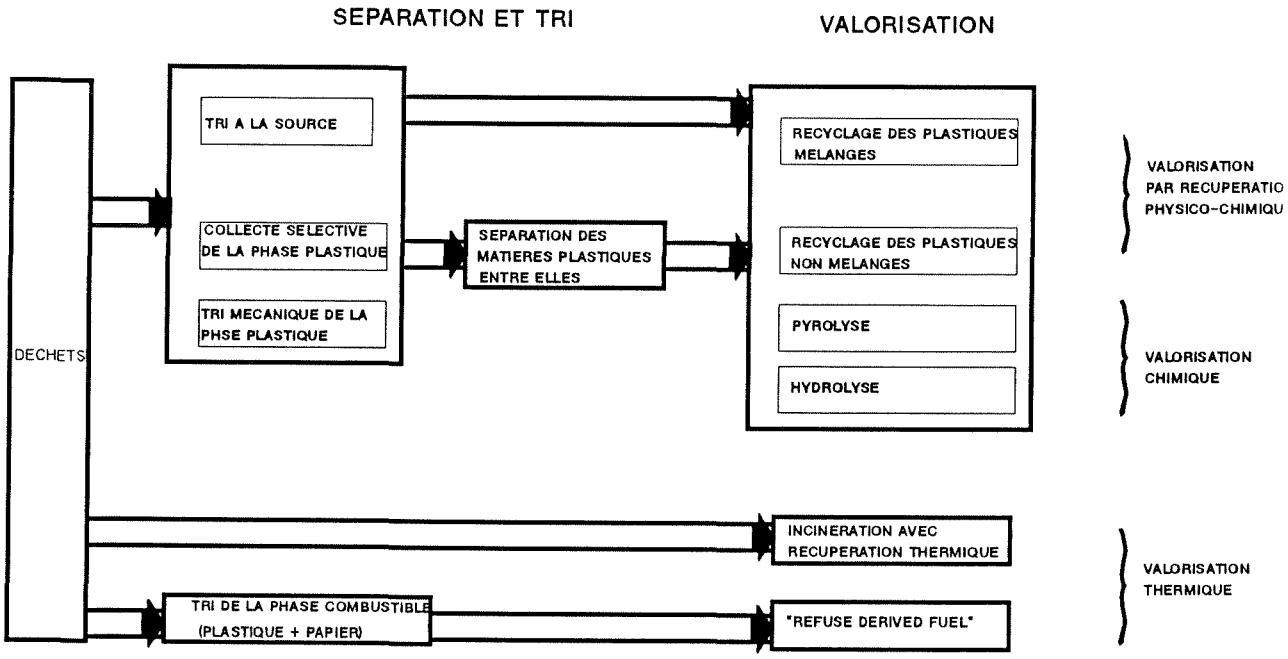


figure 1.6:filières de valorisation des plastiques (BUEKENS 1988).

1.4.2.Techniques nouvelles de recyclage

Elles sont encore peu nombreuses et se heurtent à des problèmes de rentabilité (difficulté de collecte, gisements insuffisants) et d'acceptation par le public. Le matériau recyclé est généralement moins performant mécaniquement et moins attrayant.

On distingue les techniques qui nécessitent un tri des plastiques entre eux, et celles qui peuvent revaloriser les mélanges, contaminés ou non par des papiers, des sables ...

1.4.2.1.La régénération des PVC (figure 1.7)

Elle nécessite un tri entre les matériaux, qui ne doivent pas contenir plus de 10 % d'impuretés. Après broyage, puis lavage, puis micronisation, le PVC (polychlorure de vinyle) est tamisé. Le produit obtenu est à 90 % du PVC et est utilisé soit en extrusion (piquets...), en enduction (films, blisters...). Ce procédé est bien au point, mais il se heurte aux difficultés d'approvisionnement en bouteilles de PVC et surtout à

l'apparition de bouteilles en polyéthylène téréphtalate (PET). Or ce sont deux matières plastiques totalement incompatibles et difficiles à distinguer.

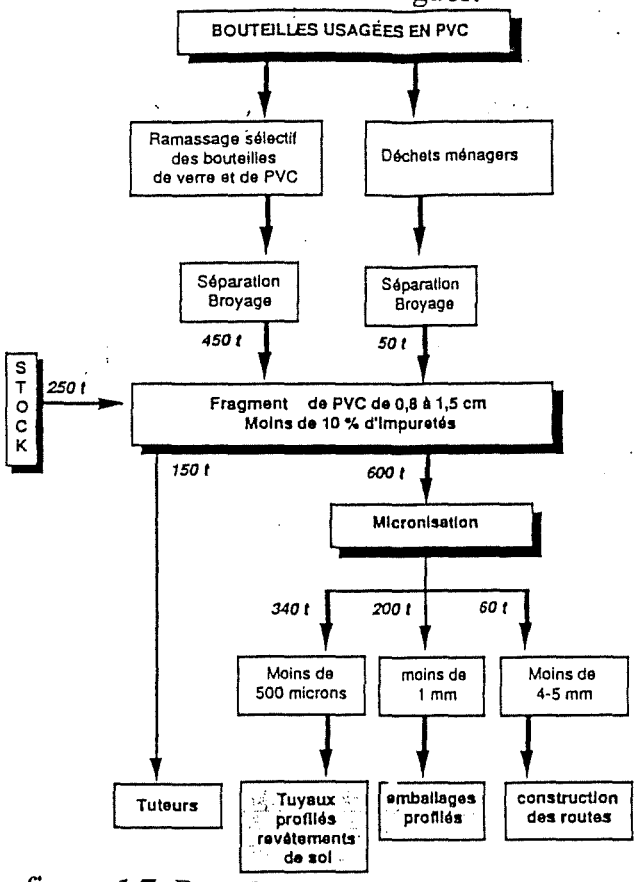


figure 1.7 :Recyclage des P.V.C.

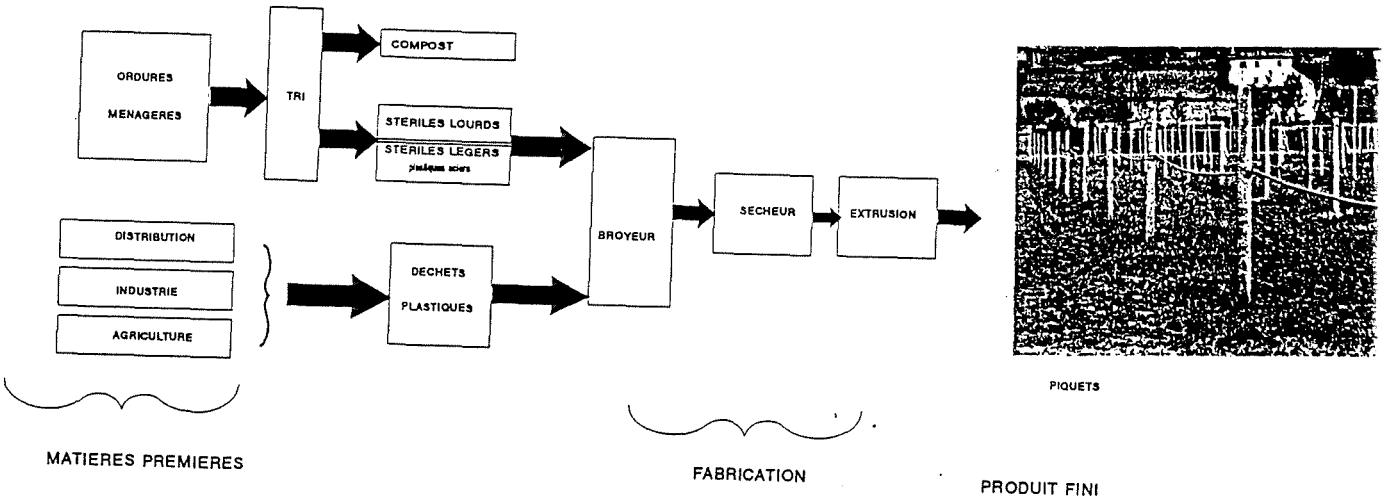


figure 1.8 : Recyclage des Plastiques mélangées (CEP ADOUR 1986).

1.4.2.2.Le recyclage des plastiques mélangés (figure 1.8) (CLAERBOUT 1988)

Ils permettent de revaloriser essentiellement de polyoléfines (ce sont les polymères hydrocarbonnnées : éthylène propylène qui constituent la majorité des films...) dont les propriétés mécaniques sont améliorées par rajout de PVC, de polyamide, polypropylène,pouvant également être des déchets (GOBRON 1989).
L'un des procédés autorise une contamination importante (jusqu'à 25 %) et permet donc de récupérer directement la phase légère des ordures ménagères (BOUCHER 1988). Il suffit que l'un des polymères en fusion soit en phase continue. L'autre procédé réutilise uniquement la phase plastique des ordures ménagères. Le passage dans une extrudeuse permet de fabriquer des palettes, des piquets de vigne, du mobilier urbain...
Ces procédés, qui ne nécessitent ni lavage, ni micronisation, sont intéressants car ils peuvent être implantés près des usines d'incinération où aboutissent les collectes.

D'autres techniques existent, mais elles sont généralement chimiques, et entraînent une grande consommation d'énergie allant à l'encontre des objectifs d' une revalorisation.

2.LE GENIE CIVIL AU SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT

Le développement de techniques de valorisation en génie civil est particulièrement intéressant, car elles permettent généralement de réutiliser des déchets en grandes quantités, et surtout sans traitements préalables. Mais elles nécessitent également un suivi dans le temps de la qualité et du comportement. Une étude d'impact permettant alors de faire le bilan des effets positifs et négatifs est indispensable.

2.1.Impact de l'utilisation de déchets en construction

GILDEY (1984) considère que, pour déterminer cet impact correctement, on doit d'abord conserver à l'esprit le matériau neuf qui peut être utilisé, et son remplaçant en déchet, puis ensuite se poser deux questions:

- Quel est l'impact général de l'utilisation d'un déchet donné pour une construction ?
- Cet impact est-il-plus ou moins sévère que celui d'une utilisation, à la fois d'un matériau neuf et de la mise en décharge du déchet ?

Considérer ce deuxième aspect constitue une nouveauté et la preuve d'une prise de conscience des problèmes de stockage sur l'environnement. Il faut donc toujours l' associer pour une étude d'impact complète.

Deux types d'impacts doivent alors être considérés notamment en ce qui concerne la mise en décharge qui, mal contrôlée, engendre de nombreux problèmes:

- dégradation de l'environnement (économique et esthétique).
- dégradation de la santé humaine.

Malheureusement ils sont difficiles à évaluer, les relations de causes à effets n'étant pas directes et encore plus difficiles à quantifier.

Deux facteurs peuvent engendrer un impact négatif: soit le déchet est directement dangereux pour l'homme ou son environnement, soit certains facteurs peuvent le rendre dangereux.

Passant en revue toutes les utilisations possibles de déchets en génie civil, l'auteur constate que la valorisation par mise en remblai n'a que peu d'impact direct, sur la santé de l'homme. En effet, les affaissement ou glissements de terrains sont considérés comme des risques géotechniques, et les déchets présentent le même impact que s'ils sont enfouis comme dans les décharges.

Par contre en ce qui concerne l'impact sur l'environnement il faut alors considérer :

- l'érosion due au vent ou à la pluie, qui peut contaminer l'air ou l'eau conduisant alors à un effet négatif sur la santé.
- les infiltrations d'eau à travers le remblai, qui peuvent contaminer des nappes phréatiques.
- enfin il peut y avoir contamination de la chaîne alimentaire.

Mais ces impacts sont pratiquement identiques à ceux liés à l'enfouissement en décharge de ces mêmes déchets. Il est parfaitement possible sinon de les éliminer, au moins de les limiter pour rendre l'utilisation de déchets possible. La solution la plus efficace consiste à végétaliser les talus de remblais, ce qui contribue à la fois à limiter le risque géotechnique (glissement de terrain...), l'érosion et l'infiltration.

Bien que la valorisation des déchets en construction rapproche l'homme du risque potentiel (lié au déchet), elle engendre généralement un effet positif, figeant les déchets de façon plus complète qu'un enfouissement.

2.2.Revalorisation en génie civil des caoutchoucs et plastiques

Si l'idée d'une revalorisation en génie civil est ancienne en ce qui concerne les résidus de démolition, les mâchefers..., elle reste assez confinée pour les plastiques.

C'est essentiellement en travaux routiers, terrassements et couches de roulement que des procédés ont été mis au point.

2.2.1.Le PVC en couche de roulement

Déjà recyclé par le procédé de régénération exposé au paragraphe précédent, le PVC est également utilisé en technique routière:

- soit dans la préparation du liant noir (HAMEAU 1975).
- soit en renforcement (armature) dans l'enrobé hydrocarboné (BENSE 1983).

La première méthode consiste à mélanger des bouteilles en PVC avec du brai houillé hydrocarboné (SAMONO 1988) . Les différentes études qui ont conduit à cette composition montre que la résistance à la rupture du liant "noir" augmente en fonction de la quantité de bouteilles introduites, alors que la déformation diminue.

Le procédé de renforcement d'enrobé permet une revalorisation de déchets mélangés, mais contenant au moins 90 % de plastique. Déchiquetés, puis incorporés dans l'enrobé comme un granulat, ils se conduisent comme une armature rigide lorsque le matériau refroidit. On observe à l'utilisation une diminution de l'orniérage et des remontées de fissures.

Mais ces procédés nécessitent un gisement potentiel suffisamment bien approvisionné pour que ces techniques puissent être développées à grande échelle et être rentables.

2.2.2.Le procédé PLASTERRE

Développé en 1985, ce procédé permet de revaloriser des déchets plastiques divers en renforcement de sol (RAKOTONDRAMANITRA 1988).Les déchets utilisés peuvent être de toute nature, (ordures ménagères, ou origine industrielle), et ne subissent ni triage, ni lavage préalable. Disposés en lits à raison de 4 kg/m^2, en alternance avec des couches de sol, lors de la construction d'un remblai (figure 1.10), le plastique joue alors le rôle d'un géotextile et renforce les sols médiocres.

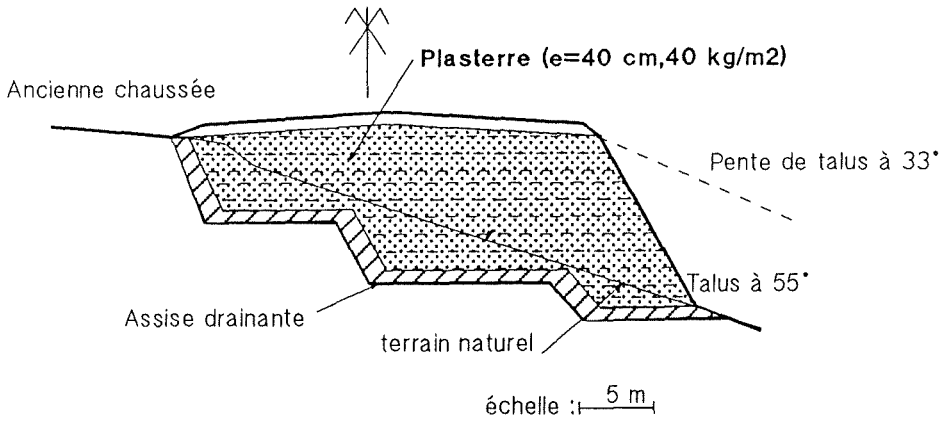


figure 1.10 : remblai en Plasterre (COULET, DALI, PERRIN 1988).

2.2.3.Valorisation des pneus

Les pneus constituent un maillon important de la contribution du génie civil au recyclage des déchets. Le gisement de pneumatiques usagés s'élève à 30 millions (soit 379 000 tonnes), et plus de 50 % sont stockés en décharge.

Deux techniques sont actuellement au point: Pneusol à la fois en renforcement et en allègement des solset Pneuresil en allégement de sols uniquement.

- **Pneusol** (LONG 1985). Les flancs des pneus sont désolidarisés de la bande de roulement par découpage. Les différents éléments sont disposés sur le sol, à plat (flancs des pneus) ou sur le champ pour la couche de roulement.
Les différents éléments sont fixés les uns sur les autres pour permettre une continuité de la nappe (figure 1.11). Une couche de sol est ensuite disposée puis compactée. Le remblai est donc une succession de couches de pneus et de sol. Actuellement environ 200 chantiers ont été réalisés dans le monde entier.

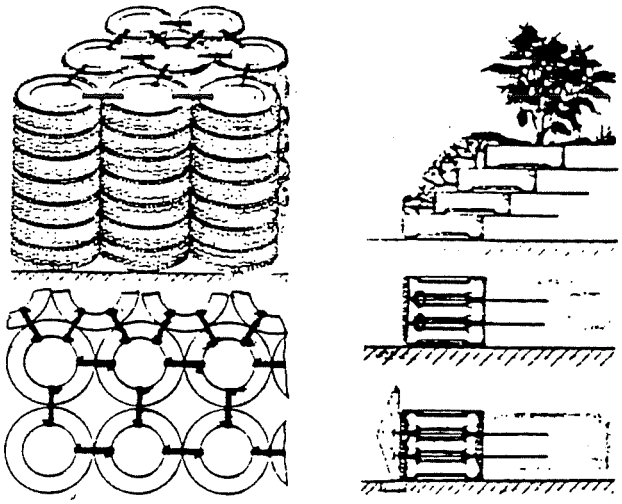


figure 1.11 : Principe du Pneusol (CARTIER,LONG 1981).

- **Pneuresil** (MARCHAL 1989) . Il permet d'alléger des sols. Le pneu n'est pas découpé: disposé tel quel en colonne, il n'est rempli par aucun matériau, et seule la surface supérieure de la colonne, est surmontée d'un treillis et d'un géotextile afin d'occulter les vides (figure 1.12). La densité obtenue est d'environ de 0,4. Le principal problème de ce procédé est lié au tassement important du remblai dû à l'affaissement des pneus sous charges ; il est résolu par la fabrication de colonnes de pneus précomprimés .

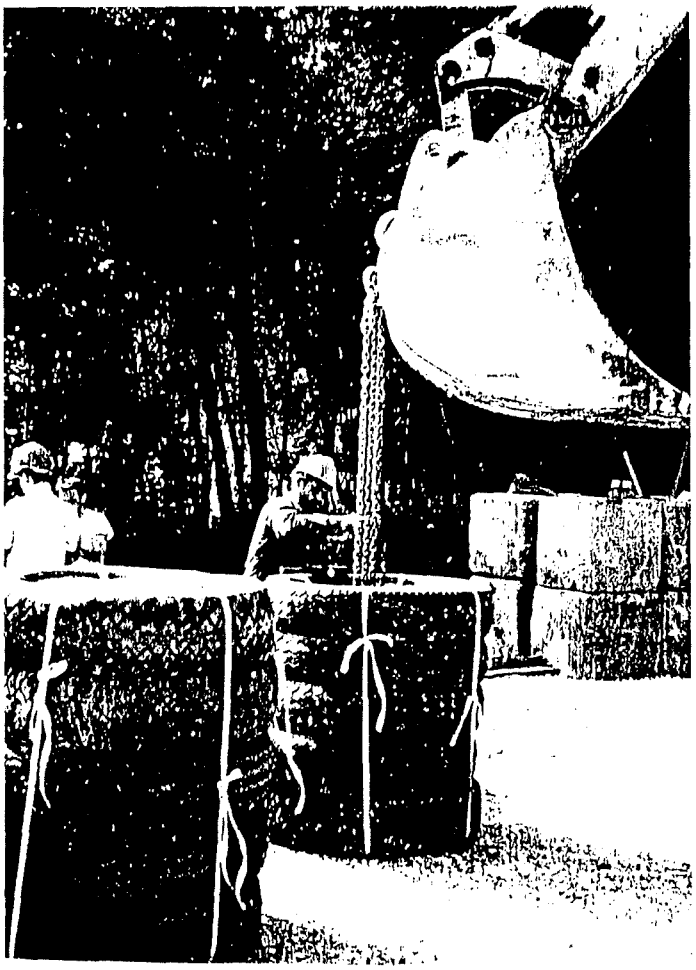


figure 1.12 : Procédé Pneurésil (photo CETE BRON 69).

Les divers chantiers réalisés à l'aide de ces techniques de valorisation sont encore peu nombreux. Ils se heurtent à 4 obstacles majeurs (MAIRE 1991):

- d'abord le poids des habitudes dans une profession peu encline à innover.
- le manque d'information concernant les techniques existantes.
- le manque d'organisation du marché des déchets utilisables disponibles: les stocks sont très faibles, et d'un approvisionnement discontinu.
- enfin à un cloisonnement des budgets, les décideurs routiers n'étant pas ceux qui gèrent l'environnement et les déchets.

Conclusion

Le problème du recyclage des déchets n'est pas un problème simple. Il nécessite d'abord un changement radical des habitudes acquises ces dernières années au cours de l'ère de la "consommation", par les industriels et les particuliers. Les difficultés d'abord rencontrées concernent la mise en place simultanée de la collecte et du tri des déchets. Et c'est seulement lorsqu'un gisement réel de bonne qualité (entendons par là : bien trié, et en quantité suffisante) existera que les techniques innovantes pourront être exploitées à grande échelle, et déboucher sur l'existence d'un véritable marché du produit recyclé.

Le problème du financement, dans la chaîne du produit neuf au produit recyclé, des indispensables phases de tri et de collecte n'est pas résolu.

Il importe donc, notamment dans le cas des matières plastiques où les filières de recyclage sont presque inexistantes, de trouver des solutions permettant de réduire au maximum le coût. Le recyclage des déchets bruts et mélangés doit être développé d'autant plus que les nouveaux plastiques biodégradables ne pourront pas prendre le relais avant plusieurs années (VERT 1991).

CHAPITRE 2 :
GENESE D'UN PROCEDE

CHAPITRE 2 GENESE D'UN PROCEDE

De plus en plus souvent, l'urbanisation croissante oblige les pouvoirs publics à implanter des équipements dans des zones où les terrains sont compressibles, ou soumis à des glissements.

Ces besoins sans cesse grandissants ont conduit à améliorer les techniques de renforcement des sols, mais surtout à en élaborer de nouvelles, concernant l'allégement de ces derniers.

Le matériau d'allégement doit alors répondre à un certain nombre de qualités qui, outre sa légèreté, doivent être (CHAZAL 1985):

- des tassements sous contrainte faibles et qui évoluent peu dans le temps (fluage).

- une bonne résistance mécanique aux sollicitations de trafic

- une insensibilité aux conditions d'humidité et de gel.

- une résistance suffisante aux produits chimiques (hydrocarbures).

- la non-altération des propriétés lors du vieillissement.

- l'étude du frottement est indispensable dans le cas d'un matériau comportant des blocs (polystyrène...) .

La recherche d'un matériau répondant à ces exigences, disponible en grande quantité et peu coûteux, a d'abord conduit à des études de remblais en sous-produits industriels (mâchefers, cendres volantes) plus légers que le sol (densité = 1 à 1,2), ces matériaux n'ont pas connu le développement espéré à cause des problèmes géotechniques qu'ils ont posés (tassements importants, perte de portance, pollution...). On s'est ensuite tourné vers des matériaux dit ultra-légers (polystyrène expansé...) de densité inférieure à 0,1, mais dont le coût est très élevé. Ces derniers sont actuellement les plus utilisés.

1.QUELQUES TECHNIQUES DE REMBLAIS ALLEGES

Dans les années 75, une politique globale d'utilisation massive des sous-produits industriels en technique routière a été lancée.

Souhaitant savoir si ces sous-produits pouvaient être employés en remblais allégés, le LCPC a procédé à de nombreux essais de faisabilité.

Il est intéressant de noter que c'est autant par besoin de recyclage, que par nécessité de mettre au point de nouvelles techniques allégées, que ces études ont démarré. En effet, la Norvège procède à cette même époque à la mise au point de remblais en polystyrène expansé.

1.1.Remblais allégés en sous-produits industriels

Au moment où ces études sont lancées, un certain nombre de matériaux servent déjà à alléger le sol. La liste est donnée dans le tableau 2. 1.

Les cendres volantes ont déjà été utilisées, mais ce sont souvent des matériaux naturels (tourbes, écorces ..) qui servent à "remblayer léger".

Les autres matériaux sont souvent plus chers (argile expansée), ou non disponibles en grandes quantités (déchets de béton cellulaire)

Devant l'ampleur des sous-produits à écouler dans certaines régions, les divers essais de faisabilité menés pour valider l'utilisation en techniques routières ont surtout concerné:

- Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (notamment celles de la région parisienne) dont le gisement semble inépuisable (ces résidus représentent 30 % du tonnage des ordures brûlées).

- Les cendres volantes provenant du dépoussiérage des fumées de centrales thermiques au charbon.

- et enfin les phosphogypses, résidus de fabrication d'engrais agricoles phosphatés. Ils résultent de la réaction chimique du gypse naturel avec l'acide sulfurique.

Matériau	Poids volumique approximatif (kN/m³)	Commentaires	Références
Ecorces (pin et sapin)	8 - 10	Déchet relativement peu utilisé car il est difficile à compacter. Le risque de pollution des eaux souterraines par les eaux suintant de l'écorce peut être réduit ou éliminé en utilisant un matériau gardé initialement dans l'eau, puis séché à l'air pendant quelques mois. Le rapport du volume compacté au volume initial est de l'ordre de 50%. Le tassement à long terme de l'écorce peut atteindre 10% de l'épaisseur après compactage.	Knutson (1973)
Sciure (pin et sapin)	8 - 10	Déchet normalement utilisé en-dessous de la nappe phréatique, mais qui a déjà été employé dans des remblais dont les talus ont été scellés à l'asphalte ou avec des feuilles de plastique.	Gandahl (1971) Lea, Brawner (1963) Flaate et Rygg (1964) Nelson, Allen (1974)
Tourbe : séchée à l'air, broyée balles pour l'horticulture balles comprimées	 3 - 5 3 - 5 2 8-10	Expérience particulièrement profitable en Irlande pour réparer les routes en service, en remplaçant le gravier par de la tourbe en balles.	
Cendres volantes, laitiers, cendres, etc.	10 - 14	Les déchets tels que les cendres volantes sont généralement placés au moins à 0,3 m au-dessus du niveau maximal des crues. Ces matériaux peuvent parfois faire prise, ce qui provoque un accroissement significatif du coefficient de sécurité au cours du temps. Dans certains cas (celui des laitiers des hauts fourneaux, par exemple), les matériaux absorbent de l'eau au cours du temps, ce qui augmente leur densité.	Margason, Cross (196 Sherwood, Ryley (196
Déchets de béton cellulaire	10	Le volume de ce matériau décroît considérablement lors du compactage. Si le compactage est trop intense, il se transforme en poudre.	Novak (1977)
Béton cellulaire à faible densité	6	C'est un nouveau matériau expérimental léger, fabriqué à partir de ciment Portland, d'eau et d'un agent moussant dénommé « Elastizell ». Le matériau est coulé sur place.	Novak (1977)
Schistes ou argile expansés (granulats légers)	5 - 10	Les propriétés physiques de ce matériau (densité, résistance, compressibilité) sont généralement excellentes pour une utilisation comme matériau de remblai léger, bien qu'elles varient un peu avec les procédés de fabrication. Le matériau est assez onéreux, mais il peut s'avérer économique comparé aux autres techniques de construction des routes de catégorie élevée. L'épaisseur minimale de la chaussée au-dessus de l'argile est généralement de l'ordre de 0,6 m.	
Polystyrène expansé	1	Matériau extrêmement léger utilisé jusqu'à maintenant uniquement aux États-Unis et en Norvège, où l'expérience acquise est encourageante et où son utilisation s'étend de plus en plus. En Norvège, le matériau est utilisé sous forme de blocs. L'épaisseur de la chaussée varie entre 0,5 et 1 m selon la circulation et le chargement des véhicules. On place sous la chaussée une dalle de béton armé, coulée directement sur le polystyrène pour réduire sa déformation et le protéger contre les produits pétroliers, etc. Ce matériau est très onéreux, mais sa très faible densité peut le rendre économique dans certains cas.	Refsdal (1977)

Extrait de : « Construction de routes sur sols compressibles ». Publication du Programme de recherche routière de l'O C D (1979).

tableau 2.1 : remblais légers sur sols compressibles.

Les productions sont considérables, et nécessitent d'être valorisées en grande masse, d'où l'intérêt d'une mise en remblais. Cette revalorisation existe déjà pour les cendres volantes près des bassins houillers.

L'attrait économique est certain, puisque " les matériaux de remblais se paient à la tonne transportée, mais se mettent en oeuvre au m^3" (VIVIER 1971). L'utilisation d'un matériau 30 à 40 % plus léger que le sol entraîne donc une économie évidente sur les frais de transport.

Les premières études concernent les données géotechniques classiques de caractérisation des matériaux (teneur en eau, granulométrie,...). Ensuite elles furent directement liées aux problèmes de faisabilité (portance, risque de pollution, mise en oeuvre,). Les résultats sont résumés dans le tableau 2.2 en ce qui concerne les mâchefers, phosphogypses, et cendres volantes.

	Machefers	cendres volantes	phosphogypses
production par an	2 millions de tonnes (1981)	3.8 millons de tonnes (1985)	5 à 7 millions de tonnes (1976)
densité sèche apparente	1.1 à 1.2	0.9 à 1.2	0.85 à 1.5
teneur en eau	10 à 40 % 25 % en moyenne	20 %	10 à 50 % 20 % en moyenne
granulométrie	0/20mm à 0/30 mm	5 à 200 µm	0/5 mm (en terril)
perméabilité succion	pas d'informations	importante retenue capillaire	frange capillaire 2 - 3 m
résistance	20 -30 (OPN)	pas d'information	CBR 25 à 40 (OPN) ϕ = 41 à 47 ° c= 10 à 50 kPa
traitement préalable	OUI déferraillage	pas d'informations	OUI neutralisation acide
chimie	Ph > 12 metaux lourds	pas d'informations	métaux lourds pH < 3
Auteurs	BAUCHARD 1977, HIRT 1975	VIVIER 1975	PUIATTI 197

tableau 2.2: (d'après Bulletin LCPC spécial n°VII 1978).

Il ressort, pour les 3 matériaux, une certaine similitude de comportement nécessitant de prendre quelques précautions:

- une forte teneur en eau et une faculté importante à en absorber de grandes quantités, soit par remontées capillaires, soit lors du ruissellement. Il est alors nécessaire d'isoler les massifs, aussi bien des eaux pluviales, que des remontées de nappes phréatiques. Ces phénomènes sont dus essentiellement à la présence d'éléments fins (quantité supérieure à 15 %).

- Les sous-produits sont très friables, et ne peuvent être utilisés que pour des chaussées de faible trafic.

- les essais de portance ont montré que de graves défauts sont présents si la teneur en eau est importante. La solution réside alors dans la construction de remblais hauts (plus hauts que la frange capillaire) ou de traitement à la chaux.

- un compactage de forte énergie est nécessaire pour améliorer les propriétés mécaniques. S'il peut être réalisé optimal pour une grande plage de teneur en eau, il risque d'entraîner une perte de portance due à la friabilité du matériau.

- le suivi des tassements n'a été réellement fait que dans le cas des phosphogypses. Relativement importants, ils semblent ne jamais vouloir se stabiliser dans le temps, ce qui impose alors de construire des remblais de faibles hauteurs.

- Il reste encore à tenir compte des risques de contamination engendrés par le lessivage des sous-produits. Les mâchefers, très basiques, voient cette basicité diminuer avec le temps. Les phosphogypses nécessitent une neutralisation car ils contiennent beaucoup d'acide. La présence de métaux lourds a également été mise en évidence.

Les études expérimentales réalisées avec les sous-produits industriels mettent en évidence un certain nombre de problèmes, malgré les économies qui peuvent être réalisées (tableau 2.3).

	Machefers	cendres volantes	phosphogypses
AVANTAGES	effet pozzolanique	effet pozzolanique	grande stabilité (ϕ élevé) réglage très précis
INCONVENIENTS	* Attention au % d' imbrulés * présence d'éttringite * risque de gonflement	* portance sur petits remblais * foisonnement	* foisonnement * pollution * forts tassements * fissuration de retrait * risque réaction alcali granulat avec ouvrages à proximité
UTILISATION	uniquement sous chaussée de faible trafic		

tableau 2.3:Avantages et inconvénients des différentes techniques.

Le nombre de précautions à prendre a beaucoup limité la généralisation de ces techniques innovantes. Devant la responsabilité qu'elles engagent face aux désordres engendrés par leurs ouvrages, les entreprises hésitent à utiliser ces procédés. Elles préfèrent mettre en oeuvre les remblais ultra-légers en plastiques alvéolaires ou polystyrène expansé.

1.2.Utilisation de polypropylène alvéolaire

Le procédé Induplast constitué de blocs Nidaplast et de géotextiles est apparu dans les années 80. Conçu spécialement pour une utilisation en Génie Civil et déjà apprécié pour ces propriétés drainantes, il a été employé pour la première fois en 1986 en remblais allégés

Nidaplast est un matériau alvéolaire en polypropylène extrudé, à structure nid d'abeilles (figure 2.1).

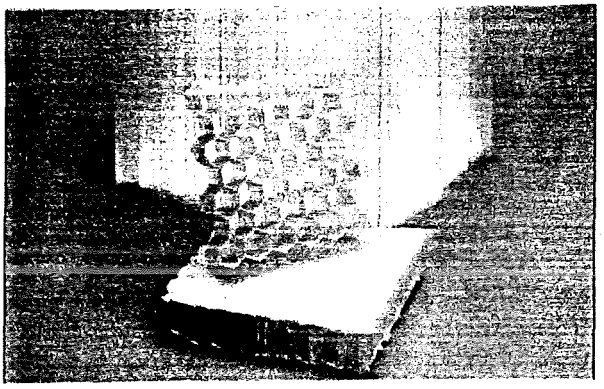


figure 2.1: structure en nid d'abeilles.

Les alvéoles hexagonales de 20 mm de diamètre permettent une circulation d'eau importante, d'où ses propriétés drainantes et son usage initial. Sa masse volumique de l'ordre de 40 kg /m^3 nettement inférieure à celle du sol, range Nidaplast parmi les "ultra-légers". Divers essais de résistance et de déformabilité, ont montré que le matériau est apte à résister à une circulation assez importante (figure 2.2):

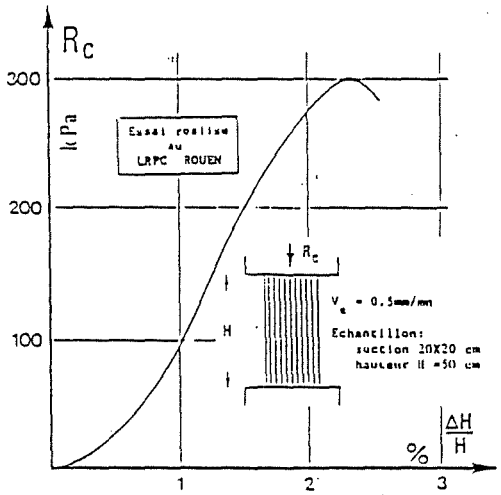


figure 2.2 : Résistance en compression du Nidaplast (DESAGE 1987).

La rupture en compression (dans le sens des alvéoles) se produit pour une contrainte de 300 kPa, et une déformation de 2 %. Le Nidaplast peut donc supporter directement des efforts de chaussée, ce qui lui confère un avantage par rapport au polystyrène.

Toutefois pour éviter tout risque de fluage dans le temps, le CETE de Normandie préconise une surcharge maximum de 10 % de la charge de rupture.

Contrairement aux sous-produits évoqués au paragraphe précédent, Nidaplast ne craint ni les remontés capillaires, ni la dissolution par les éléments généralement en présence dans le sol (et donc ne risque pas de polluer) ou par les hydrocarbures pouvant provenir de la circulation. Peu de protections sont donc nécessaires. Il présente en plus l'intéret de pouvoir être employé dans des zones marécageuses ou des sites inondables (remontées de nappes), ses alvéoles étant ouvertes aux 2 extrémités. A priori, son seul défaut semble être son coût très prohibitif (500 à 600 francs le m^3), qui en réduit les emplois à des chantiers très difficiles.

Le dimensionnement d'un tel remblai reste expérimental et dépend des paramètres de chaque chantier.

La manipulation très aisée des blocs (de l'ordre du m^3) par 2 personnes permet un arrangement rapide. Les tolérances dimensionnelles permettent d'avoir des états de surface de qualité . Les seules précautions prises sur le chantier sont généralement :

- la mise en place d'une couche de sable filtrante surmontée d'un géotextile sous les blocs, afin d'éviter un engorgement du Nidaplast par apport d'éléments fins (perte des qualités drainantes et de la légèreté).

- la pose d'un géotextile sur les blocs afin d'éviter le poinçonnement par les matériaux de chaussées.

Le bilan d'une utilisation en allégement de sol par le Nidaplast est positif d'un point de vue technique, mais le matériau reste d'un coût trop élevé pour connaître un développement important.

1.3.Les remblais en polystyrène expansé

Les premières expériences d'utilisation du polystyrène en techniques routières ont démarré vers 1965 en Norvège. Il s'agissait alors de prévenir la gélivité des chaussées par la pose d'une faible couche (10 cm) de polystyrène extrudé (plus lourd, mais ayant une meilleure résistance mécanique et absorbant moins l'humidité). Comme il ne devait pas y avoir d'obstacles techniques à l'augmentation de l'épaisseur de polystyrène, le premier remblai ultra léger de grande hauteur fut construit dans une zone marécageuse où les tassements de la route étaient de l'ordre de 10 cm par an. Depuis, le procédé n'a cessé de se développer . Le premier chantier français date de 1980 (Route route d'accès au tunnel de Fréjus).

1.3.1.Principe et mise en oeuvre

Actuellement, l'utilisation de polystyrène est envisagée dans les cas suivants (figure 2.3):

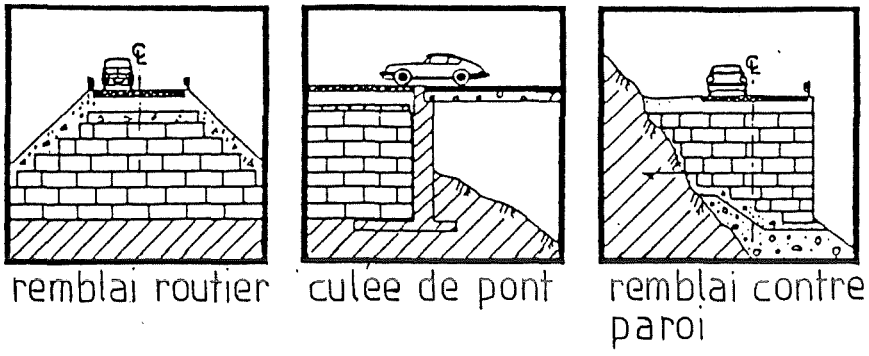


figure 2.3: divers cas d'utilisation (AABOE 1986).

- protection contre le gel : propriétés isolantes.

- réduction des efforts de poussée contre des soutènements : coefficient de poisson du matériau quasi nul.
- allégement de remblais sur des sols compressibles (marécages) ou instables (glissement de terrain).

Dans tous les cas d'application, le principe est le même: on remplace le sol par des empilements de blocs, de polystyrène expansé. La densité du matériau de remplissage passe alors de 1,9 (sol) à 0,02 (polystyrène). (figure 2.4).

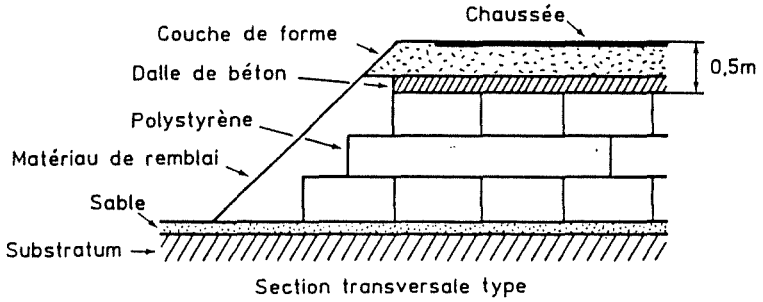


figure 2.4: coupe transversale type (MAGNAN 1985).

Tous les polystyrènes ne peuvent pas être employés et les seuls à pouvoir être utilisés en remblai doivent présenter une résistance mécanique de 90 à 140 kPa pour une déformation de 10 %. Le comportement généralement élastoviscoplastique parfait montre un module d'élasticité pratiquement nul, et un fluage qui reste limité lorsque la contrainte appliquée est inférieure à 0,45 fois celle de la rupture (MAGNAN 1985)(figure 2.5).

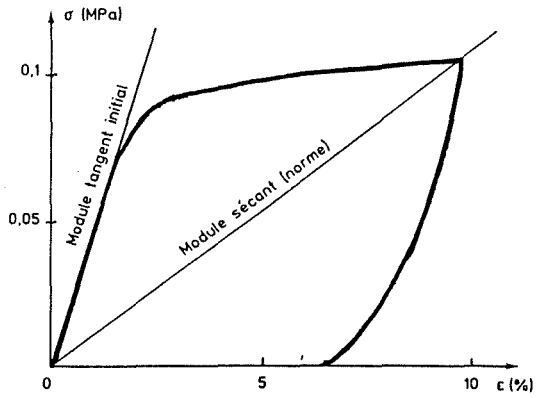


figure 2.5 : Compression du polystyrène expansé (MAGNAN 1985).

Des essais d'immersion montre que l'absorption d'eau est négligeable lors d'immersions périodiques, mais qu'elle peut atteindre 9 % en volume dans le cas d'immersion prolongée. Par mesure de sécurité, on effectue les dimensionnements en majorant la masse volumique à 100 kg par m^3.

1.3.2.Contraintes d'emploi

Variant en fonction de l'utilisation elles sont généralement les suivantes:

- Les tolérances dimensionnelles faibles (0,5 %) afin d'obtenir une planéité parfaite lors de l'empilement.

- le matériau est combustible et nécessite donc une protection .

- le polystyrène est dissous par les hydrocarbures. La protection se fait par la pose soit d'un film polyéthylène, ou d'une mousse polyuréthanne, soit d'une dalle de béton armé, participant également à la répartition des efforts de chaussée. Les talus latéraux sont en sol peu perméable et végétalisés.

- l'empilement des blocs doit être réalisé de telle sorte qu'aucun joint ne soit continu sur la hauteur du massif (figure 2.6).

- les blocs doivent être mis hors d'eau, et l'on doit prévoir d'éventuelles remontées de la nappe phréatique en tenant compte de la poussée d'Archimède.

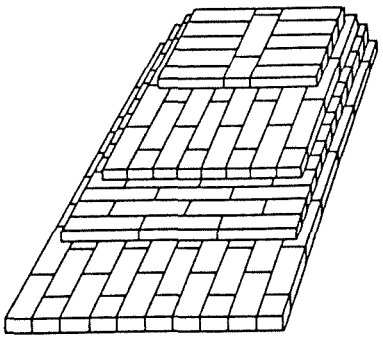


figure 2.6 : Empilement en quinconce (MAGNAN 1990).

D'autres contraintes dépendent de la destination de l'ouvrage:

- dans le cas d'un mur de soutènement, il est nécessaire de laisser un espace entre le mur et les blocs pour diminuer les efforts de poussée.
- dans le cas de remblai sur sol mou, il est souhaitable que le sol ait été préchargé, soit par un ancien ouvrage, soit par une phase préliminaire de chargement.

1.3.3.Dimensionnement des ouvrages

Si lors des premiers chantiers, ce dimensionnement était assez empirique, l'expérience norvégienne et maintenant française ont permis l'édition d'une note technique rassemblant les principes du dimensionnement (MAGNAN 1990).

Ce dernier comporte 3 étapes :

- détermination de l'épaisseur du polystyrène
- position de la couche de polystyrène dans l'ouvrage.
- détermination de la structure de chaussée.

La première étape dépend essentiellement de la charge que l'on souhaite appliquer au sol de fondation.

La deuxième est liée aux conditions hydrauliques du site. Il est indispensable de faire un calcul d'immersion dans le cas d' un site inondable. Certaines précautions sont à prendre en cours de construction (vent, impact...).

La dernière va dépendre du type de trafic et de l'existence ou non d'une dalle en béton armé, (protection contre les hydrocarbures) qui aidera à la répartition des efforts de circulation.

1.3.4.Analyse économique

Globalement les remblais en polystyrène restent une technique chère, principalement à cause du coût du matériau (350 francs le m^3) (CEMAGREF(sans date)). D'après REFSDAL (1985), l'intérêt majeur semble être le faible coût du transport lié à la légèreté.

En fait, les économies les plus intéressantes sont faites sur des postes périphériques à la construction elle-même. L'analyse économique doit donc être globale, en intégrant l'ouvrage d'art, le délai d'exécution, et l'importante diminution des tassements qui exclut un rechargement ultérieur de la chaussée, et assure à l'usager un confort et une sécurité supérieure.

1.4.Un procédé intermédiaire: le béton de billes de polystyrène

Ce type de solution, peu répandu en France a été mis au point au Japon, où l'urbanisation conduit à gagner des terrains sur la mer pour toute nouvelle construction.

Le béton de billes de polystyrène permet de réutiliser le sol d'excavation (ou tout autre matériau de faible résistance). C'est essentiellement dans ce but que cette

technique est développée, les aires de stockage pour déblais faisant cruellement défaut au Japon. Ce béton consiste donc en un mélange de:

- sol existant.
- billes de polystyrène .
- ciment (2 à 6 %).
- eau .

L'addition de ciment entraîne une amélioration sensible de la portance, permettant ainsi de réutiliser les très mauvais sols.

Les billes de polystyrène, qui peuvent éventuellement provenir d'emballages divers, assurent une légèreté permettant d'atteindre des densités de l'ordre de 0,6 à 1,2 . La mise en oeuvre est moins aisée que celle de remblais tout polystyrène et rend la technique moins attrayante.

Les utilisations sont les mêmes que celles des remblais allégés:

- remblais sur sol compressible.
- remplissage derrière des soutènements ou des culées de ponts.
- réparation de glissements de terrains.
- protection contre le gel.

Toutefois, la densité est plus grande et le coût économique est légèrement supérieur à celui des remblais tout polystyrène.

En France, ce procédé est utilisé en remplissage des vides laissés par les découpes géométriques des blocs de polystyrène. Dans ce cas, le sol d'apport est supprimé, ce qui permet une diminution intéressante de la densité.

Enfin, le faible volume mis en oeuvre réduit l'impact financier de cette solution sur le projet final.

1.5.Le procédé Pneuresil

Déjà évoqué précédemment dans le cadre du recyclage des élastomères, Pneuresil est un procédé d'allègement des sols. Il réutilise principalement des pneumatiques de poids lourds. On empile une dizaine de pneus, qui ne subissent aucun traitement, contrairement au Pneusol. La densité en service est de l'ordre de 0,4. L'étude des empilements en laboratoire, sous des charges statiques montre que :

- les tassements sont très importants au début du chargement (4 cm par pneu). Les flancs s'affaissent jusqu'à la sollicitation de la bande de roulement.

- la compressibilité diminue fortement dès que cette bande de roulement est sollicitée. (figure 2.7)

- la déformation latérale des colonnes est quasi nulle d'où la possibilité de diminuer les actions de poussée derrière des soutènements .

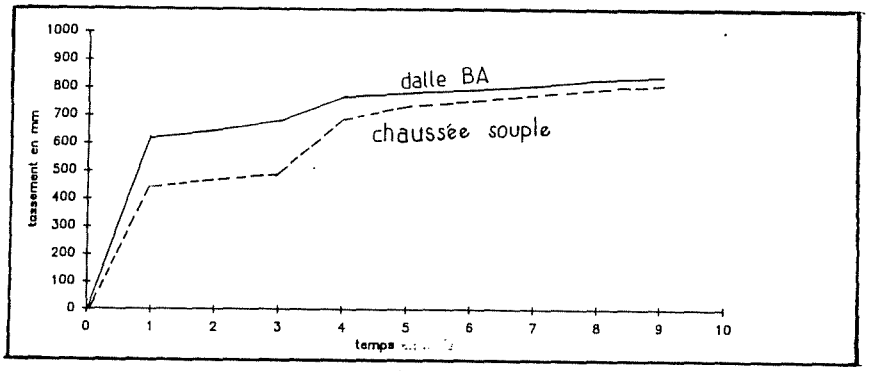


figure 2.7 : Tassement des pneus, remblai expérimental d'Annecy (d' après MARCHAL 1989).

Un remblai expérimental de 40 m de long et 5m de large en crête a été édifié en 85 sur un site marécageux. Des colonnes de 8 pneus de poids lourds ont été disposées sur une hauteur de 2 m . Les vides en toit ont été occultés à l'aide d'un treillis soudé, puis d'un géotextile surmonté d'une couche de 10 cm de sable. Deux structures, l'une souple (1,6 m de sol), l'autre rigide (dalle en béton armé) ont été testées. L'instrumentation a concerné les tassements, la portance, la réponse aux vibrations de freinage et l'effet de la circulation.

Les résultats sont les suivants:

- les tassements immédiats sont beaucoup plus importants qu'en laboratoire (70 cm contre 32 cm prévus).
- les tassements différes sont dus principalement au sol support.
- la présence de la dalle de béton armé atténue nettement l'effet de la circulation.
- le procédé pourra être très satisfaisant pour des chaussées de faible trafic (50 véhicules /jour par sens de circulation).

Conclusion.

Cette revue des différentes techniques d'allégement ne se veut pas exhaustive, mais elle a permis d'en cerner les problèmes. Aucune d'entre elles ne donne pleinement satisfaction, à la fois sur les plans techniques et financiers.

La réutilisation économique de sous-produits ne permet pas un allégement suffisant, et dans des conditions suffisantes de sécurité. Les plastiques alvéolaires conçus spécialement restent d'emplois marginaux, car beaucoup trop chers, même si le gain en poids est énorme. Le polystyrène expansé est le plus satisfaisant actuellement. Mieux connus de par une utilisation massive en Norvège, les problèmes liés à l'ultra légèreté ont pu être maîtrisés (stabilité au vent, immersion). Enfin la plage de densité offerte par les solutions précédentes concerne des valeurs soit très faibles, soit proches de 1. Peu de solutions intermédiaires sont offertes, un procédé mixte, dont la densité serait de l'ordre de 0,4 à 0,5 permettrait de combler ce manque. Si de plus il réutilise des déchets divers, il ne peut que séduire les défenseurs de la protection de notre environnement.

2.LE PROCEDE PLASTBLOC

Plastbloc est un procédé de remblais allégés constitués de blocs de déchets de matières plastiques compactées. Sa densité d'environ 0,4 à 0,5 lui permet de se situer dans une plage de légèreté où peu de matériaux de remblaiement existent. Le gisement de déchets de matières plastiques est immense, et le procédé devrait permettre d'en absorber de grandes quantités.

2.1.Principe et fabrication

Les matières plastiques collectées pour la fabrication des blocs peuvent être de toutes natures (PVC, PET, films divers, bouteilles...). Elles ne subissent aucun tri, ni lavage préalable. Ces plastiques sont compressés sous fortes pressions en forme de blocs parallélépipèdiques (figure 2.8). Le volume obtenu après ligaturage manuel au fil de fer est d'environ 1 m^3. Les dimensions moyennes 1.2 m x 1.1 m x 0.7 m sont liées à la presse utilisée pour le compactage. La densité moyenne des blocs conçus jusqu'à présent est de l'ordre de 0.35 à 0.5.

figure 2.8 : bloc de déchets compactés.

Bien qu'ils soient réalisés suivant la même technique, l'aspect général des blocs n'est pas aussi régulier que ceux fabriqués avec du carton,ou du papier... En effet, le bloc, très compressible regonfle de façon assez importante (10 à 20 cm) dès relâchement de la pression ce qui lui confère une géométrie à coins arrondis.

Le plastique pressé dans la balle de plastique forme des strates grossières, perpendiculaires au sens de pressage. Enfin, pour des raisons esthétiques, les déchets ont été recouverts d'un textile synthétique de couleur verte (déchet également), avant le ligaturage. Ceci permet en outre de maintenir des petits déchets dans le bloc.

La résistance du ligaturage n'est pas un paramètre essentiel : les liens sont sollicités en traction lorsque le bloc est fabriqué, mais dès sa mise en remblai, sous une charge suffisante il se comprime, et les fils métalliques ne sont plus sollicités. Les problèmes de corrosion des ligatures ne sont donc pas non plus à prendre en compte en phase de service, pour les mêmes raisons.

L'utilisation des blocs de déchets est la même que celle des blocs de polypropylène expansé c'est à dire :

- remblais allégés.
- remplissage derrière un soutènement, des culées...
- réparation de glissements de terrain.

D'autres peuvent être envisagées, notamment en amortissement de vibration (métro, tramway...) sous des rails, ou encore en prévention de l'effet Marton-Sprengler (dérivation des contraintes sur les canalisations enterrées).

L'intérêt des blocs en déchets réside dans leur légèreté et le faible coût du constituant (déchets sans traitement). La valorisation de grandes quantités de sous-produits plastiques mélangés, et souillés (papier, carton, sable...),non recyclables par les procédés classiques, et très difficiles à stocker à cause de leur volume, est particulièrement intéressante. Il reste alors à démontrer la faisabilité mécanique du procédé.

2.2.Essais de laboratoire (EL GHOCHE 1989)

Une caractérisation mécanique des blocs est indispensable avant d'entrevoir une utilisation réelle. Réalisée en laboratoire (EL GHOCHE 1989), elle a concerné:

- des essais de compression simple avec fluage (les plastiques étant mécaniquement viscoélastiques).

- des essais oedométriques suivant le processus utilisé dans la caractérisation des sols.

- des essais de frottement permettant la caractérisation des modes de rupture possible de l'empilement.

2.2.1.Evolution des tassements

Les essais se font dans un local où la température est maintenue à 20°C ± 2°C afin de s'affranchir des variations de comportement liées à la température. Quatre blocs de densité 0,15 ; 0,29 ; 0,32 ; 0,43 sont testés dans le sens de pressage sous des chemins de contraintes par palier:

- 3 à 5 paliers de chargement jusqu'à une contrainte de 150 kPa environ.

- déchargement avec un palier à mi-contrainte maximale appliquée.

A chaque chargement, les tassements instantanés sont mesurés, puis suivis en fonction du temps jusqu' à l'application du palier suivant. On a déduit de chaque essai l'évolution des tassements relatifs $\Delta H/H_0$ = f(temps) pour chaque contrainte appliquée. Les tassements sous contraintes maximales sont donnés dans le tableau 2.4 :

densité bloc	0.15	0.29	0.32	0.43
contrainte maxi	100 kPa	125 kPa	30 kPa	95 kPa
tassement relatif %	25 %	25 %	16 %	12 %

tableau 2.4 : Compression de blocs de diverses densité:tassements correspondants.

Ces tassements maximaux sont fonctions de la densité de l'échantillon et restent élevés pour de fortes densités (0,4). Ils sont provoqués par l'air qui s'échappe du bloc lors du chargement et de la compression des films plastiques.

Ces essais ont montré la linéarité des tassements en fonction de ln t, dans le domaine de temps étudié, quelles que soient la contrainte appliquée et la densité initiale (El GHOCHE 90) (figure 2.9).

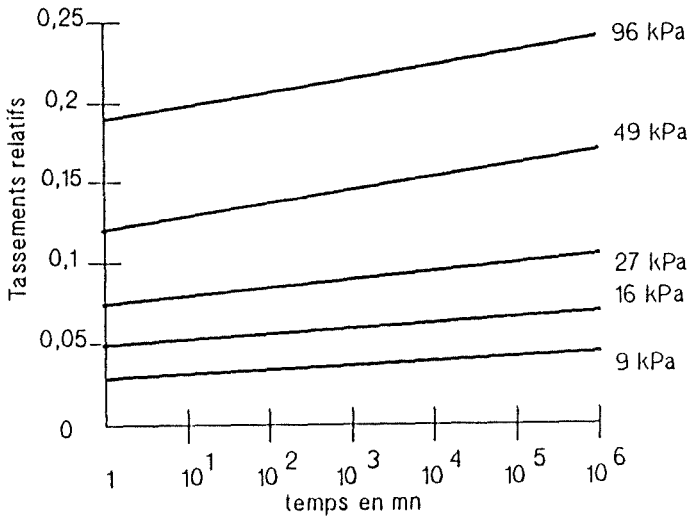


figure 2.9 : évolution des tassements d'un bloc de densité 0.4 (EL GHOCHE 1989).

La majeure partie du tassement est obtenue instantanément puis, le matériau flue au cours du temps.

Le tassement observé entraîne une évolution de la densité instantanée au cours du temps, qui est partie intégrante du comportement. Elle suit une variation parabolique de la contrainte, ayant pour valeur asymptotique à l'infini la densité du polyéthylène (ce plastique est majoritaire dans les plastiques composant les blocs).

Des prévisions de tassements à 20 ans, montre que le tassement immédiat constitue environ 60 à 80 % du tassement à 20 ans.

La mesure des déformations latérales indique que le coefficient de Poisson du bloc est quasiment nul (0,04).

Le déchargement a montré l'existence d'une déformation rémanente devenant nulle pour un temps infini: le matériau est donc viscoélastique. Les essais oedométriques (carottage dans le bloc) ont confirmé les résultats précédents.

2.2.2.Essais de frottement

L'essai est réalisé selon le principe suivant :

- empilement de 3 blocs les uns sur les autres, avec blocage des déplacements horizontaux des blocs supérieurs et inférieurs.
- extraction du bloc intermédiaire.

Les courbes contraintes tangentielles en fonction du déplacement ne présentent aucun palier, tout juste un infléchissement pour un déplacement de 10 cm.

Le tracé de la courbe $\tau = f(\sigma)$ suivant une loi de Coulomb a permis d' évaluer le coefficient de frottement à 0.34 et une faible adhérence estimée nulle compte tenu de la précision de la mesure. Ces valeurs sont toutefois à manipuler avec précaution, étant donné les difficultés d'estimation de l'aire de frottement (géométrie arrondie du bloc).

Conclusion

Les résultats obtenus en laboratoire sont satisfaisants dans le cadre d'une première approche. On retiendra essentiellement que:

- la densité initiale influe fortement sur les tassements d'où la nécessité d'employer des blocs de densité supérieure ou égale à 0.3.

- la déformation verticale est une fonction linéaire de ln t dans le domaine de temps étudié, et le matériau est viscoélastique.

- la déformation transversale quasi nulle entraîne un coefficient de Poisson voisin de zéro.

- le coefficient de frottement bloc sur bloc (blocs enveloppés de leur tissu protecteur) est de 0,36.

Ces premiers résultats sont suffisants pour entreprendre un essai expérimental en vraie grandeur. Il sera nécessaire de les compléter par des essais de laboratoire sur des modèles réduits, afin de maîtriser le plus de paramètres possibles : la densité initiale, le regonflement, l'homogénéité des déchets.

Il est également nécessaire de connaître les propriétés des plastiques qui peuvent constituer la matrice de ce matériau nouveau.

3.Propriétés des matériaux plastiques

La diversité des utilisations possibles du plastique, ainsi que l' excellent rapport densité/résistance lui a permis un essor important .

Les matières plastiques sont donc réparties en 3 groupes différenciés par leur mode de polymérisation :

- **les thermoplastiques** (polymérisation par addition).
- **les thermodurcissables** (polymérisation par condensation).
- **les élastomères** (polymères linéaires à très forte réticulation autorisant de grandes déformations).

Les déchets de matière plastique comportent essentiellement des films de polyoléfines (70 %), et des PVC (polychlorure de vinyle) qui tous font partie du groupe des thermoplastiques. C'est donc le comportement de ce groupe qui est décrit ensuite.

La connaissance des propriétés des matériaux alvéolaires peut s'avérer intéressante dans le cas d'une comparaison avec notre "matériau" Plastbloc.

3.1.Propriétés physiques des thermoplastiques

Elles concernent essentiellement la densité, les propriétés thermiques, optiques et électriques.

Une comparaison de la densité avec divers matériaux montre que celle des polyéthylènes est faible (< 1) (figure 2.10).

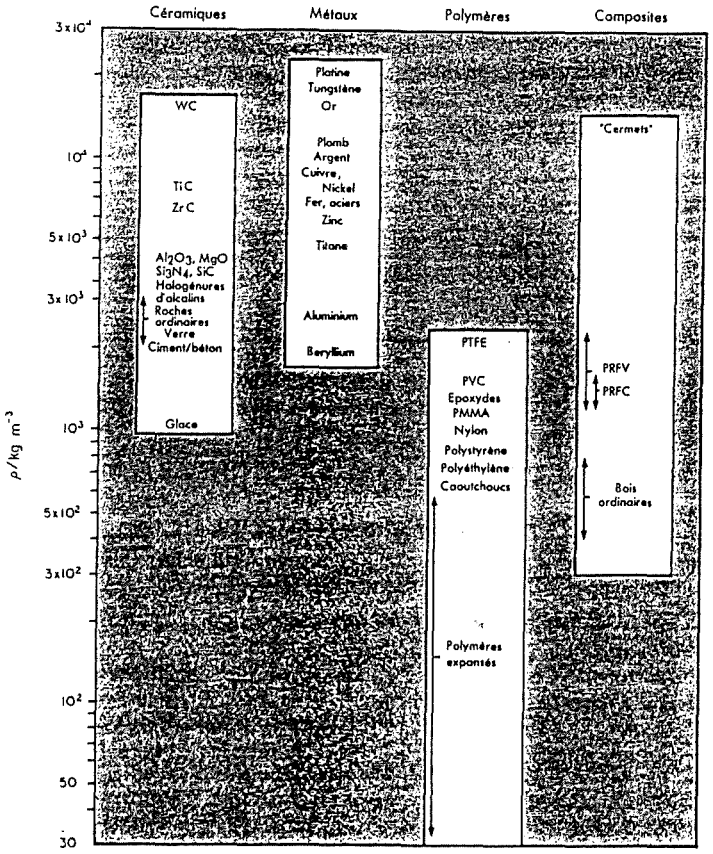


figure 2.10 : Densité comparée de quelques matériaux (ASHBY 1991).

C'est cette légèreté qui associée avec des résistances mécaniques intéressantes est à l'origine de l'essor du plastique (tableau 2.5)

Acier	Béton	PVC	Polyéthylène	Polystyrène
σ> 300 MPa	3 MPa	35 MPa	20 à 40 MPa (hd) 7 à 17 MPa (bd)	35 - 65 MPa

tableau 2.5 : Résistance en traction de quelques matériaux.

Les propriétés thermiques concernent la conductivité et la dilatation thermique. Cette dernière de l'ordre de 100 à 150 10^{-6} C^{-1} (dix fois plus importante que celle des métaux), rend la conception d'assemblages mécaniques délicate.

La faible conductivité thermique en fait un excellent matériau isolant notamment sous la forme de panneaux alvéolaires .

La faible conductivité électrique en fait un excellent isolant électrique.

Les propriétés optiques de certains polymères (polyacryliques, polycarbonates) permettent une utilisation en vitrage ou lentilles optiques.

3.2.Propriétés mécaniques

Les thermoplastiques sont considérés comme ayant un comportement viscoélastique. La caractérisation mécanique se fait généralement en traction.

L'état de déformation du matériau sous une contrainte donnée dépend du temps et la déformation totale est la somme d'une déformation élastique instantanée et d'une déformation différée dans le temps (comportement visqueux). Le module d'élasticité, tout comme la résistance en traction, dépend de la vitesse de chargement. Il varie également en fonction de la température ambiante (figure 2.11 et 12).

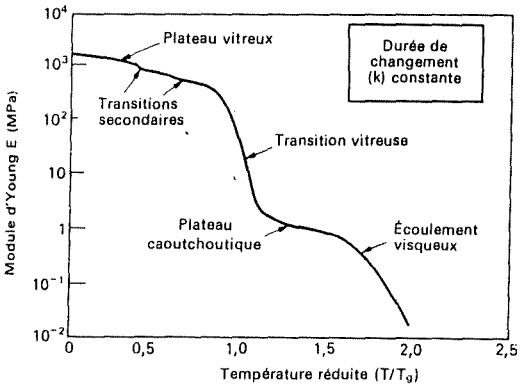


figure 2.11 : Evolution du module de Young en fonction de la température(ASHBY 1991).

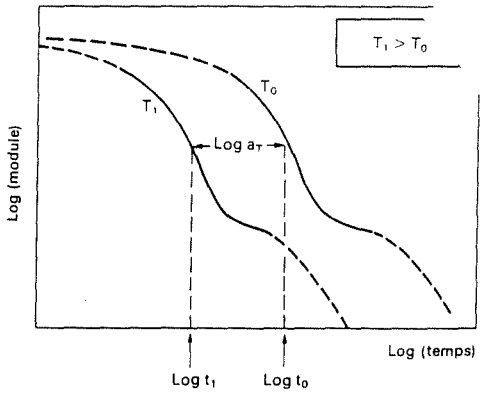


figure 2.12 : Equivalence temps température (ASHBY 1991).

Comparés aux autres matériaux, les polymères ont un module d'élasticité assez faible, ce qui autorise de grandes déformations avant la rupture (de 3 % pour le polystyrène jusqu'à 600 % pour le polyéthylène basse densité (PeBd). (figure 2.13) .

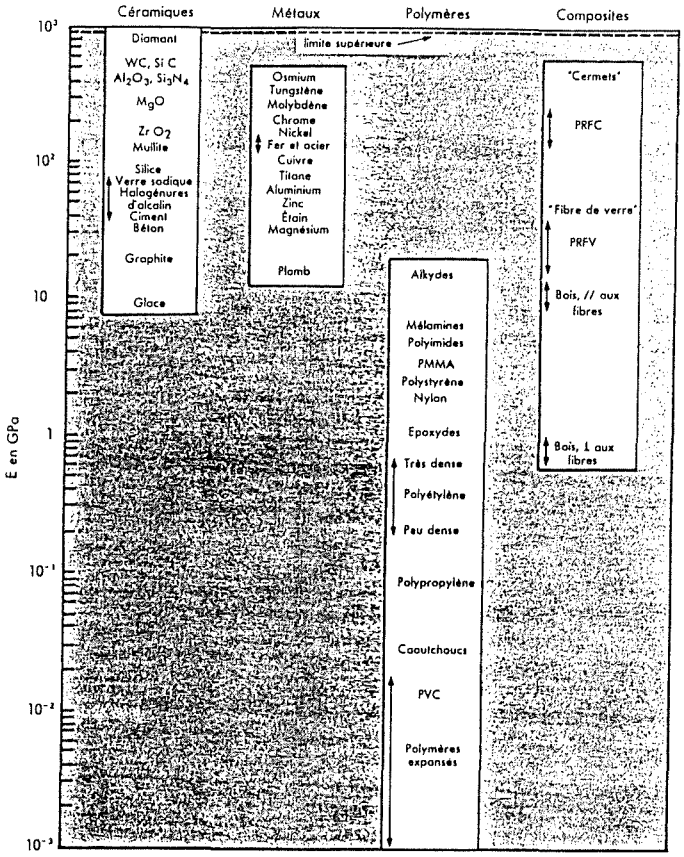


figure 2.13: Module de Young de quelques matériaux (ASHBY 1991).

3.3.Fluage des matières plastiques

La plupart des matériaux viscoélastiques présentent un phénomène de fluage qui s'accroit avec l'élévation de la température et notamment lorsque le matériau passe d'un comportement viscoélastique à un comportement viscoplastique.

Notons que pour les polymères, il existe une équivalence entre le comportement en fonction de la température et le comportement en fonction du temps (Figure 2.12). La connaissance de l'un ou l'autre des comportements permet celle du second (MURAYAMA 1978, DECROIX 1974).

3.4.Comportement cyclique

Le comportement général d'un polymère sous sollicitations répétées a l'allure présentée figure 2.14.

figure 2.14:Allure du comportement sous sollicitations répétées (HERTZBERG 1988).

Ce comportement est moins intéressant que dans le cas des métaux où la limite d'endurance est beaucoup plus élevée (figure 2.15).

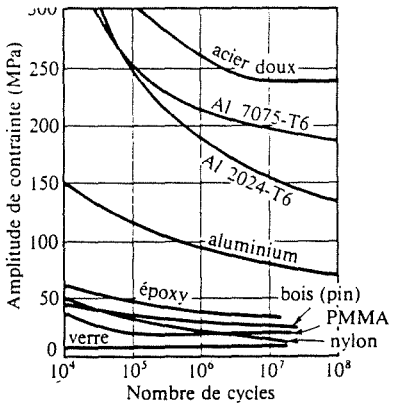


figure 2.15 : endurance de quelques matériaux (DORLOT et al, 1989).

Le comportement en fatigue dépend d'un grand nombre de paramètres notamment :

- l'augmentation de la fréquence de cyclage entraîne l'apparition d'un échauffement adiabatique provoqué par le frottement interne dans le matériau. Cet échauffement, très mal dissipé dans le cas des matières plastiques, entraîne un ramollissement du matériau puis une chute des performances mécaniques.
- l'augmentation de la température ambiante lors de l'essai provoque le même phénomène .

3.5.Vieillissement et dégradations des polymères

Cette dégradation peut affecter les déchets de matières plastiques :

- si le déchet est stocké depuis longtemps .

- si une nouvelle utilisation par recyclage est prévue dans un milieu agressif.

L'histoire du déchet n'étant pas connue, on pourra donc trouver parmi les déchets des matériaux déjà dégradés, ou des rebuts de fabrication encore stables, mais appelés à perdre cette stabilité.

Les dégradations sont de deux types: physiques ou chimiques.

3.5.1.Dégradations physiques

Dans cette catégorie, la plus spectaculaire est sans doute la fissuration sous contrainte en milieu tensioactif. Ce phénomène s'observe principalement sur les polyéthylènes : un peu de savon liquide pour emmancher un tuyau en PVC sur un embout en polyéthylène, provoque en quelques jours l'apparition de fissures destructives. Les autres dégradations proviennent essentiellement de l'action de solvants, ou de la migration des éléments plastifiants. Le PVC est dissous par les solvants habituels (acétone, ...), par contre les polyoléfines résistent bien.

3.5.2.Dégradations chimiques

Ces dégradations, notamment l'oxydation et la photodégradation entraînent une modification des chaînes moléculaires.

L'oxydation, résultant de la fixation des molécules d'O_2 sur les radicaux de la chaîne, provoque leur rupture, et donc entraîne l'apparition de craquelures .

Dans les déchets, seul le polypropylène et le polystyrène sont concernés par cette dégradation, mais ils sont en petite quantité. La photodégradation provient de l'action des rayons ultraviolets sur les matières plastiques. Elle entraîne soit une diminution de la résistance à la rupture soit l'opacification ou la coloration du matériau et peut également amorcer l'oxydation .

3.6.Comportement mécanique des plastiques alvéolaires

Ces matériaux comportent une matrice en polymères généralement en latex, polyuréthanne, ou polyéthylène pour les mousses flexibles, et des cellules ouvertes, ou fermées contenant un gaz (de l'air le plus souvent). Ils sont généralement utilisés dans l'industrie de l'ameublement, de la chaussure, ou de l'emballage, et donc caractérisés essentiellement en compression.

Les déchets de plastiques compactés sont susceptibles d'avoir un comportement similaire, même si des caractéristiques importantes divergent :

- densité des mousses alvéolaires 10 fois inférieure, à celle de Plastbloc (40 kg/m^3 en moyenne, contre 400 kg/m^3).

- résistance en traction des déchets compactés nulle : le matériau doit sa consistance uniquement aux liens qui le compriment.

Le comportement type en traction, compression, et cisaillement d'une mousse de latex de faible densité, est donné à la figure 2.16.

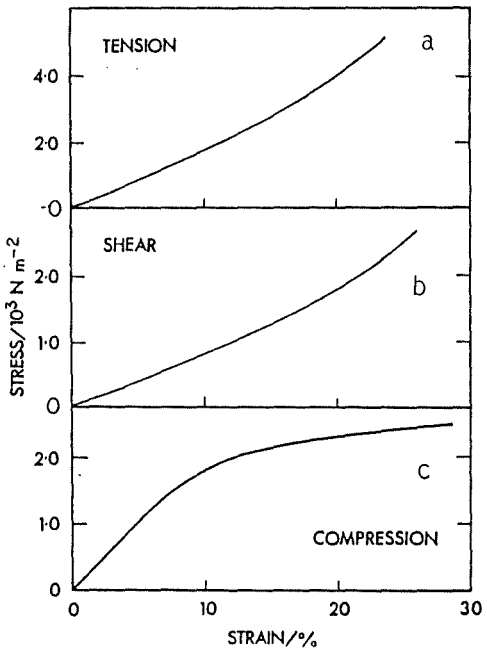


figure 2.16 : comportement en traction (a), en compression (c), en cisaillement (b).(HILYARD 1982).

On constate un comportement pratiquement élastique en traction et en cisaillement jusqu'à une déformation de 10 à 15 %, suivant le type de matériau. En compression, la zone élastique est de l'ordre de 4 à 5 %, puis on observe un accroissement rapide de la déformation sans forcément obtenir une rupture .

a/ Loi contrainte déformation en compression

L'étude d'un tel matériau se fait généralement par comparaison avec les caractéristiques de la matrice.

On définit $\phi = \rho_{mousse} / \rho_{matrice}$, coefficient sans dimension caractérisant la fraction volumique de la matrice polymère dans la mousse.

Les évolutions du rapport $E_{mousse}/E_{matrice}$ des modules tangents de la mousse et de la matrice sont représentées en fonction de ϕ, et de la nature des cellules (ouvertes ou fermées).(figure 2.17).

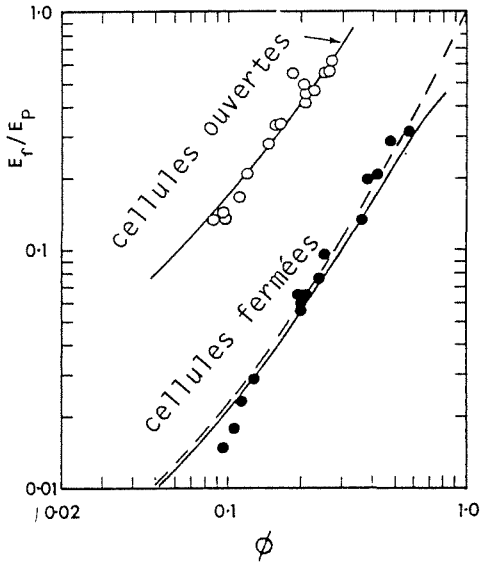
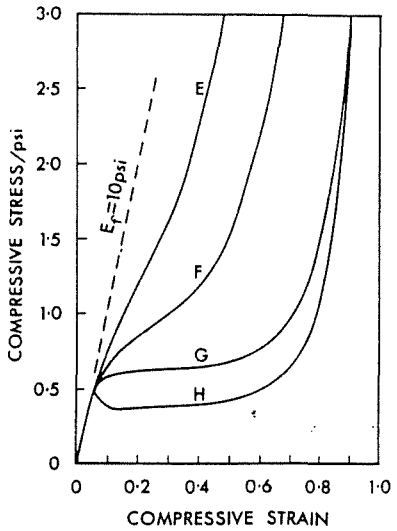


figure 2.17 (HILYARD 1982).

Les diagrammes contraintes déformations sont également fonction de la taille, de la distribution dimensionnelle, et de la régularité de forme des cellules. (figure 2.18).



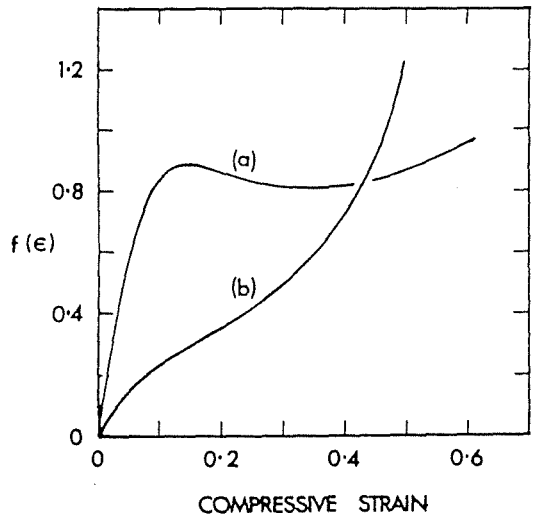
E : large distribution de la taille des cellules.
F : taille des cellules irrégulière.
G, H : distribution uniforme de la taille des cellules

figure 2.18 : comportement en compression (HILYARD 1982).

On remarque une zone élastique faible, avec un module E_{mousse} initial, en fonction duquel le module tangent à la courbe est exprimé :

$\sigma = E_{mousse}.\epsilon.\ F(\epsilon)$, $F(\epsilon)$ étant une fonction de la nature de la mousse.

La fonction F(ϵ) déterminée par Gent et Thomas (1959) est donné à la figure 2.19 pour différents pourcentage de cellules ouvertes.



a : faible densité
b : forte densité

figure 2.19 : F(ϵ) en fonction de la densité (GENT,THOMAS 1959).

b/ Modélisation du comportement.

Le comportement des matériaux à cellules fermées peut être le suivant :

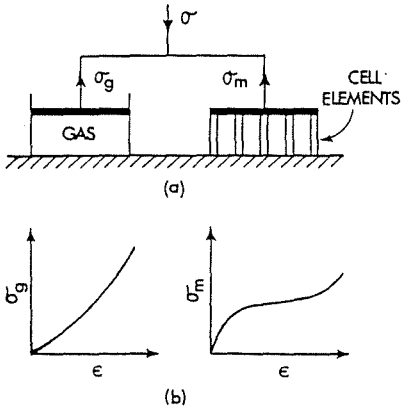


figure 2.20 : comportement d'une mousse à cellule fermée(HILYARD 1982).

On dispose de deux comportements en parallèles :

- compression d'un gaz dans un récipient hermétique.
- compression d'une structure polymère ouverte (la matrice).

La contrainte nécessaire à la déformation de l'alvéolaire, est la somme des deux précédentes.

Lorsque le matériau ne comporte que des cellules ouvertes, la compression du gaz n'intervient plus.

La figure 2.21 présente les différents comportements en fonction du nombre de cellules fermées.

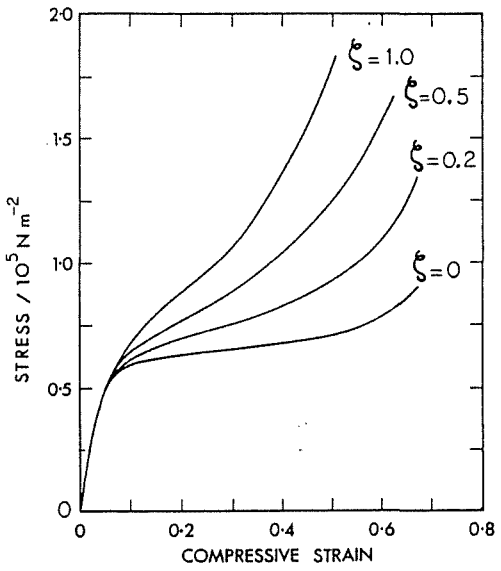


figure 2.21 : Comportement en compression en fonction de la fraction de cellules fermées(HILYARD 1982).

L'influence liée à la compression du gaz est plus marquée pour les fortes contraintes.

c/ Comportement en fatigue

L'étude du comportement en fatigue est liée essentiellement à la notion de confort de l'utilisateur. Il est caractérisé par la perte d'effort nécessaire pour atteindre une déformation de 25 %.

Les cycles d'hystéresis observables sur des mousses ont l'allure suivante :

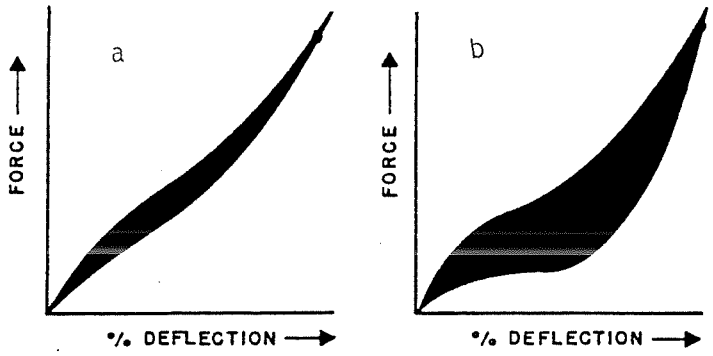
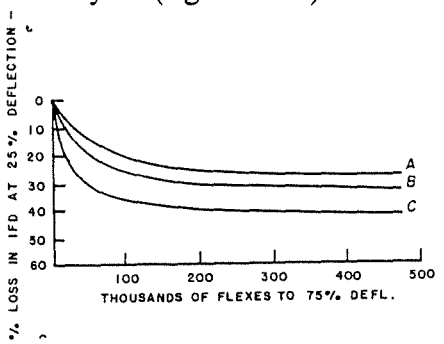


figure 2.22 : Hystéresis d'une mousse à cellules fermées (a) et à cellules ouvertes (b).(HILYARD 1982).

Les auteurs concluent que la majorité des mousses alvéolaires présentent un phénomène de fatigue cumulative, et que la majorité des désordres est observée dès le premier cycle.(figure 2.23)



A : faible fraction de cellules fermées.
B : cellules fermées rompues où l'air pénètre mal.
C : cellules fermées rompues où l'air pénètre bien.

figure 2.23 : Comportement en fonction du nombre de chargement (HILYARD 1982).

Le comportement des mousses alvéolaires flexibles est lié principalement à la densité du matériau, et à la nature des cellules qui le constituent. Nous retiendrons qu'il résulte de deux phénomènes : compression d'une structure polymère constituant la matrice, et compression d'un gaz.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de connaître les différents procédés d'allègement des sols qui ont été développés récemment. Beaucoup d'entre eux revalorisent des déchets. Mais la mise au point est longue et se heurte à des problèmes de limitations des tassements différés dans la plupart des cas (sous-produits industriels, pneurésil) ou de coût (polypropylène, polystyrène). Les études prélimaires effectuées sur le procédé Plastbloc sont suffisantes pour contruire un remblai expérimental, afin de connaître le comportement en service : les tassements différés, ou sous charge de circulation, et de valider les utilisations prévues du procédé.

CHAPITRE 3
REMBLAI EXPERIMENTAL

CHAPITRE 3 REMBLAI EXPERIMENTAL

Les essais préliminaires en laboratoire effectués par EL GHOCHE (1989), ont permis de cerner une partie du comportement du bloc Plastbloc ; il est alors apparu indispensable de faire un remblai expérimental, mettant en évidence le comportement des blocs en tant que "système de blocs". Nous avons donc décidé la construction d'un remblai expérimental en vraie grandeur, instrumenté, permettant de suivre le fluage et la poussée des blocs sur un écran, mais également le frottement entre les blocs.

L'analyse du remblai en tant que système devait également nous aider à définir les essais supplémentaires à effectuer en laboratoire .

1.CONSTRUCTION D'UN REMBLAI EXPERIMENTAL

1.1.Fabrication des blocs de déchets

Les gabions du remblai sont constitués de déchets de matières plastiques très diverses, provenant aussi bien de résidus agricoles ou de chantiers que d'emballages plastiques alimentaires usagés .

Ces déchets sont compactés sous une presse verticale à une pression de 700 kPa (piston hydraulique), puis ligaturés manuellement avec du fil de fer. Ce ligaturage manuel entraîne un regonflement vertical important de l'échantillon lors du retrait de la presse.

Le bloc ainsi obtenu a un volume d'environ 1 m^3 (dimension moyenne ; 1,2 m x 1,2 m x 0,7 m) une densité de l'ordre de 0,4 soit donc une masse de 400 kg. Les blocs expérimentaux destinés au remblai ont des variations dimensionnelles importantes (environ 30 cm de différences entre les deux blocs extrêmes), et des variations de densité : 3 blocs ont été pesés, les masses suivantes 350, 400, 450 kg ont été obtenues soit une densité comprise entre 0.34 et 0.44.

Les propriétés mécaniques d'un bloc, obtenues en laboratoire, ont été exposées précédemment.

1.2.Caractéristiques

L'emplacement du remblai (dans l'enceinte de l'université) est un terrain stable, dont la surface a été réglée horizontalement par apport de gravier.

Le remblai est construit par superposition de 3 couches de blocs (soit un total de 138 gabions), disposées les unes sur les autres (figure 3.1), et en quinconce dans le sens transversal (figure 3.2)

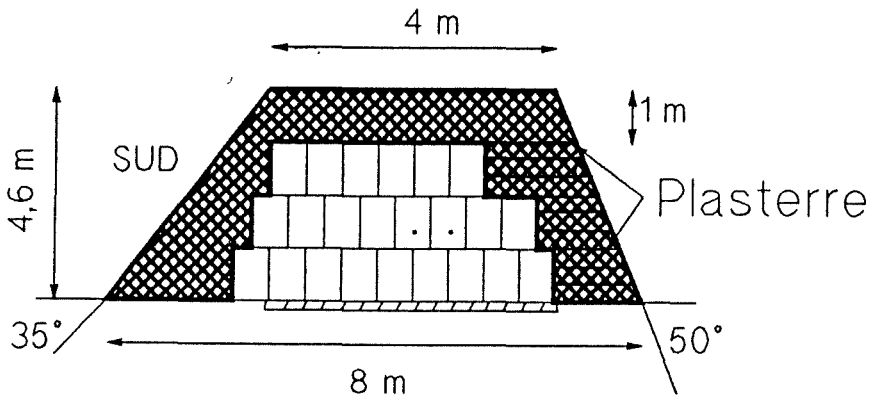


figure 3.1: coupe transversale.

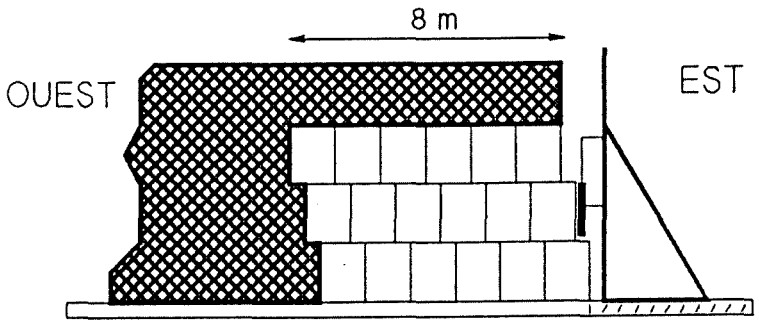


figure 3.2 : coupe longitudinale.

Entre chaque couche horizontale de blocs on a intercalé une couche d'environ 10 à 15 cm de Plasterre dosé à 4 kg / m² de plastique (RAKOTONDRAMANITRA 1988). Le but poursuivi étant d'une part : de régler la surface d'une couche de blocs avant de poser la suivante, et d'autre part, de maintenir la continuité entre le remblai en blocs et le talus latéral nord.

Ce talus nord, renforcé à l'aide de Plasterre a pu être raidi à 48°. Par contre la continuité avec le talus sud n'a pas été respecté, et celui-ci non renforcé est raidi à 38°.

Une rampe d'accès a été établie en sol, côté ouest. A l'est les blocs ont été laissés à l'air libre, afin d'installer les dispositifs de mesures. Une plateforme en béton a également été coulée à l'est afin d'avoir une référence fixe pour l'instrumentation .

Enfin, en couverture, une couche de sol a été étendue puis compactée légèrement jusqu'à atteindre une épaisseur de 1 m ; elle est destinée à simuler la présence d'une couche de chaussée

1.3.Mise en oeuvre

La réalisation du remblai a été menée sur 2 semaines, avec l'aide d'une entreprise de terrassement, de celle fabricant les blocs et de l'équipe du laboratoire.

Le phasage des opérations a été le suivant :

1- réglage de la surface d'assise du remblai à l'aide de gravier roulé .
2- mise en place de la première couche de blocs (photo 1 et 2).
3- montée des talus latéraux (en incorporant 2 couches de Plasterre); Compactage au rouleau manuel, et montée de la rampe d'accès.(photo 3)
4- Mise en place de Plasterre sur les gabions (sans compactage).(photo 4)
5- Répétition des étapes 2, 3, et 4 pour la mise en place de deux autres rangées .
6- Mise en place puis compactage de la plateforme supérieure en sol

La manutention des blocs a posé quelques problèmes et il serait souhaitable, que l'on prévoit un crochet de levage lors de leur fabrication.

photo 1 : Pose des couches de blocs.

photo 2 : pose du lit de Plasterre.

photo 3 : Compactage des talus latéraux au rouleau manuel.

photo 4 : remblai expérimental terminé,

2.ETUDE DES TASSEMENTS

2.1.Dispositifs de mesure (figure 3.3 et 3.4)

Ce dispositif est destiné à surveiller l'évolution des tassements du remblai en fonction du temps. Le suivi s'est effectué entre décembre 1989 et avril 91.

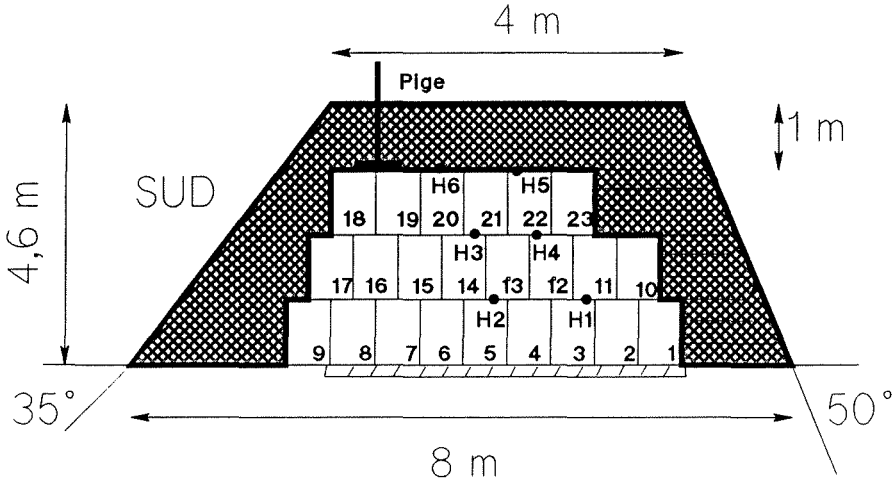


figure 3.3 : emplacement des repères de tassements.

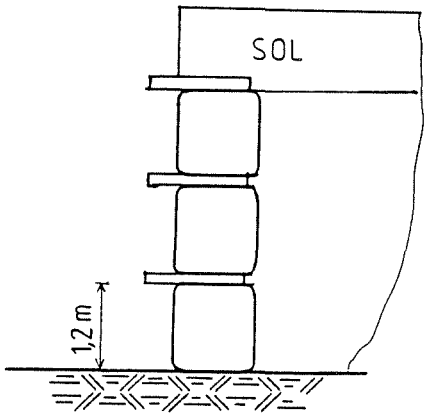


figure 3.4 :repères de tassements.

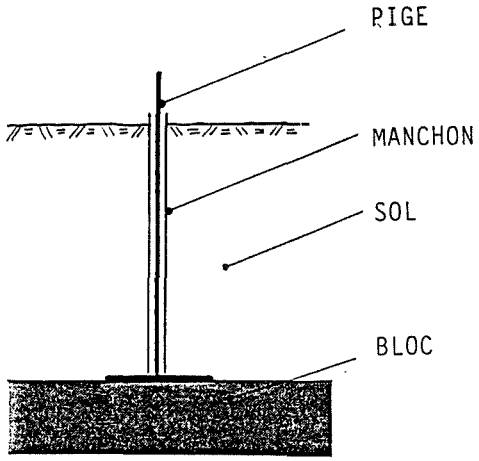


figure 3.5 : pige topographique.

Le dispositif en place est constitué de repères intermédiaires, et d'une pige topographique pour le suivi des tassements totaux (figure 3.5).

Les repères intermédiaires sont constitués de 6 barreaux métalliques de 1,2 m de long (diamètre 5 cm) Ils ont été posés à la surface des blocs n ° 2, 5, 9, 12, 20, 22 lors de la mise en oeuvre du remblai. Ils sont encastrés d'une longueur au moins égale à 80 cm dans le remblai (figure 3.4) et ne peuvent pas basculer.

On mesure ensuite la distance séparant la ligne moyenne du barreau de la plateforme de référence (supposée indéformable) à l'aide d'un mètre-ruban (erreur absolue sur la mesure 0,5 cm).

La pige topographique est posée derrière le bloc n°2 en retrait de 1 m de la face libre. Le suivi de cette pige est fait à l'aide d'un niveau électronique (erreur absolue d'environ 1mm).

2.2.Tassements des repères

2.2.1.Résultats

Le suivi a été fait pendant 9 mois, pour les repères intermédiaires, et un an et demi, pour la pige topographique. On a déterminé les tassements relatifs du remblai $\Delta H_i/H_{oi}$ pour chaque repère :

- ΔH_i représente le tassement du repère i.
- H_{oi} représente la hauteur initiale du repère i par rapport à la plateforme indéformable.

Les résultats sont donnés à la figure 3.6 ;

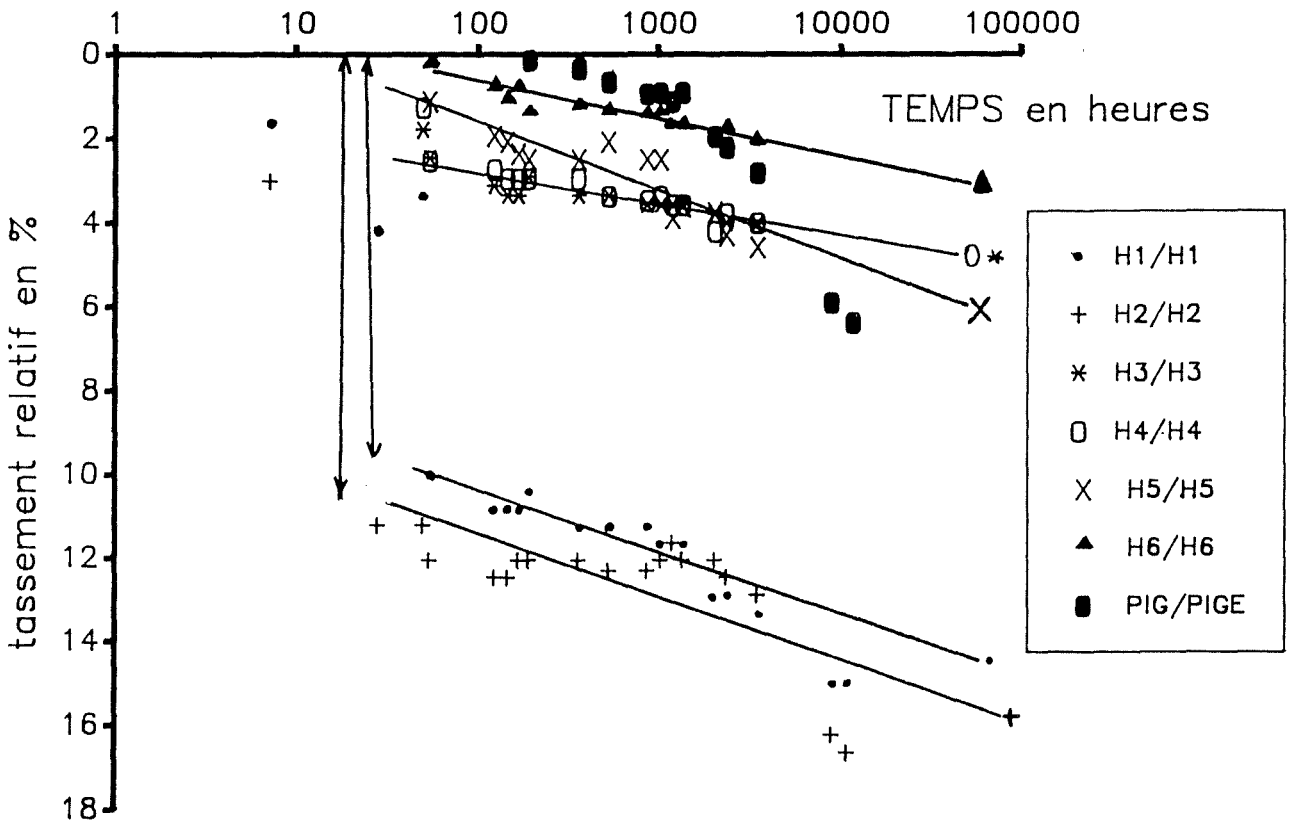


figure 3.6 : tassements relatifs en fonction du temps.

L'observation de la figure 3.6 nous permet de distinguer deux phases dans l'évolution des tassements relatifs des repères :

- une première phase de variations très brutales, notamment pour les repères 1 et 2. Cette phase correspond à la période de construction au cours de laquelle des mesures ont été faites dès que les repères étaient encastrés entre 2 couches de blocs. Cette phase a une durée d'environ 120 heures, le moment de la première mesure topographique.

- une deuxième phase où les variations sont beaucoup plus faibles. Le début de celle-ci dépend du repère étudié puisque les premières mesures pour chaque repère n'ont pas été effectuées en même temps. On le fixera pour des raisons de simplification à 120 heures pour tous.

Un calcul d'erreur fait sur quelques valeurs montre qu'une erreur de lecture égale à 5 mm entraîne (suivant le repère) une erreur relative variant de 5 à 15 % environ.

2.2.2.Analyse

a-*PHASE DE CONSTRUCTION :*

Etant donné la durée du suivi des repères (3500 heures = 5 mois) devant celle de la phase de construction (120 heures), on pourra considérer par la suite que les tassements relatifs instantanés (ϵ_{inst}) au sein du remblai seront égaux aux tassements relatifs mesurés à 120 heures.

La proportion de ces tassements relatifs par rapport à ceux mesurés à 5 mois (ϵ_{5mois}) est donnée dans le tableau 3.1 suivant :

Repère N°	1	2	3	4	5	6
ϵ inst %	10.4	12	2.9	2.9	2.5	1.4
ϵ 5mois %	13.3	12.9	4	4	4.5	2.1
$\frac{\epsilon \text{ inst } \%}{\epsilon \text{ 5mois } \%}$ (%)	78	93	72.5	72.5	55	66

tableau 3.1 : comparaison des tassements.

Les tassements instantanés de la couche inférieure de bloc dépassent en moyenne 85% des tassements à 5 mois.

Cette proportion s'affaiblit avec les repères supérieurs. Les tassements du remblai seront donc ensuite surtout dus à celui des couches intermédiaire et supérieure, le potentiel de tassement des couches inférieures étant déjà bien entamé. Les travaux de El GHOCHE en laboratoire, ont également montré que les tassements instantanés des blocs, quelle que soit la contrainte à laquelle ils sont soumis, sont très importants. Ceci est dû principalement au regonflement constaté à la fabrication : l'échantillon se tasse d'une valeur au moins équivalente.

On peut donc conclure à la similitude des observations faites sur les tassements instantanés du bloc, aussi bien in situ qu'en laboratoire.

b-*PHASE DE SUIVI :*

- Allure des courbes.

On a déjà remarqué que dans cette phase, les variations de tassements sont beaucoup plus faibles : les essais en laboratoire menés par El GHOCHE ont montré que, quelle que soit la contrainte appliquée sur les blocs, le tassement associé évolue linéairement en fonction du logarithme du temps.

La figure 3.6 montre que l'on peut également assimiler le tassement des repères à une fonction linéaire de ln t (le coefficient de corrélation est compris entre 0,9 et 0,98 ; ce qui est suffisant compte tenu de l'incertitude de mesure pour des essais en vraie grandeur.)

L'hypothèse de linéarité n'est valable que dans le cas d'une durée de temps finie : le bloc ne peut se tasser significativement que jusqu'à atteindre une densité limite, celle du polyéthylène pur (soit 0,9) à t_∞, la déformation du matériau polyéthylène étant négligeable devant celle du bloc.

La linéarité reste néanmoins une approximation suffisante dans le domaine de temps considéré (20 ans), et permet une prévision des tassements suffisante .

- Détermination du tassement à 20 ans :

Il est déterminé directement à partir des repères 5 et 6, situés au sommet de la dernière couche du bloc, et de la pige topographique, car seul le tassement des blocs nous intéresse.

Les prévisions de l'accroissement de tassement (à partir de t = 120 heures) sont données dans le tableau 3.2.

Repère N°	5	6	Pige
ϵ inst %	5%	3%	7%
H 20 ans	18 cm	10 cm	24 cm
$\frac{\epsilon \text{ inst } \%}{\epsilon \text{ 20 ans } \%}$ (%)	22%	10%	11%

tableau 3.2.: accroissement des tassements du remblai (repères supérieurs).

La dispersion des valeurs suivant le point de mesure est importante, La proportion due à la phase de construction reste faible, et le tassement moyen de l'ordre de 17 cm. Il est sans doute surestimé compte tenu des approximations faites.

On ne tient pas compte du tassement de la couche de terre de la plateforme, tassement qui peut être maîtrisé par l'emploi d'un bon matériau, et un compactage approprié (mais qui peut être élevé dans le cas de notre remblai ≈ 5%).

En outre, la fabrication des blocs est telle qu' un fort regonflement existe, et modifie le comportement en augmentant le tassement. Les essais de laboratoire montrent effectivement que lorsqu'on maitrîse ce regonflement, les tassements sont plus faibles (EL GHOCHE 1992).

En résumé, l'analyse des tassements mesurés avec les repères montrent que :

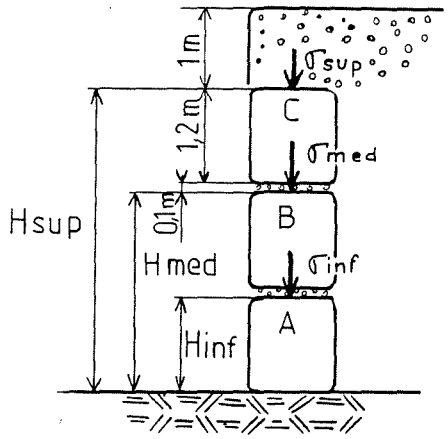
- Les tassements relatifs dus à la construction sont supérieurs à 10% (soit 12 à 15 cm) pour les blocs au niveau du sol.
- L'évolution ensuite est beaucoup plus faible. Assimilée à une variation linéaire de ln t, elle permet une prévision des tassements hors construction de 10 à 24 cm, tassement comprenant celui de l'intercalaire en Plasterre, et donc fortement surestimé.

2.3.Détermination de la déformation des blocs

Chaque couche du bloc est soumise à une contrainte normale constante, fonction du nombre de couches au-dessus d'elle, et de la surcharge de terre (figure 3.7). On peut donc à partir de la figure 3.6 déterminer la déformation d'un bloc de chaque couche

dans une contrainte donnée, en fonction de ln t (DAUDON, El GHOCHE, COULET 1991).

On désignera par σ_{inf} (respectivement σ_{med}, σ_{sup}) les contraintes appliquées à un bloc de la couche inférieure (respectivement médiane et supérieure).



$\sigma_{sup} = \gamma_{sol} \cdot 1 = 19$ kPa

$\sigma_{med} = \gamma_{sol} \cdot 1 + \gamma_{bloc} \cdot 1{,}2 = 26$ kPa

$\sigma_{inf} = \gamma_{sol} \cdot 1 + \gamma_{bloc} \cdot 2{,}4 = 30$ kPa

Figure 3.7 : calcul des contraintes appliquées.

Le tassement relatif d'un bloc de la couche inférieure est directement donné par ceux des repères 1 et 2.

Celui du bloc 2 est tel que :

$H_B = H_{med} - H_A$ (figure 3.8).

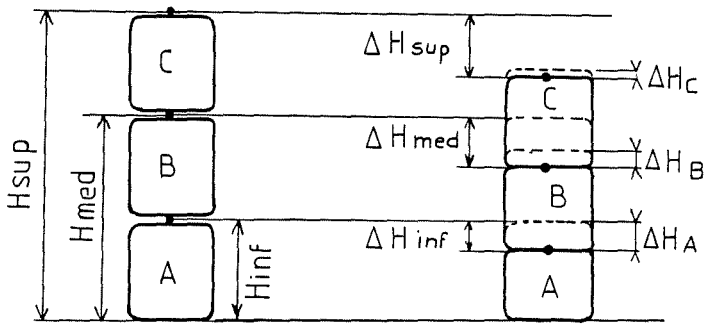


Figure 3.8 : calcul de la déformation des blocs.

Diverses hypothèses de calculs sont faites, et peuvent entacher les résultats des déformations :

- on néglige le tassement des deux intercalaires en plasterre.
- les variations dimensionnelles empêchent un empilement correct des blocs et peuvent engendrer un basculement latéral (Figure 3.9).

- la disposition en quinconce n'a permis qu'une approximation de la déformation d'un bloc ; l'alignement des repères étant imparfait (Figure 3.10), et les tassements différentiels entre colonnes de bloc probables.
- des mesures de densité de blocs (3 pris au hasard) ont montré une dispersion importante de densité (plus ou moins 50 kg sur la masse) de l'ordre de 15% au moins (soit 0,42 ;0,38 ; 0,47), dispersion accentuée par les variations dimensionnelles des blocs (Bloc le plus haut : 1,23m - Bloc le plus petit : 1,00m).

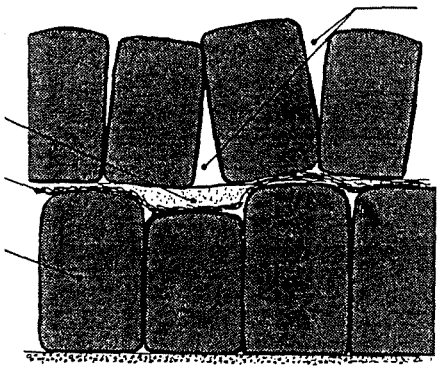


figure 3.9 :empilement irrégulier.

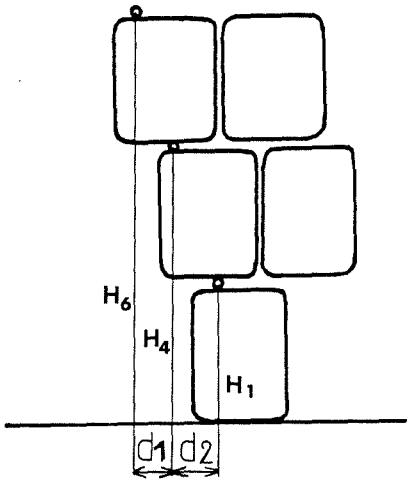


figure 3.10 :disposition décalée des repères.

Les déformations des blocs situés sous les repères 1 à 6 sont représentées en fonction de ln t à la figure 3.11. Une moyenne a été effectuée sur les repères d'une même couche de bloc. Nous rappelons que l'on a émis l'hypothèse que le tassement de la couche de plasterre intercalée est nulle, que les repères 1,4,5 (respectivement 2,3,6) sont parfaitement alignés.

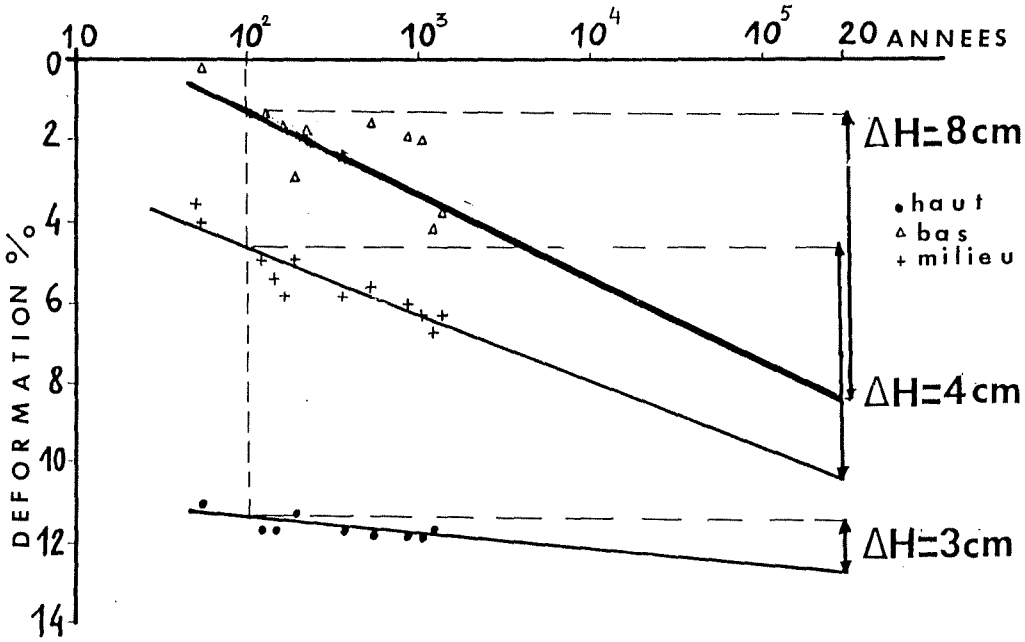


figure 3.11 : déformation des blocs.

Les valeurs de ϵ sont assez différentes, ce qui recoupe les résultats de tassements relatifs au sein du remblai (figure 3.6) :

- Les repères 1 et 2 évoluent parfaitement parallèlement l'un à l'autre, et l'accroissement de tassement en 20 ans est le même (5%).

- Les repères 3 et 4 sont parfaitement confondus ;
- En revanche les repères 5, 6 et la pige ont des évolutions moins synchronisées : les empilements de blocs sont, d'autant plus instables qu'ils sont hauts. Et la pige est en retrait par rapport à H5 et H6 et plus près des bords du talus latéral, ce qui donne des résultats de déformations du simple au double (tableau 3.2).

La déformation de chaque bloc est assimilable à une droite en fonction de ln t (coefficient de corrélation ≈ 0.95), bien que pour la couche supérieure, la moins chargée, l'exploitation soit plus difficile.

2.4.Comparaison avec les essais de laboratoire

On dispose des résultats de deux types d'essais de laboratoire :
- les essais effectués sur blocs réels en laboratoire (exposés au chapitre 2).
- des essais de fluage effectués sur des échantillons cylindriques (diamètre 20 cm, hauteur 30 cm). Ces échantillons ont été fabriqués au laboratoire et n'ont subi pratiquement aucun regonflement (inférieur à 4%). Les prévisions des tassements à partir de ces essais sont effectuées à l'aide de la loi théorique de comportement de EL GHOCHE (à paraitre en 1992). Les détails de calculs de cette loi sont donnés en annexe 1.

Les prévisions pour les tassements à 5 mois et à 20 ans (y compris les tassements immédiats) sont donnés dans le tableau 3.3 pour des échantillons réels ou réduits de densité 0,4.

		5 mois			20 ans		
Labo. : Bloc réel	σ (kPa)	16	27	35	16	26	35
	ϵ (%)	7	10.5	13	7.5	11.2	14
Remblai	σ (kPa)	19	26	30	19	26	30
	ϵ (%)	6	8	16	12	10	16
Labo.:Echantillon Réduit	σ (kPa)	19	26	30	19	26	30
	ϵ (%)	3	4	5.2	3.5	4.8	6

tableau 3.3 : comparaison des déformations.

On remarque que :

- Les déformations sur blocs réels (laboratoire, et remblai) sont similaires, aussi bien pour les mesures à 5 mois que pour les prévisions à 20 ans .

- Les déformations des échantillons sont 2 fois inférieures à celles des blocs réels. Cette différence peut être due soit au tassement du sol, que nous ne connaissons pas, et qui est inclus dans les évaluations précédentes, soit à un comportement moins compressible. Ce dernier est sans doute lié à une fabrication sans regonflement, et plus homogène que les blocs réels. Les déformations ainsi obtenues sont parfaitement compatibles avec une utilisation des blocs en remblai.

Un calcul prévisionnel de l'accroissement de tassements (hors construction) à 20 ans est donné dans le tableau 3.4 .

couche	Inférieure	Médianne	Supérieure	Total
ϵ %	2,7%	4,3%	7%	14
H(bloc réel)	4,3 cm	5,1 cm	9,2 cm	18 cm
échantillon m contrainte	4 cm	3 cm	2 cm	9 cm

tableau 3.4 : comparaison de l'accroissement de tassements en 20 ans entre les blocs réels et des échantillons de laboratoire sans regonflement.

On constate que l'accroissement en 20 ans est deux fois plus grand pour la couche supérieure de bloc que pour les autres.

En outre, les tassements prévus à partir des échantillons cylindriques sont nettement plus faibles, et décroissent avec la contrainte normale existante.

On peut expliquer cette divergence simplement par le fait que les blocs n'ont pas été mis en place en même temps sur le chantier. La référence de temps n'est donc pas identique : la détermination du tassement instantané n'est pas faite dans les même conditions. Le tassement " de service" des échantillons contient vraisemblablement une part de tassement qui est considéré comme instantanée pour les couches inférieures.

Dans le cadre d'un ouvrage réel, la diminution du tassement d'un tel remblai peut être apportée par l'utilisation de blocs de plus forte densité (0,5 par exemple) pour les couches supérieures. En effet, les essais de laboratoire tant sur le bloc (EL GHOCHE, DAUDON et al 1990) que sur échantillon réduit (EL GHOCHE, DAUDON et al 1992) ont montré que ce potentiel de tassement, diminue lorsque la densité augmente.

Il sera également nécessaire alors de trier les blocs par densité, et également de diminuer fortement la tolérance sur les dimensions du bloc.

Le chantier expérimental a permis de dégager un certain nombre de points à améliorer lors de la fabrication des blocs :

- ne pas dépasser un élancement de 1, pour faciliter l'empilement : l'idéal étant un bloc de surface carrée au sol d' environ 1 m x 1 m et de hauteur 0.5 m.
- prévoir un ligaturage fort pour diminuer les bourrelets de regonflement, et muni d'un crochet de manutention (les blocs 400 kg sont difficilement manoeuvrables à la main).
- être exigeant vis à vis des tolérances dimensionnelles toujours pour faciliter l'empilement, notamment s'il est haut ; ou prévoir un tri avant mise en oeuvre du remblai.
- réduire les disparités en densité des blocs car elles peuvent entraîner des tassements différentiels.

Conclusion :

Les tassements relatifs observés sur le remblai suivent les évolutions déterminées précédemment en laboratoire. Bien que relativement élevés (≈ 18 cm hors construction) on pourra conclure malgré tout à la faisabilité d'un tel remblai.

En effet quelques précautions élémentaires :

- fabrication avec maitrise du regonflement,
- triage des blocs par densités et dimensions,
- pose du revêtement routier après un temps de sécurité,

permettront de réduire considérablement ce tassement, tout comme un bon compactage est indispensable à la qualité d'un remblai classique.

3.ETUDE DE L'ACTION SUR UN ECRAN

3.1.Dispositifs de mesure et déroulement de l'essai

Il doit permettre de modéliser l'action du remblai sur un mur de soutènement par exemple.

On a disposé deux écrans carrés indéformables en aluminium (0,5 m x 0,5 m) en appui verticalement sur les blocs numéros 12 et 13 au niveau de la couche médiane. Ces deux écrans sont liés à un bâti (indéformable et fixé solidement sur la plateforme de référence), par l'intermédiaire de 3 anneaux dynamométriques (un vertical, deux horizontaux) (Figure 3.12 et 3.13). Les deux jeux d'anneaux ont des capacités de 5 kN et de 10 kN respectivement pour l'écran nord et l'écran sud.

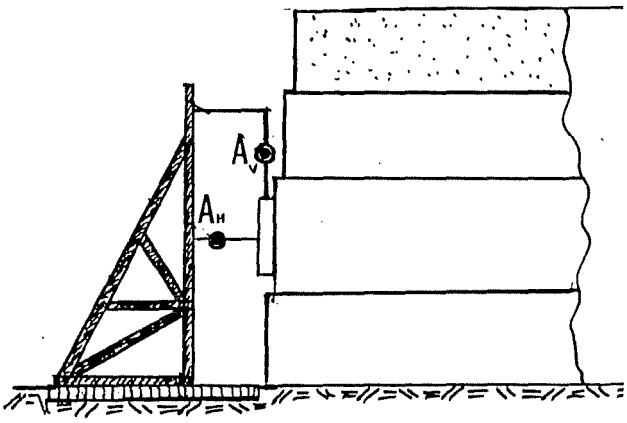


Figure 3.12 : Dispositifs.

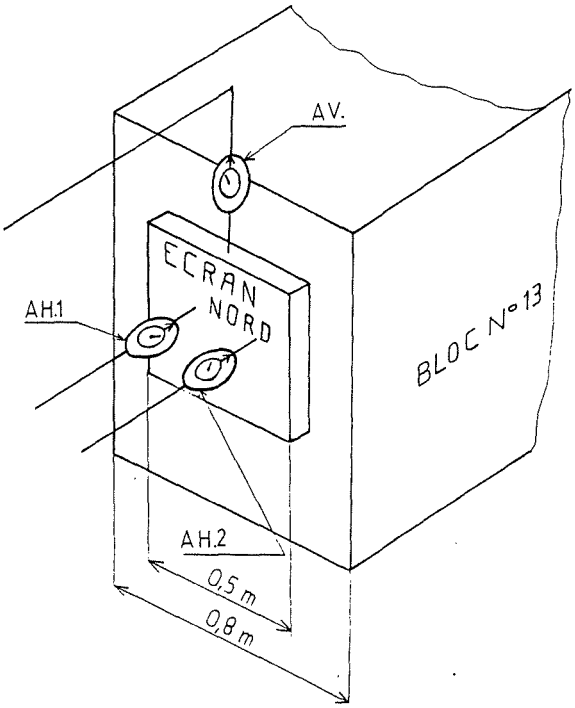


Figure 3.13 : instrumentation d'un écran.

Les anneaux horizontaux permettent de calculer la composante horizontale H de l'effort et l'anneau vertical la composante verticale V (et donc l'inclinaison sur l'horizontale et l'intensité):

$$H = A_{H1} + A_{H2} \text{ et } V = Av$$
$$F = \sqrt{H^2 + V^2} \text{ et } tg\ \delta = V/H$$

Le dispositif prévu en double permettra de savoir s'il y a ou non des disparités, suivant les blocs, de l'action sur l'écran.

L'évolution de H,V,(F et δ) est suivie au cours du temps, dès l'implantation de la deuxième rangée de blocs, et jusqu'à environ 1,5 mois ; les mesures suivantes ne sont pas interprétables, le matériel ayant été détérioré.

Une deuxième série d'essais a été faite après 6 mois, dans le but d'évaluer l'effort du remblai en fonction de la distance écran bloc. Pour cela, sur les deux dispositifs on a déplacé l'écran horizontalement, puis mesuré l'action sur celui-ci. L'opération, répétée plusieurs fois jusqu'à la limite de déplacement imposée par le matériel ($\approx$10 mm), au rythme d'un décalage par jour (à peu près) pendant deux semaines. Les mesures ont été effectuées avant et après chaque translation.

3.2.Suivi de la contrainte en fonction du temps

3.2.1.Résultats

3.2.1.1.Intensité de la contrainte sur l'écran

Les mesures effectuées permettent de calculer l'action sur un écran de 0,5 x 0,5 m². Afin de s'affranchir de la surface de l'écran, on calcule une contrainte moyenne appliquée sur l'écran :

$$\sigma = F_{mesurée}/S.$$

Ceci suppose d'émettre l'hypothèse d'une répartition uniforme de la contrainte sur tout l'écran, ce qui est acceptable compte tenu de la taille de l'écran. L'évolution de la contrainte sur l'écran est donnée à la figure 3.14.

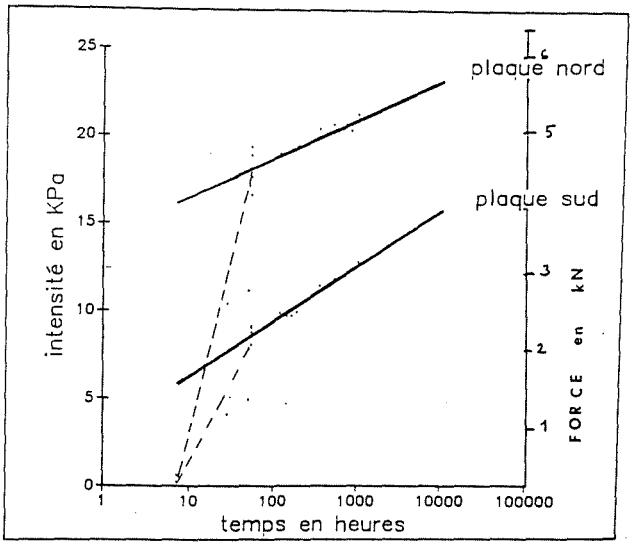


figure 3.14: évolution des contraintes sur les écrans.

Tout comme dans l'étude des tassements, on distingue la phase de construction puis la phase de suivi en fluage.

3.2.1.2.Inclinaison δ

La méthode de calcul de δ est donnée au paragraphe 3.2.1.1. L'évolution en fonction de ln t est représentée à la figure 3.15

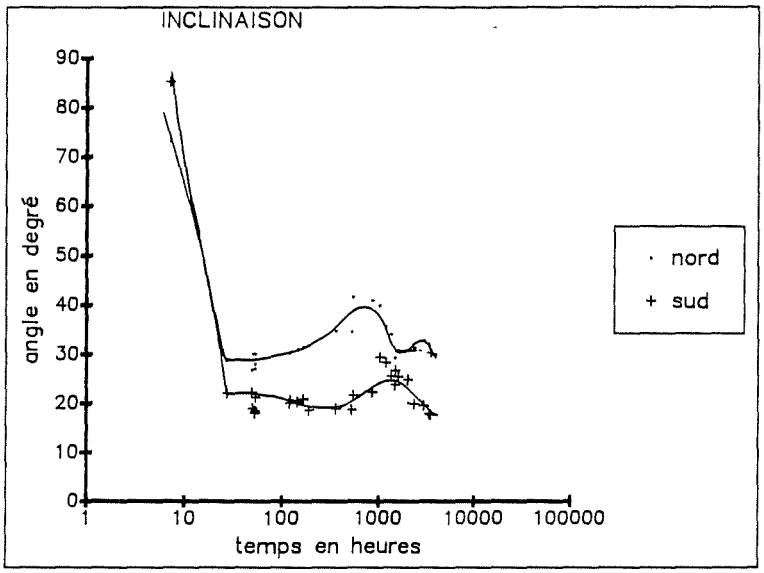


Figure 3.15 : évolution de l'inclinaison δ.

On constate que l'inclinaison est comparable à celle d'un sol de remblai et augmente légèrement en fonction du temps. Les tassements du remblai sont importants et entraînent une forte valeur de la composante verticale de l'action sur l'écran.

3.2.2.Analyse

3.2.2.1.Phase de construction

Les deux courbes sont décalées, de part essentiellement la dissymétrie de l' effort de fin de construction, dissymétrie répercutée tout au long de l'essai (tableau 3.5).

	Fin construction	1033 heures
Ecran Nord	8 kPa	12 kPa
Ecran Sud	18 kPa	20kPa
Decalage	10kPa	8 kPa

tableau 3.5 .

Une analyse séparée des contributions de chacun des anneaux est faite (Figure 3.16).

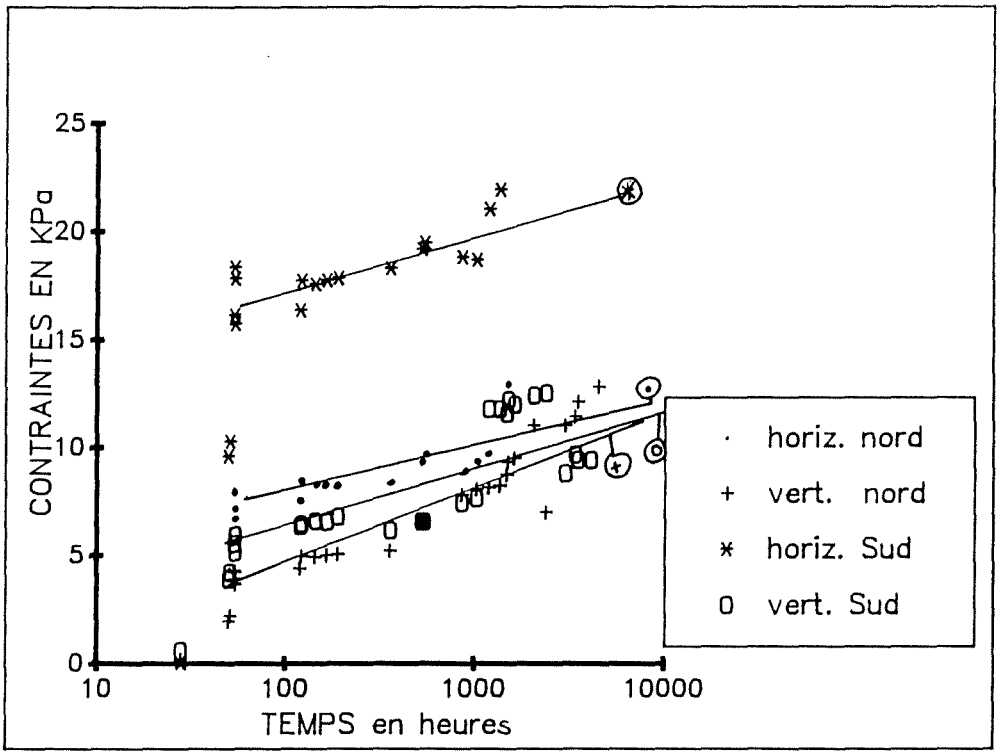


Figure 3.16 : action sur les écrans: évolution en fonction du temps.

On distingue nettement l'amplitude des efforts de construction beaucoup plus importants au sud et que les composantes verticales sont faibles devant les composantes horizontales, mais assez importantes en valeur absolue.

Pour chaque écran un relevé des composantes horizontales (tableau 3.6) montre que les actions sont différentes. Il indique la présence d'une rotation de l'écran de 0,1° autour d'un axe vertical (passant par l'axe de l'anneau vertical).

120 heures	Intensité (N.)
Nord Horizont.1	124
Nord Horizont.2	857
Sud Horizont.1	3070
Sud Horizont.2	2050

tableau 3.6 : contribution des anneaux nord et sud.

Elle entraîne une grande disparité entre les actions horizontales appliquées sur l'écran. On supposera malgré tout que l'écran reste dans un plan parallèle à la face instrumentée.

EL GHOCHE a montré que la déformation latérale d'un bloc sous compression est négligeable devant la déformation longitudinale. Mais si le bloc est confiné une faible déformation peut entraîner un effort sur la paroi de confinement. L'intensité de la contrainte sur l'écran en fin de construction peut donc être en partie due au confinement lié à l'existence de l'écran, plus qu'à la transmission de la poussée de la rampe d'accès.

3.2.2.2.Phase de suivi

La figure 3.14 montre que l'intensité en fonction de ln t évolue assez lentement : on pourra considérer que cette évolution est linéaire de ln t ; (coefficient de corrélation : 0,93).

Une prévision à 20 ans (tableau 3.7) montre que l'accroissement hors construction est de l'ordre de 8 kPa.

	loi linéaire	accroissement contrainte 20 ans	construction 3	contrainte totale
Sud	0,86 ln t+14,5	6,8 kPa	18 kPa	≈25 kPa
Nord	1,34 ln t+3,25	9,3 kPa	8 kPa	≈ 17,3 kPa
Moyenne	78	8 kPa	13 kPa	21 kPa

tableau 3.7 : évolution en 20 ans.

Comparaison avec un remblai en sol :

Compte tenu des utilisations possibles de Plastbloc (remplissage derrière des culées de ponts, ou des soutènements), il est intéressant d'éffectuer cette comparaison, bien que les phénomènes ne soient pas totalement comparables.

On supposera que la contrainte du sol est uniformément répartie de manière constante le long de l'écran. Le centre de gravité de ce dernier est situé à 3 mètres de la surface libre ; et la contrainte est calculée en ce point-là : cette comparaison peut être faite soit avec une poussée des terres au repos, cas d'utilisation derrière les culées de pont par exemple, considérées comme parfaitement immobiles ; soit avec la poussée limite des terres, puisque le fait d'utiliser des anneaux pour mesurer les efforts autorise

un déplacement de l'écran, déplacement du même ordre de grandeur que celui mobilisant la poussée.

a- Poussée des terres au repos (DAUDON, EL GHOCHE, COULET 1991)

$\sigma_{repos} = k_o \gamma h$ $\qquad$ $\gamma = 19\ kN/m^3$

$= 33\ kPa$ $\qquad$ $h = 3\ m$

$k_o = 0{,}58$

$\phi = 30°$(par exemple)

La comparaison avec le tableau 3.7 montre que la poussée du remblai Plastbloc est nettement inférieure à celle du remblai classique en sol. On pourra donc prévoir les mêmes applications aux remblais Plastbloc que celles d'un sol au repos.

b- Poussée des terres

$\sigma = K_{a\gamma} \gamma h$ $\qquad$ $K_{a\gamma} = 0{,}3$ ($\phi = 30°$)(CAQUOT,1935)

$= 17\ kPa$ $\qquad$ $\delta = 2/3\ \phi$

La terre est considérée comme un matériau ne fluant pas en fonction du temps. En effet, les variations de la poussée au cours du temps ne peut être due qu'à l'influence d'éléments extérieurs (saturation variable, surcharge momentanée ...).
La comparaison des valeurs du tableau 3.7 avec la poussée des terres montre que le remblai induit une contrainte totale à 20 ans pouvant être supérieure à la poussée du sol ; et la durée de 20 ans, prise en compte pour la prévision est inférieure à la durée de service de bien des ouvrages. A terme, la contrainte du remblai risque de dépasser celle du sol sur l'écran.

En revanche, l'accroissement hors construction est environ deux fois inférieur à l'action du sol.

C'est lors de la construction que la majeure partie de la contrainte est acquise.

Il apparait donc intéressant de trouver un moyen de réduire considérablement la contribution de la phase de construction. On pourra ainsi obtenir une contrainte de "remblai Plastbloc" très inférieure à celle du sol.

On a pu remarquer que les écrans n'ont pas été instrumentés avec des jeux d'anneaux ayant la même capacité. Ceux dont la raideur est forte, se sont peu déformés, et l'effort encaissé est fort. Au contraire, ceux de faible raideur se sont beaucoup plus déplacés, et ont mesuré un effort beaucoup plus faible.

Cette remarque nous a amené à penser que comme pour la poussée des terres, celle du remblai diminue en fonction du déplacement autorisé de l'écran. Et il existe, un déplacement "limite" horizontal, pour lequel, la poussée peut être annulée (décollement de l'écran). Ceci n'est pas possible avec le sol, ce déplacement limite entraînant la ruine de l'ouvrage.

On a donc cherché à déterminer comment évoluait la courbe des contraintes (sur l'écran) en fonction du déplacement horizontal de l'écran. C'est l'objet de la deuxième série d'essais étudiée au paragraphe 3.3.

La détermination de ce déplacement limite à partir de l'état actuel de l'écran et du remblai en poussée, peut permettre d'annuler ou du moins de minimiser cette action. On prévoira de laisser l'espace correspondant, dès la construction, entre les écrans et le remblai. Ceci sera également valable dans le cas d'une utilisation derrière un écran indéplaçable (culées de ponts).

3.3.Translation horizontale de l'écran

3.3.1.Résultats

Cet essai est destiné à connaître la courbe de l'évolution de la force en fonction du déplacement horizontal de l'écran (Figure 3.17).

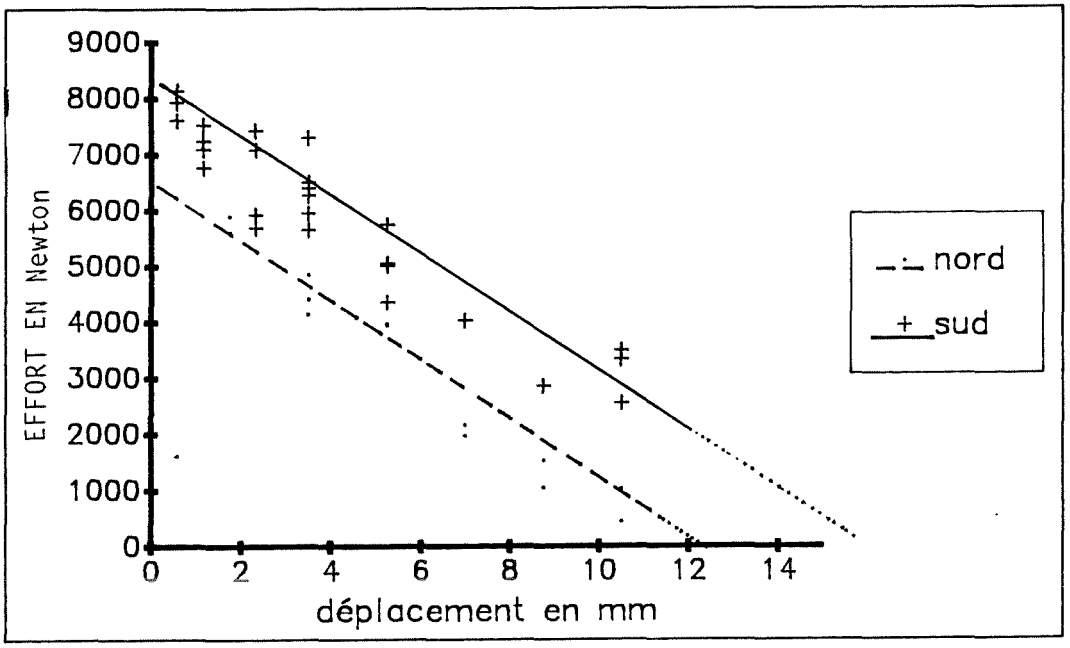


figure 3.17 : déplacement des écrans : évolution de l'effort.

Le décalage de l'écran a été fait d'abord de 0.6 à 0.8 mm par jour, puis de plus en plus vite, jusqu'à 1.75 mm par jour. Pour des raisons mécaniques, on n'a pu décaler

complètement l'écran des blocs et effectuer simultanément une mesure sur les anneaux. D'autre part un grand déplacement horizontal entraîne une inclinaison de l'écran (≈1°), modifiant alors les paramètres du problème.

3.3.2.Analyse

L'allure générale des deux courbes montre une tendance à la diminution de la contrainte en fonction du déplacement.

Toutefois, lors des premiers déplacements faibles (0,4 mm), le fluage entre deux mesures (≈12 heures) est tel que l'on trouve une contrainte pratiquement égale à son niveau de départ. La température ambiante, atteignant jusqu'à 35° en journée, n'y est sûrement pas étrangère.

Une interpolation linéaire (choisie pour des raisons évidentes de simplification) montre que la contrainte sur l'écran devient nulle pour environ 12 à 15 mm de translation horizontale.

Il suffirait donc, pour diminuer considérablement la contrainte derrière un mur de soutènement, ou des culées de pont, de prévoir un espace libre de l'ordre du centimètre pour réduire les efforts sur l'écran. Les blocs jouent alors eux mêmes le rôle d'un soutènement.

4.ESSAI D'EXTRACTION D'UN BLOC

Le but de cet essai est d'observer comment peut se faire le frottement entre les différents blocs, et d'essayer de comparer les résultats avec les essais de laboratoire de frottement sur bloc en vraie grandeur, effectués par EL GHOCHE (1989).

4.1.Dispositifs

Lors de la construction du remblai, le bloc numéro 10 a été équipé de manière à pouvoir être extrait vers l'extérieur. Cet essai, risquant de désorganiser le remblai, n'a été pratiqué qu'une fois les autres terminés. L'extraction du bloc a été faite à l'aide d'un vérin. La contrainte verticale sur le bloc est due uniquement au poids des autres blocs et de la terre au-dessus. L'effort d'extraction est mesuré par les anneaux dynamométriques intercalés entre le vérin et les attaches du bloc (figure 3.18). Le déplacement horizontal est mesuré à l'aide d'un mètre ruban.

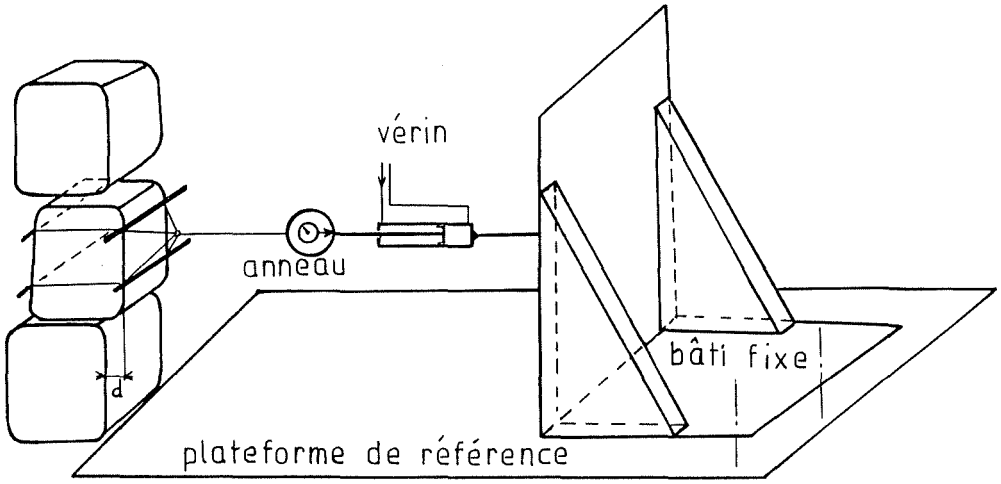


Figure 3.18 : dispositif d'extraction d'un bloc du remblai.

Les blocs contigus ont été étayés afin de prévenir une destruction complète.

4.2.Résultats et analyse

4.2.1.Résultats

L'effort d'extraction en fonction du temps est donné figure 3.19. La valeur maximale de 2000 N nécessaire à extraire le bloc, nous a surpris par sa faible intensité. En effet le bloc, chargé en théorie par 28000 N, a été extrait très facilement, il suffit d'une traction 10 fois plus faible pour le déplacer.

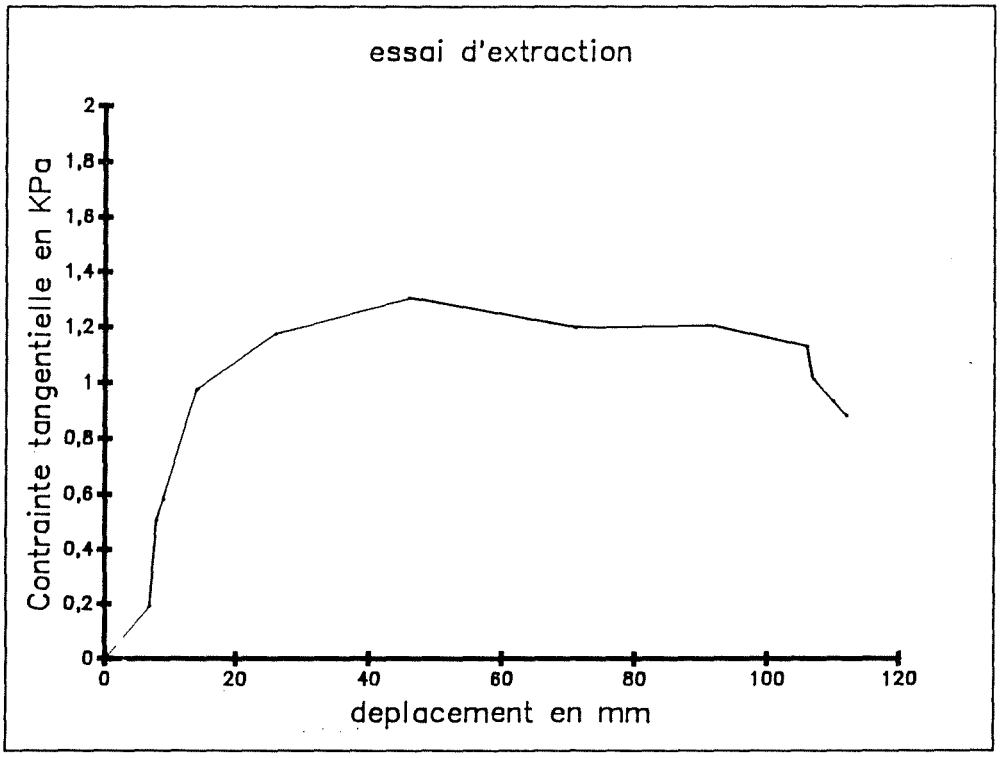


Figure 3.19 : courbe contrainte tangentielle déplacement.

Le calcul de τ est fait de la manière suivante (figure 3.20).

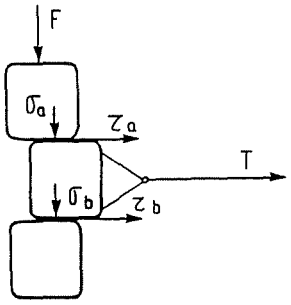


figure 3.20 : schéma des notations adoptées.

Le bloc est soumis à un frottement sur les 2 faces. Compte tenu de l'empilement réel, on négligera le frottement sur les faces verticales (espace ≈ 5 cm). La face supérieure du bloc est soumise à 26 kPa, et la face inférieure à 30kPa.

On suppose que le frottement mobilisé répond à l'équation de Coulomb :

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

où ϕ est l'angle de frottement.

A est une grandeur homogène à une adhérence.

Les deux surfaces ne sont pas soumises à la même valeur de la contrainte normale :

surface a : σ_a =26kPa
surface b : σ_b =30kPa.

A des fins de simplifications, on effectuera les mêmes hypothèses que EL GHOCHE (1989), c'est à dire que les surfaces de frottement sont soumises à la moyenne de σ_a et σ_b soit σ =28kPa.

La tension mesurée lors de l'essai est la résultante de celles appliquées sur S_a et S_b. En vertu de l'hypothèse simplificatrice précédente, on considère que T se répartit également sur S_a et S_b et par conséquent :

$$\tau = (\tau_a + \tau_b)/2 = T/(S_a + S_b)$$

Les mesures de déplacement effectuées au cours de l'essai, ont montré que $S_a = S_b$ d'où :

$$\tau_{max} = T_{max}/(2.S) \text{ avec } S = S_o - d.l$$

où S_o est la surface initiale,
d le déplacement et
l la largeur d'un bloc

L'essai d'extraction effectué nous fournit un couple $(\sigma, \tau) = (28 ; 1.4)$ kPa .

4.2.2.Analyse

Le but de ces essais était de replacer le couple (σ, τ) = (28,1.4) sur la courbe de frottement obtenue en laboratoire, tout ayant conscience que le problème n'est pas parfaitement identique puisque dans le remblai, le bloc glisse sur une couche de sol, et non sur un autre bloc.

EL GHOCHE avait obtenu : ϕ = 18° (adhérence nulle),donc pour σ = 28 kPa, on a τ =9kPa.

La valeur obtenue de 2.8 kPa, est six fois plus faible .

En effet, la contrainte normale effectivement appliquée sur le bloc peut être très faible. Cette hypothèse est parfaitement imaginable de part la disposition des blocs en quinconce, pouvant dévier les contraintes au sein du massif (Figure 3.21). Cette

hypothèse est confirmée par le fait que le massif ne semble aucunement perturbé par l'essai. Si le bloc avait participé activement à l'équilibre, son extraction, même faible, aurait créé des perturbations. Il aurait fallu implanter plusieurs dispositifs d'extraction au risque d'entraîner une ruine complète.

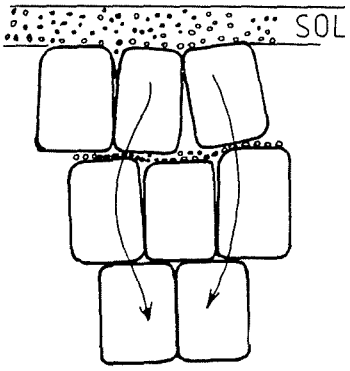


Figure 3.21 : Dérivation des contraintes.

Conclusion

Le suivi du remblai expérimental a permis de confirmer les informations obtenues en laboratoire :

- Le fluage est encore assimilé à une fonction linéaire de ln t dans le domaine étudié. On peut alors prévoir le comportement global du remblai. Ce comportement reste parfaitement admissible compte tenu des conditions dans lesquelles le remblai a été construit. Le tassement peut en effet être réduit par une fabrication plus soignée des blocs.

- L'étude de l'action sur un écran a permis de valider les utilisations potentielles des blocs ; cette poussée, du même ordre de grandeur que celle du sol, peut être facilement diminuée lors de la construction.

Néanmoins, il reste encore à déterminer quels sont les mécanismes de frottement pouvant être mis en jeu, lors d'une éventuelle ruine de l'ouvrage. Il sera également nécessaire de s'intéresser au comportement du matériau, soumis à des contraintes de circulation, notamment si les blocs sont disposés sous une chaussée.

CHAPITRE 4
COMPORTEMENT DES INTERFACES EN LABORATOIRE

CHAPITRE 4 COMPORTEMENT DES INTERFACES EN LABORATOIRE

Afin de connaître le comportement d'un ouvrage Plasbloc en grandes déformations engendrées par la poussée des terres, il est indispensable de caractériser :

- le frottement à l'interface bloc sol.
- le frottement à l'interface entre deux blocs.
- le cisaillement interne d'un bloc.

La connaissance de ces différents comportements est essentielle pour déterminer celui ou ceux qui peuvent entraîner la rupture de l'ouvrage.

Des tentatives de caractérisation ont déjà été menées sur blocs réels : un essai d'extraction d'un bloc sur le remblai expérimental (exposé au chapitre précédent) et des essais de laboratoire sur des blocs de densité 0,4 (EL GHOCHE 1989). Le premier n'a pas permis de tirer des conclusions, et si le deuxième a fourni des résultats positifs, ils ne concernent que le frottement entre blocs. La lourdeur des manipulations (les blocs réels pèsent près de 400 kg) n'a pas permis de caractériser le cisaillement, et le frottement contre le sol. Nous avons donc choisi de mener nos essais sur des modèles réduits à l'échelle 1/4. Ensuite nous analyserons les différents types de désordres probables dans le remblai.

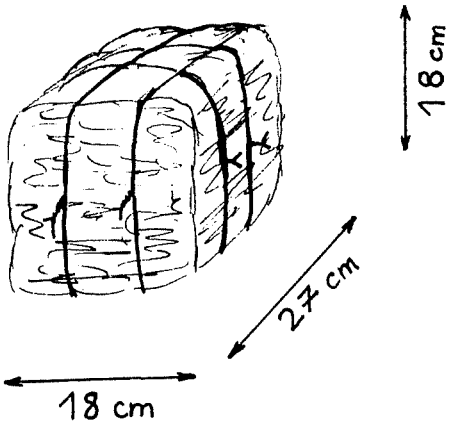
1.DISPOSITIFS D'ESSAIS

1.1.Fabrication des blocs modèles réduits

Nous avons réalisé des "mini-blocs " à une échelle réduite à 1/4 en essayant de respecter au mieux l'hétérogénéité du matériau lorsqu'il est dans le bloc réel.
Le principe de fabrication est le suivant :

On remplit manuellement un moule métallique de dimension 0,27 cm x 0,18 cm x 0,18 cm, avec des morceaux de plastique provenant d'un bloc : sacs plastiques de supermarché, films polyane, sacs d'engrais....
On comprime ce plastique à l'aide d'un vérin sous une forte pression jusqu'à une hauteur de 18 cm. Le plastique est bloqué à l'aide de 2 tiges dans le fond du moule (figure 4.1). Cette opération est répétée jusqu'à épuisement de la quantité de plastique nécessaire. Cette quantité est déterminée à partir de la densité initiale souhaitée, en tenant compte d'un regonflement forfaitaire. Après la dernière couche de plastique

comprimée, les tiges de blocage sont remplacées par des fils de fers qui représentent les attaches métalliques du bloc réel. Le serrage du fil de fer est manuel, et donc jamais identique. Après relèvement de la presse, on obtient un bloc dont deux dimensions sont fixes (largeur 18 cm, longueur 27 cm) mais dont la hauteur varie en fonction du serrage manuel.



La forme de l'échantillon obtenue est similaire à celle des blocs réels.

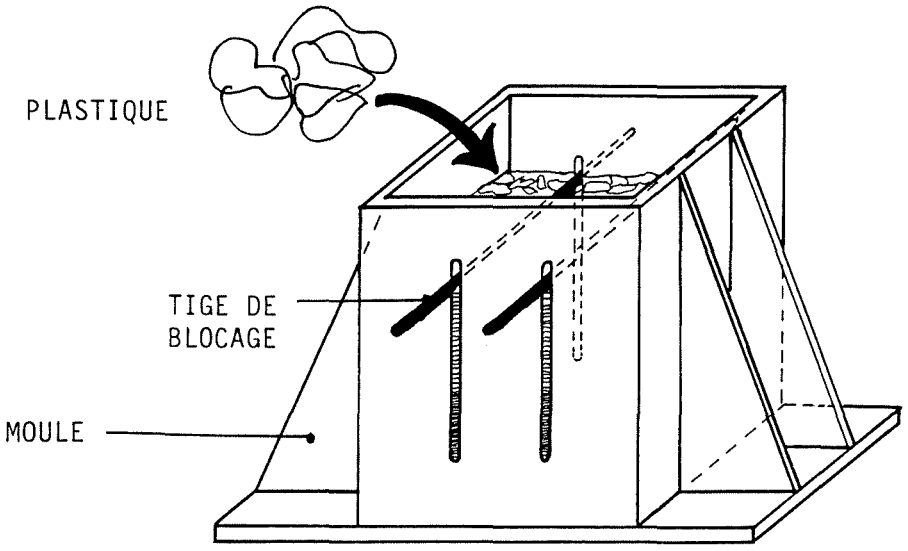


figure 4.1 : Fabrication des blocs.

Le regonflement est important et très difficile à maîtriser.
Le bloc réduit n'est pas préalablement enveloppé dans du tissu comme ceux qui constituent le remblai. Il est en effet peu probable que ce tissu soit présent dans le cadre d'une industrialisation du procédé : il favorise le glissement différentiel des blocs en offrant un bon état de surface. Ceci va à l'encontre de la sécurité de l'ouvrage.

Pour effectuer les essais, nous avions choisi une densité initiale de l'ordre de 0,4 (identique à celle des blocs réels) Le regonflement prévu ayant été sous estimé, la

densité initiale réelle est de l'ordre de 0,3. Cette densité, bien que faible a été conservée pour toute la série d'essais, afin de na pas introduire de paramètre supplémentaire. De plus l'application de la contrainte normale sur l'échantillon modifie considérablement la densité, la rapprochant de 0,37.

1.2.Appareillages de frottement et de cisaillement

Deux appareillages ont été confectionnés. Le premier s'est avéré moins fiable, et plus limité, notamment pour l'application de fortes contraintes normales. C'est pourquoi un deuxième appareillage a été construit sur le type "boite de Casagrande" de grande dimension. Les résultats obtenus sur les 2 appareillages étant suffisamment concordants, ils ont tous été exposés.

1.2.1.Appareillage 1 "type empilement".

Il est fondé sur le principe du protocole des essais de frottement ayant été effectués sur les blocs réels (EL GHOCHE 1989) (figure 4.2)
Trois mini-blocs sont empilés les uns sur les autres dans la colonne (1) Le bloc n°II est équipé d'un dispositif (2) permettant d'y fixer le système de déplacement horizontal (3). Une fenêtre (10) au droit de celui-ci permet de l'extraire, tandis que les blocs I et III sont bloqués dans leurs déplacements horizontaux (4). Le système de déplacement horizontal est fixé solidairement au niveau de la face avant du bloc II par l'intermédiaire d'un anneau dynamométrique (8). Une manivelle (5) équipée d'une tige filetée (6) et d'un palier sur roulement à billes (7) constitue le dispositif d'extraction du bloc. Elle est actionnée manuellement à une vitesse constante égale à environ 1 cm par minute. Le déplacement est décompté en nombre de demi-tours de manivelle effectués.

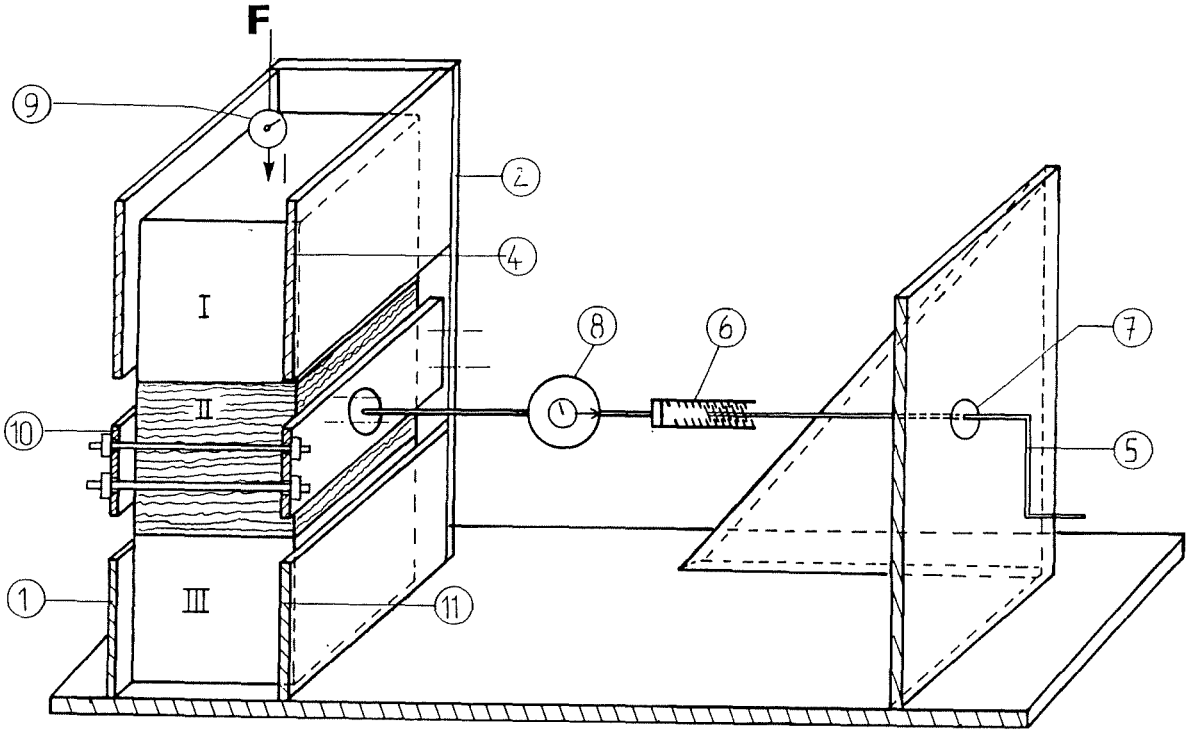


figure 4.2 : appareillage "empilement" à 2 surfaces de frottement.

La contrainte normale est appliquée à l'aide d'un vérin hydraulique également manuel par l'intermédiaire d'un anneau dynamométrique (9). Un réglage des plaques (4) et (11), ainsi qu'un jeu de cales sont disponibles pour assurer la concordance entre le bloc II et la fenêtre 4.

Pour les essais de cisaillement du matériau "Plastbloc", l'appareillage a été utilisé de la manière suivante : deux blocs sont posés l'un sur l'autre dans la colonne. La surface de contact est placée au milieu de la fenêtre ; le cisaillement se fait donc en deux surfaces, une au sein de chaque bloc. Les attaches métalliques sont coupées, une fois la contrainte appliquée.

Que ce soit dans le cadre de l'étude du cisaillement ou du frottement, l'application de la contrainte normale entraîne un fort tassement de la colonne de blocs (environ 5 à 6 cm) modifiant donc la densité. Le maintien de cette contrainte tout au long de l'essai, contribue à son accroissement. Le tassement correspondant est mesuré régulièrement.

Entre chaque série d'essais les blocs sont inversés, ou refaits lorsque l'état de surface est modifié de façon importante.

Le matériau ne présentant pas de glissement très marqué, même pour de grandes valeurs de déformation, l'essai est arrêté arbitrairement pour un déplacement de l'ordre de 10 cm (soit une déformation supérieure à 30 %), correspondant généralement avec l'amorçage d'un palier dans l'évolution de la contrainte de cisaillement.

Les problèmes rencontrés avec cet appareillage sont les suivants :

* La forte déformabilité du matériau entraîne une relaxation de la contrainte normale,qu'il faut alors maintenir constante tout au long de l'essai.

* La colonne de blocs se tasse parfois jusqu'à une déformation de 20% sous une charge de 40 kPa : ceci conduit à un tassement des surfaces de cisaillement (figure 4.3) et de frottement qui peuvent ne plus se trouver en face de la fenêtre d'extraction.

* apparition d'un phénomène de concentration de contrainte sur certaines faces des blocs. (figure 4.4). Le bloc se comprime latéralement modifiant les phénomènes de frottement .

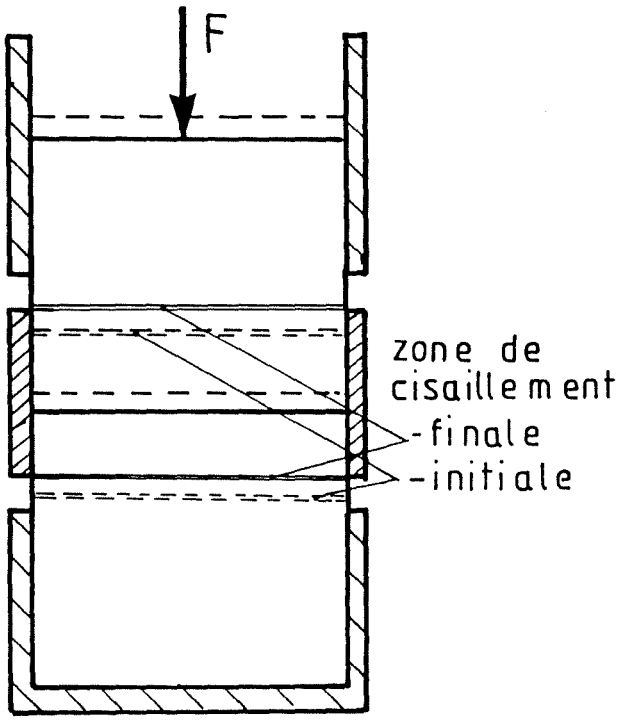


figure 4.3 : déplacement de la zone de cisaillement.

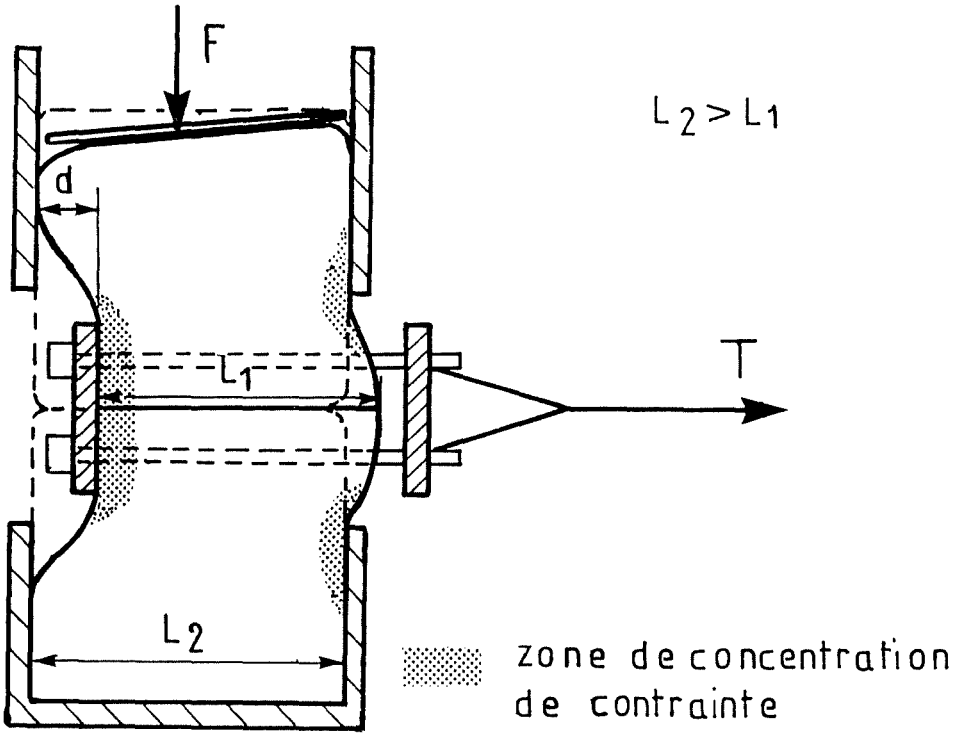


figure 4.4 : phénomène de concentration de contraintes.

L'exploitation des résultats concernant ce dispositif est la même que celle décrite au chapitre précédent lors de l'essai d' extraction. Mais afin d'intégrer les résultats obtenus avec ceux du deuxième appareil, l'exploitation est effectuée avec les hypothèses suivantes :

- le poids des blocs est négligeable devant la contrainte normale appliquée, et chaque surface de cisaillement (ou de frottement) est soumise à la même contrainte.
- l'effort de traction du bloc (T) se répartit également entre les deux surfaces de cisaillement (ou de frottement)
- la répartition des contraintes est supposée uniforme sur les surfaces de frottement.

1.2.2.Appareillage type cisaillement plan

Le schéma de principe est donné à la figure 4.5.

Les deux blocs sont disposés l'un sur l'autre dans un chariot 1 pouvant glisser sans frottement (μs = 0,0087) sur des glissières à billes. Les déplacements du bloc II sont bloqués par la plaque verticale 3. Le déplacement horizontal du chariot est effectué par le même système que l'appareillage précédent (anneau dynamométrique 4 et

manivelle). Un jeu de cales placé sous le bloc I permet de faire coïncider la surface de frottement avec le bord supérieur du chariot.

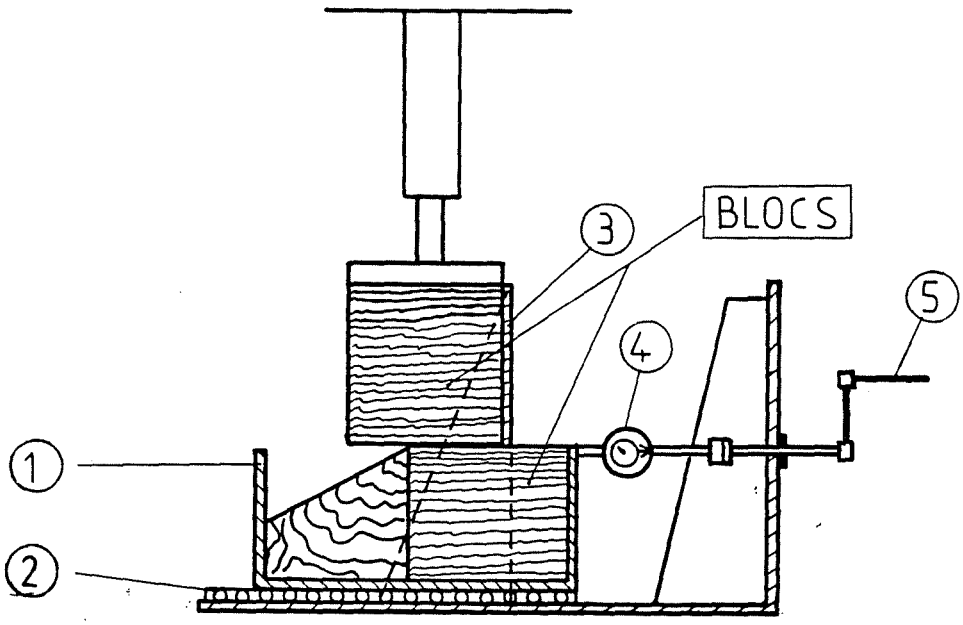


figure 4.5 : appareillage type frottement rectiligne (une surface de frottement).

Dans le cas de l' essai de cisaillement, un seul bloc est disposé dans le chariot de telle sorte que la surface de cisaillement soit à mi-hauteur du bloc.(figure 4.6)

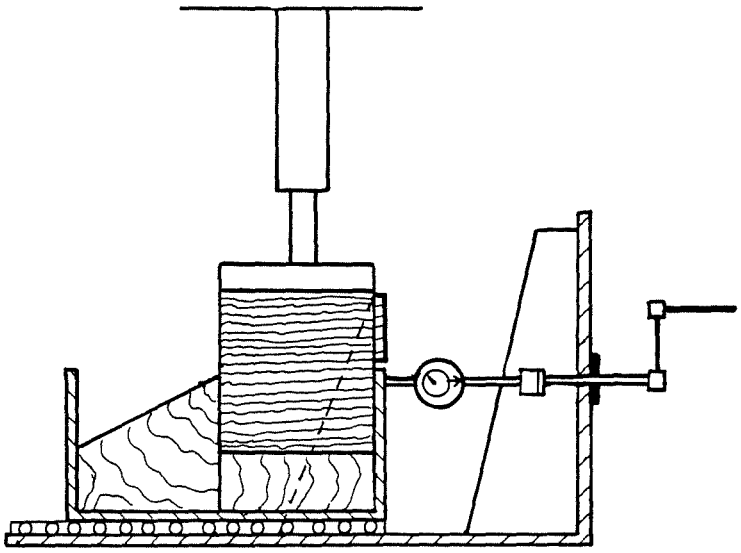


figure 4.6 : disposition lors d'un essai de cisaillement.

Cette conception de l' appareillage permet de diminuer les tassements d' un tiers et d'éviter les problèmes de flambement de la colonne (2 blocs empilés au lieu de 3). Mais les effets de compression latérale sont toujours présents et non quantifiables.

1.2.3.Essais effectués

Plusieurs types d'essais ont été effectués :

- dans le cadre du frottement "bloc sur bloc", une série est menée avec l'appareillage n°1, puis deux séries avec l'appareillage n°2 :
  pour la première, le bloc inférieur est constitué uniquement de plastique ; pour la deuxième, une partie du plastique est remplacée par une cale en bois toujours pour minimiser les tassements au cours de l'essai.

- dans le cadre du frottement bloc sur sol, seul l'appareillage n° 2 permet cette étude. Deux blocs différents, mais de même densité ont été testés.

- enfin le cisaillement d'un bloc a été étudié avec les deux appareillages.

Tous les échantillons testés ont la même densité initiale, égale à 0,3 environ.

appareillage	série	CONTRAINTES NORMALES en kPa (nb d'échantillons)
1	1	bloc sur bloc 15.4 (6)- 20.6 (3) - 25.7 (4) - 30.8 (6) - 36 (3) - 41.1 (2)
2	1	bloc sur bloc 0 (1) - 20.5 (5) - 41.2 (2) - 61.5 (2) - 82.3 (3)
2	2	bloc sur bloc 0 (1) - 20.5 (3) - 41.2 (2) - 61.5 (2) - 82.3 (3)
2	1	bloc sur sol 0 (3) - 20.5 (3) - 41.2 (3) - 61.5 (3) - 82.3 (3)
2	2	bloc sur sol 0 (2) - 20.5 (2) - 41.2 (2) - 61.5 (2) - 82.3 (2)
1	1	cisaillement 15.4 (2)- 20.6 (1) - 25.7 (5) - 30.8 (6) - 36 (3) - 41.1 (3)
1	1	cisaillement 0 (3) - 20.5 (3) - 41.2 (3) - 61.5 (3) - 82.3 (3)

tableau 4.1 récapitulatif des essais effectués .

1.3.Conditions de similitude

Le matériau réel et celui du modèle sont identiques que ce soit pour les blocs, ou pour le sol. Le rapport de réduction du bloc modèle réduit est de 4.

$$\frac{\gamma_{réel}}{\gamma} = 1$$

Le rapport entre les contraintes normales réelles et les contraintes normales appliquées sur le modèle réduit est de 1

$$\sigma_{réel} = \sigma$$

Déterminons le rapport entre les grandeurs caractéristiques du comportement en grandes déformations suivant une loi de Coulomb :

$$\tau_{max} = tg\,\Theta\,\sigma + C$$

On montre que (GOURC 1982) :

$$\frac{\tau_{max\,réel}}{\tau_{max}} = \frac{\sigma_{réel}}{\sigma} = 1$$

$$tg\,\Theta_{réel} = tg\,\Theta$$

par conséquent,

$$C_{réel} = C$$

pour l'étude du frottement on a les mêmes conclusions, :
si l'on pose $\mu = \tau_{max}/\sigma$

$\mu_{sréel} = \mu_s$ si μ_s représente le coefficient de frottement

$A_{réel} = A$ si A représente l'adhérence éventuelle.

Les résultats obtenus avec les modèles réduits de blocs seront donc identiques à ceux que l'on aurait pu observer avec les blocs en taille réelle.

2.ESSAIS DE FROTTEMENT

Lorsque l'on met deux matériaux en contact, toute tentative de les faire glisser l'un par rapport à l'autre se heurte à l' apparition d'une force de frottement.

On montre qu' il y a proportionnalité entre la contrainte appliquée, et la contrainte à fournir pour amorcer le glissement :

$\tau = \mu_S \sigma$ où μ_S est le coefficient de frottement

L'expérience montre que lors du démarrage du glissement, la contrainte nécessaire pour le maintenir est légèrement inférieure. On définit donc un coefficient de frottement dynamique μ_d tel que :

$\mu_S > \mu_d$

$\tau = \mu_d \sigma$

C'est le coefficient μ_S que nous cherchons à déterminer. Dans le cadre de nos essais, le matériau Plastbloc n'est pas un sol et ne permet pas de faire, en première approche, une exploitation suivant une droite de Coulomb comme en mécanique des sols classique. Dans un premier temps, nous étudierons le rapport τ/σ en fonction de σ .

On montre que pour les grandes valeurs de σ , τ/σ tend vers une valeur constante égale à la pente de la droite de Coulomb. Cette valeur est nommée coefficient de frottement apparent μ^*_{sb} dans le cas de l'interface sol-bloc, et μ^*_{bb} dans le cas de l'interface bloc-bloc. Nous donnerons donc, par analogie avec la terminologie classique de mécanique des sols, un angle de frottement apparent ϕ^* tel que :

$\phi^* = \text{arc tangente } (\mu^*)$,

ainsi qu'une adhérence apparente A^* tel que:

$\tau = \mu^* \sigma + A^*$ où A^* est l'adhérence apparente.

2.1.Essais préliminaires

Le plastique utilisé dans les blocs réels et les modèles réduits est majoritairement constitué de polyéthylène. Nous avons donc dans un premier temps effectué des essais de frottement sur un bloc de polyéthylène de basse densité (d=0.94), puis sur des feuilles de polyéthylène (sachet poubelle bleu).

Ces essais ont été effectués à l'aide d'un appareil de cisaillement rectiligne (boîte de Casagrande), dont la boite a été modifiée afin de garder une surface de frottement constante au cours de l'essai (figure 4.7).

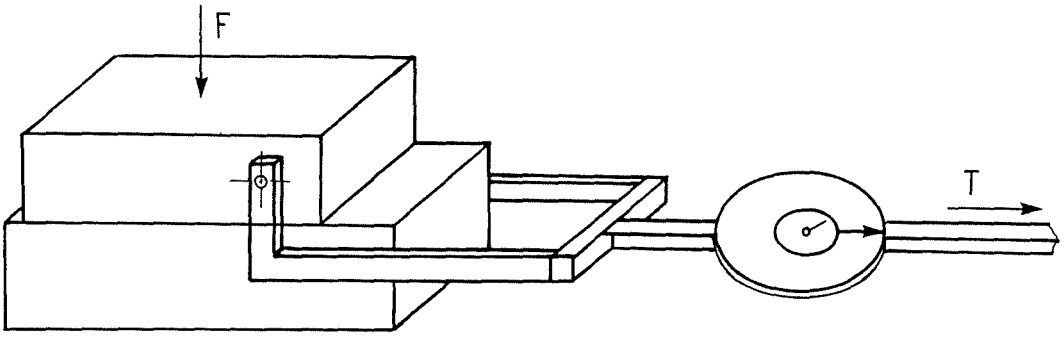


figure 4.7 : Modification de l'appareillage (boîte de Casagrande).

Dans le cas du frottement du matériau, deux blocs ont été découpés et ont été placés dans une boîte de Casagrande modifiée (dimensions 5cmx20cm pour le réceptacle inférieur, et 5cmx15cm pour le supérieur).

Dans le cas de l'étude du frottement sur les feuilles de polyéthylène, celles-ci ont été collées sur les blocs précédents à l'aide d'adhésif double face, puis testées identiquement.

Chacun des deux matériaux a été étudié à sec, puis humidifié, afin de quantifier la diminution du frottement en présence d'eau.

Le matériau polyéthylène pouvant être considéré comme indéformable, les résultats ont été exploités suivant, la loi

$$\tau = \mu_S . \sigma \qquad \text{(ASHBY 1991 tome 1)}$$

où μ_S est le coefficient de frottement statique.

Trois valeurs différentes de σ ont été appliquées : 103 kPa, 69.8 kPa et 37.7 kPa et environ trois essais ont été effectués pour chacune d'elles.

2.1.1.Frottement sur polyéthylène pur en bloc

2.1.1.1.Essai à sec

L'allure des courbes τ =f(déplacement) sont données à la figure 4.8.

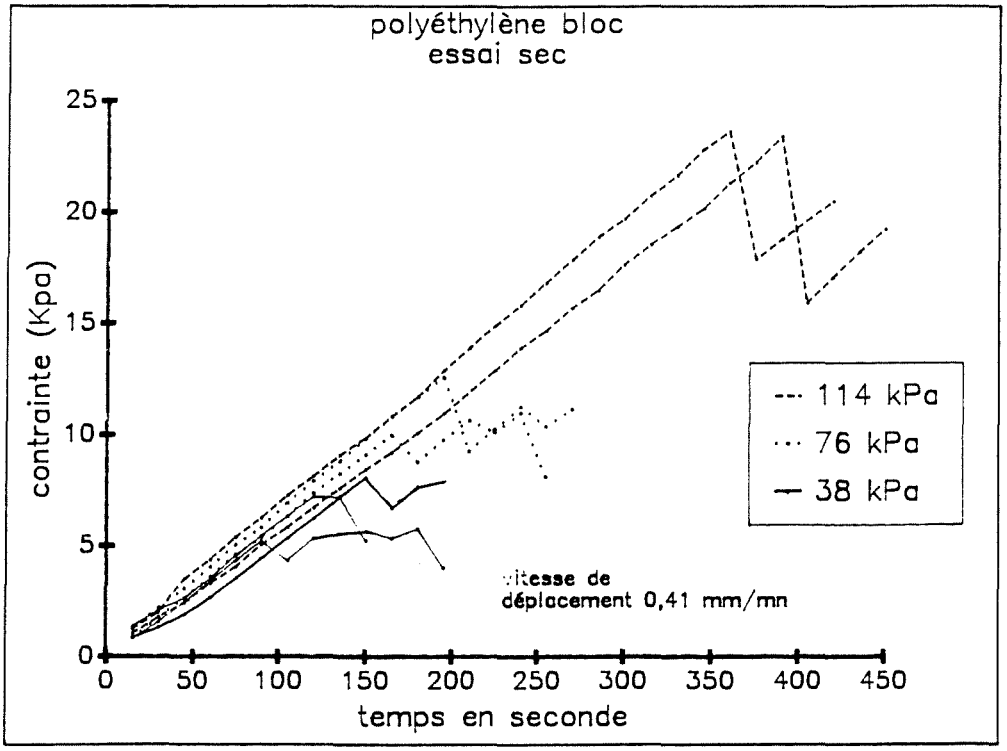


figure 4.8 : courbes contraintes tangentielles-temps(essai à sec).

On remarque une zone linéaire, de même pente pour toutes les valeurs de σ puis une évolution "en dents de scie" correspondant au glissement par saccade des deux blocs l'un sur l'autre. La contrainte tangentielle du premier pic est supérieure à celle des suivants, ce qui est conforme à la théorie donnée au paragraphe 2.1.

Une courbe (τ,σ) a été tracée (Figure 4.9) et un lissage linéaire montre que :

$$\tau = 0.19.\sigma$$

d'où $\mu_S = 0.19$

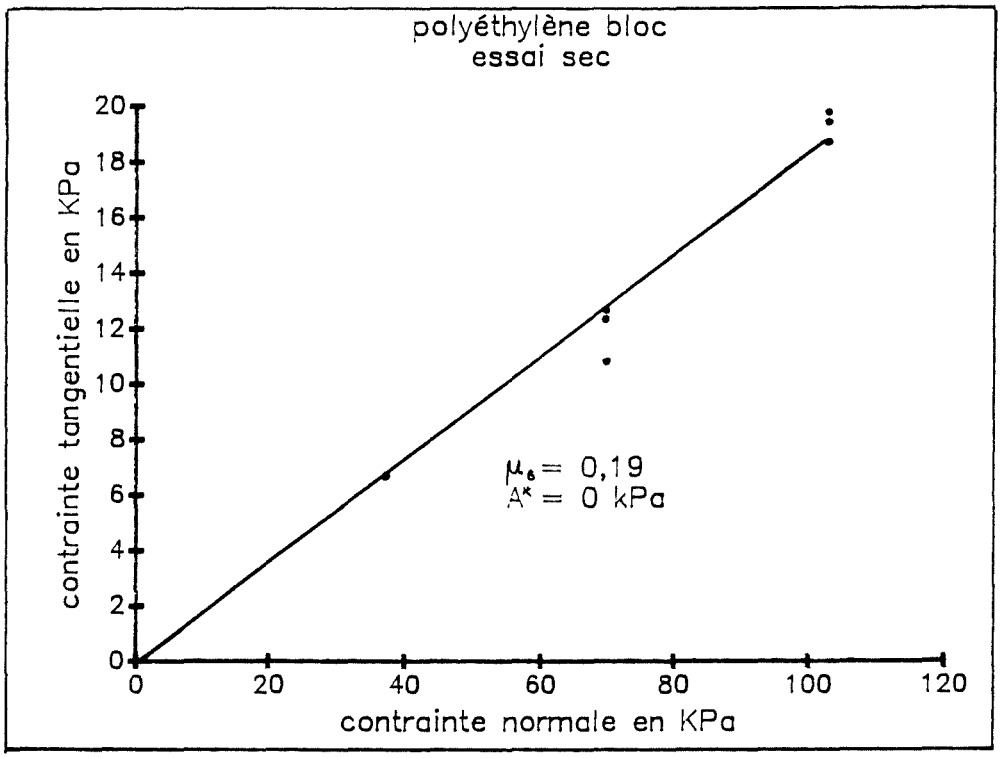


figure 4.9 : "droite de Coulomb".

2.1.1.2.Essai humide

Les résultats obtenus ont la même allure que précédemment (Figure 4.10 et 4.11). L'effort pour mobiliser le premier glissement à la même valeur que les suivants. Le lissage linéaire montre dans ce cas qu'il existe une contrainte minimale pour amorcer le glissement même si $\sigma = 0$. Nous la nommerons "adhérence apparente", notée A^*:

$\tau = 0.09\ \sigma + 2$ (en kPa)

$\mu_S = 0.09$

$A^* = 2$ kPa.

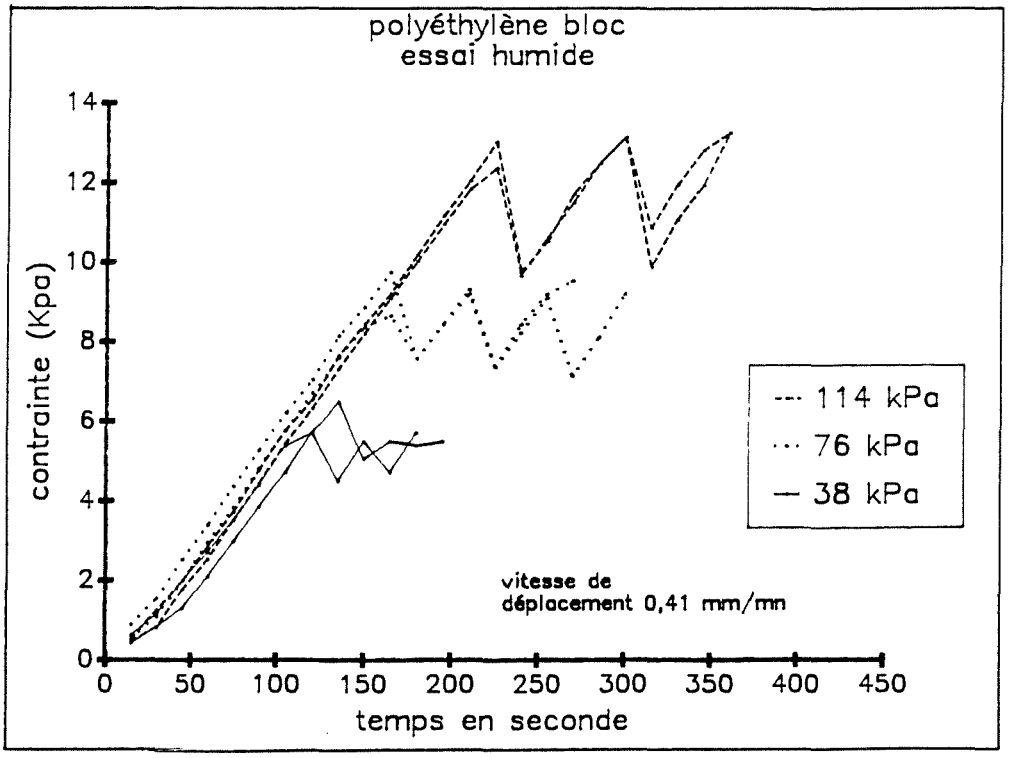


figure 4.10 : courbe contrainte temps (essai humide).

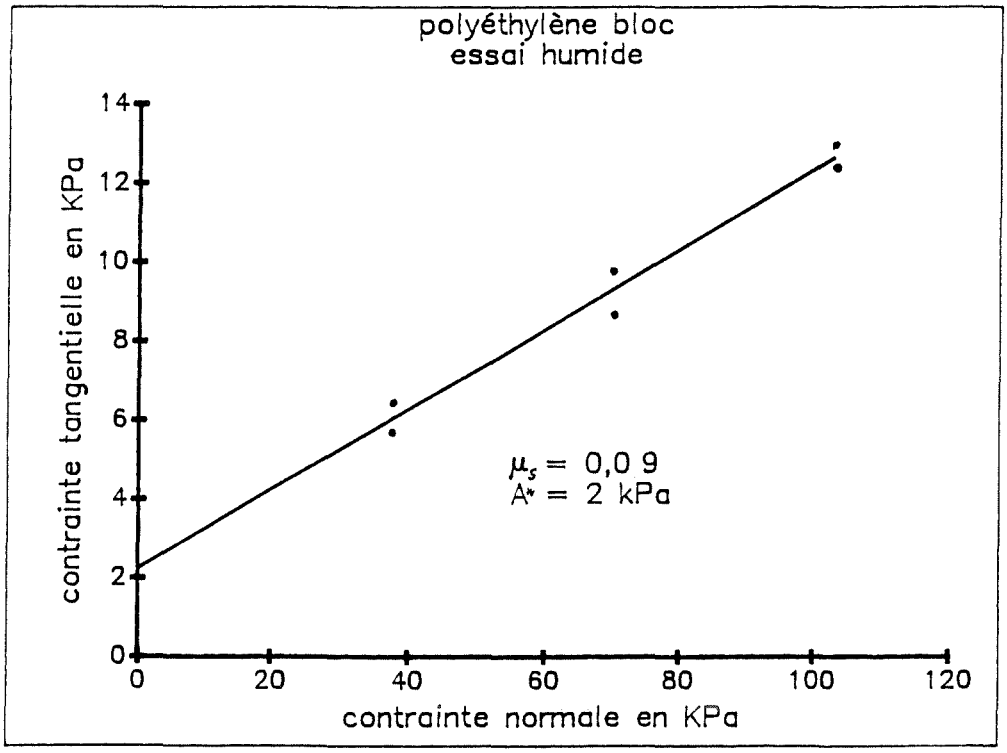


figure 4.11 : "droite de Coulomb".

On constate une forte diminution du coefficient de frottement. En fait, ce frottement est très dépendant de l'état de surface de matériau : l'eau joue le rôle d'un

lubrifiant en remplissant les interstices laissés lors de la rectification de la pièce. Elle entraîne une diminution de moitié du coefficient de frottement, le film d'eau ayant une faible résistance au cisaillement. La faible adhérence constatée provient de l'existence de forces moléculaires permettant à l'eau d'adhérer fortement au matériau (CASTAGNY 1982). A* correspond donc à la force nécessaire pour vaincre cette attraction moléculaire de l'eau.

Les frottements obtenus sur le bloc de polyéthylène sont plus faibles que ceux donnés par la littérature (tableau 4.2)

Polymère	Coefficient de frottement f
PEbd	0,25 à 0,30
PP	≈ 0,30
POM	0,32 à 0,34
PA 6-6	0,25 à 0,30
PA 11	≈ 0,30
TFE	≈ 0,30

tableau 4.2 : frottement de quelques plastiques (REYNES 1990).

2.1.2.Frottement sur feuilles de polyéthylène

2.1.2.1.Essai à sec

L'allure des courbes τ =f(d) (d étant le déplacement en cm) est différente de celle obtenue pour les blocs (figure 4.12). On ne constate pas de palier de glissement très marqué, mais seulement un infléchissement de la courbe.

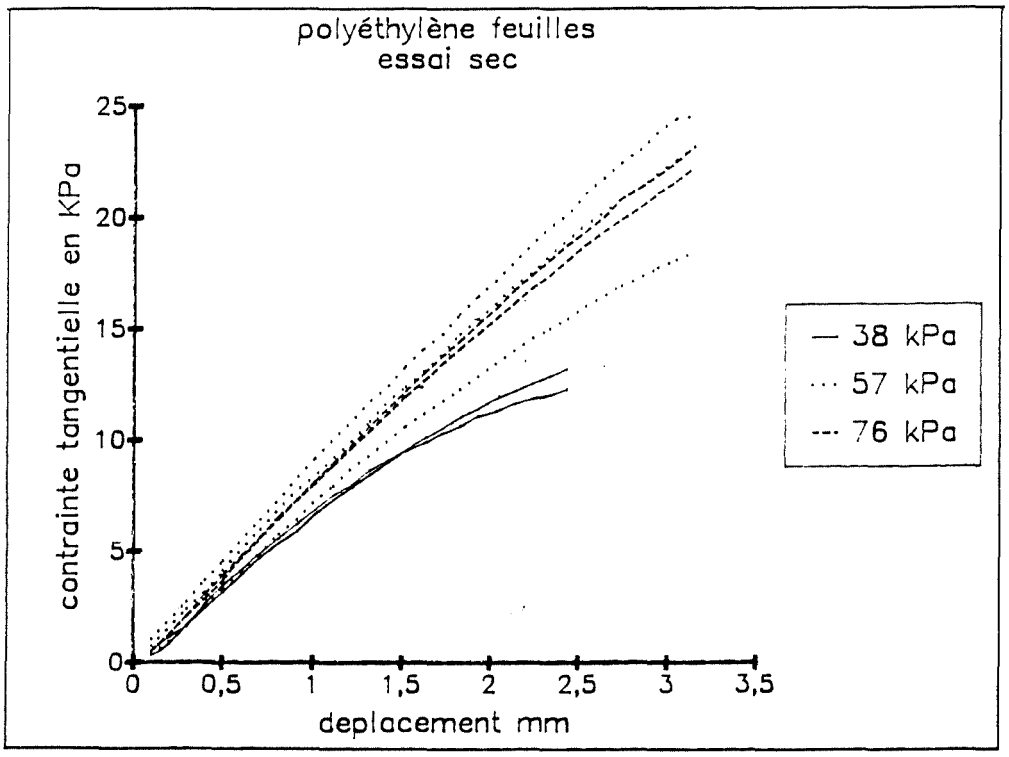


Figure 4.12 : courbes contraintes tangentielles-déplacement.

Le glissement vrai est plus difficile à mobiliser à cause de phénomènes parasites liés à l'étirement du film, et du fait que le bloc supérieur a tendance à chasser la colle et le film, lorsqu'il se déplace, entraînant parfois la formation de plis (figure 4.13)

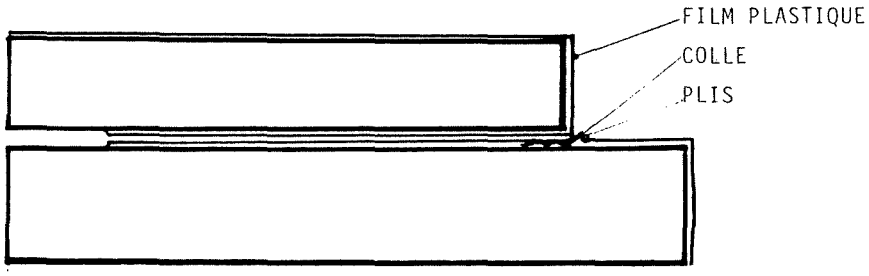


figure 4.13 : plissage de la feuille polyéthylène.

Un lissage linéaire montre que $\mu s = 0.4$ (Figure 4.14)

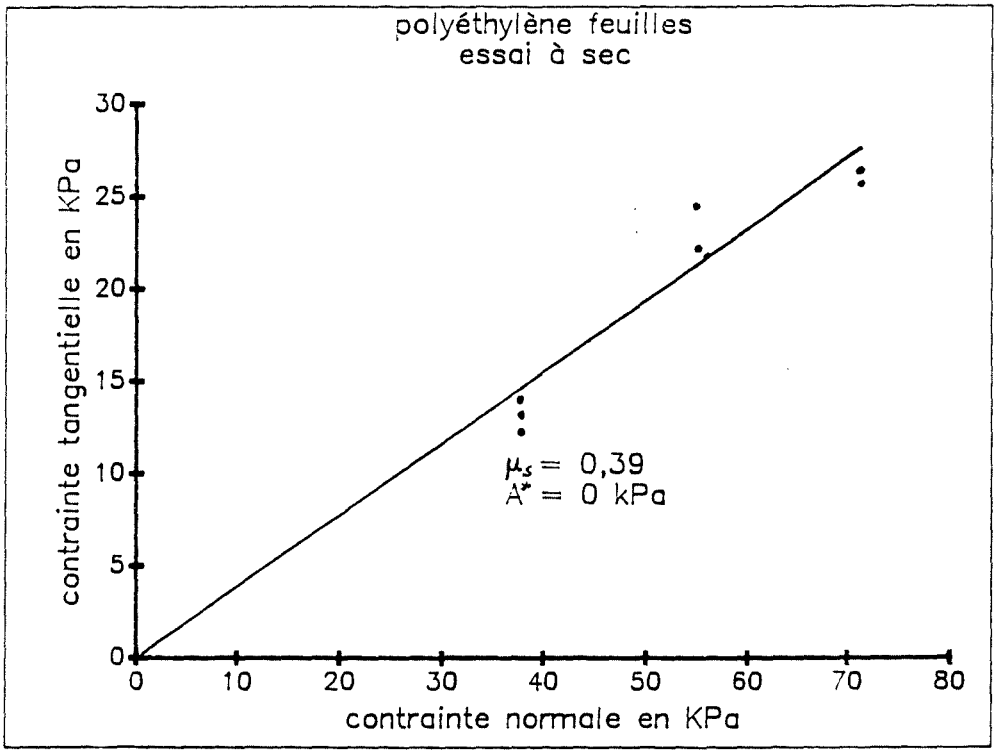


figure 4.14 : "droite de Coulomb".

2.1.2.2.Essai "humide"

Les courbes τ =f(d) (figure 4.15) sont beaucoup plus régulières et présentent un net palier de glissement.

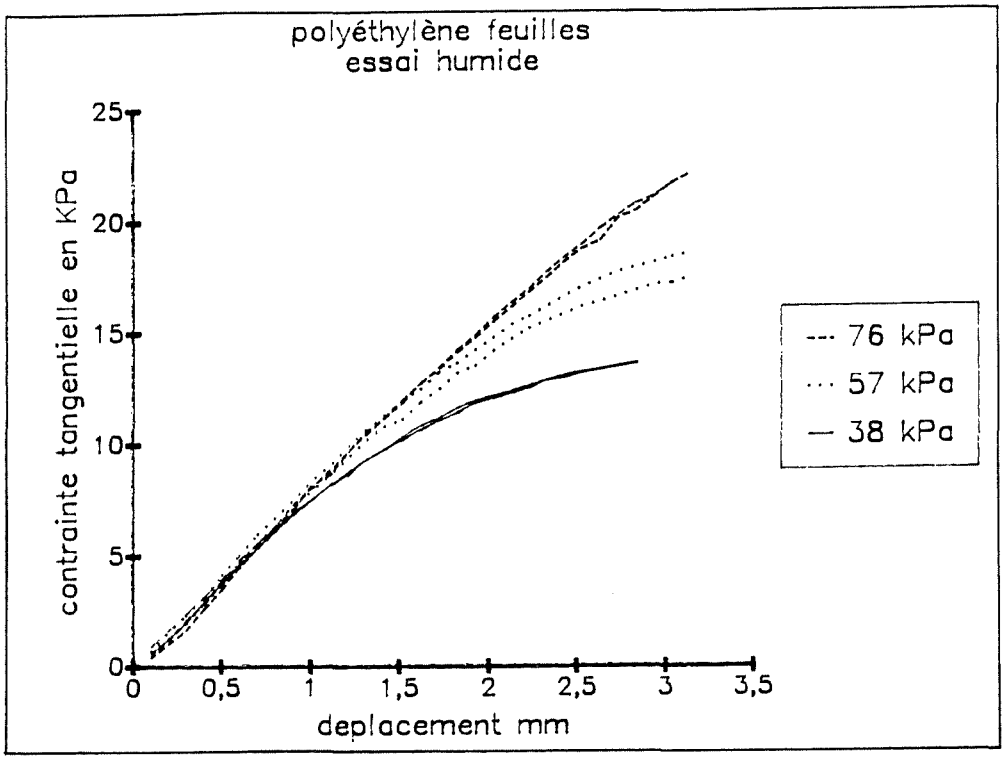


figure 4.15 : courbes contraintes tangentielles-déplacement.

Le lissage effectué dans le cas précédant montre le mouillage des surfaces de frottement, diminue le coefficient de frottement d'un facteur de 0.25 seulement (figure 4.16). Cette faible diminution est probablement liée à la modification de l'état de surface en cours d'essai (plis). La valeur de l'adhérence est également de 2 kPa, et confirme l'hypothèse de l'adhérence moléculaire de l'eau sur le matériau.

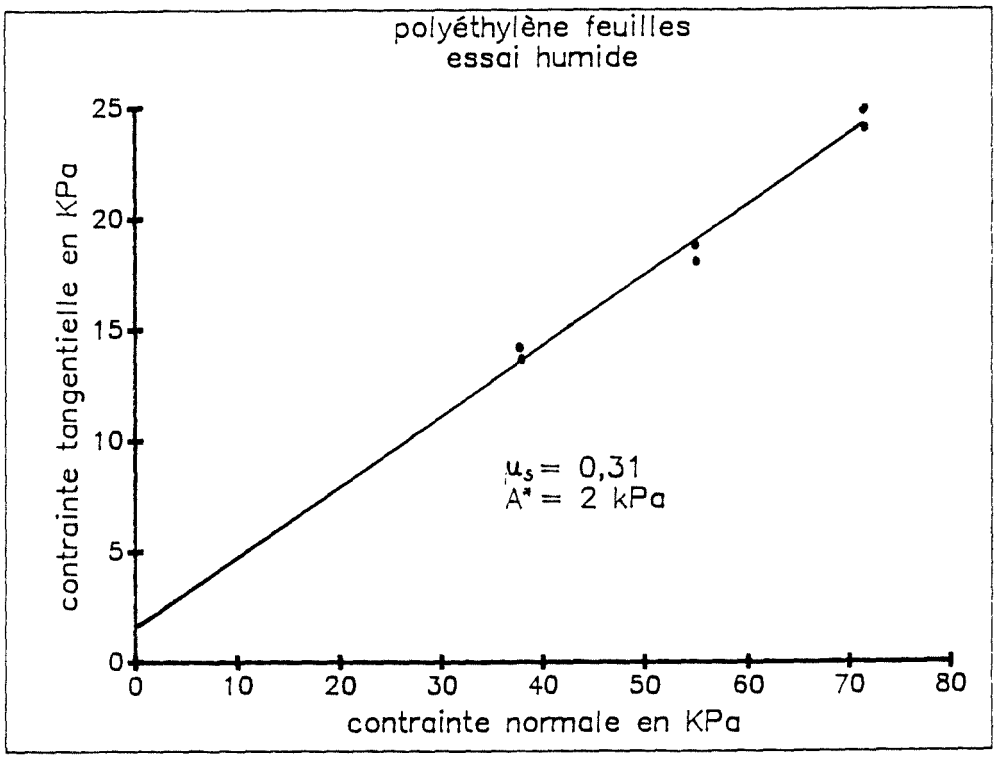


figure 4.16 : "droite de Coulomb".

Conclusion

Le frottement est beaucoup plus important dans le cas des feuilles de polyéthylène que dans celui des blocs. Sa détermination pour les feuilles est plus délicate, sur le plan technique, ce qui entraîne vraisemblablement une erreur sur son estimation.

On retiendra malgré tout que les valeurs de μs sont :

bloc	0,19 (essai à sec)	0,09 (essai humide).
feuille	0,4 (essai à sec)	0,31 (essai humide).

et que l'eau joue un rôle de lubrifiant du matériau. Ceci peut alors modifier les caractéristiques du bloc Plastbloc, en cas d'immersion.

2.2.Essai de frottement bloc sur bloc

2.2.1.Essais appareillage à deux surfaces

L'exploitation est ensuite faite suivant celle utilisée pour les essais de cisaillement du sol à la boîte de Casagrande. La valeur maximale de τ =f(d) (d est le déplacement du bloc) fournit la valeur maximale du couple (τ,σ) permettant de construire la courbe τ/σ =f(σ). La valeur limite de τ/σ est determinée par un lissage linéaire des couples (τ,σ).

2.2.1.1.Rappel de la méthode d'exploitation

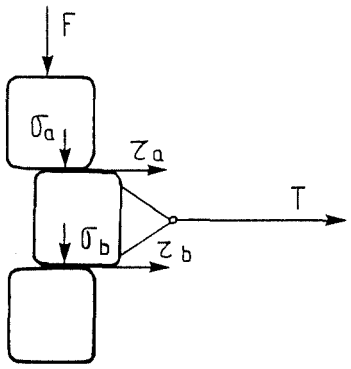


figure 4.17 .

Le poids du bloc supérieur est négligeable devant l'effort normal appliqué (0.02F < P < 0.05F).
On émet alors l'hypothèse suivante

$\sigma_a = \sigma_b$ donc $\tau_a = \tau_b$

L'effort T mesuré se répartit également sur les deux surfaces de frottement S_a et S_b.
Comme $S_a = S_b$, on a

$\tau_a = \tau_b = T/(S_a + S_b) = T/(2S)$

2.2.1.2.Résultats

Les courbes τ =f(d) sont données à la figure 4.18. Toutes les courbes présentent un palier, obtenu pour un déplacement relativement important ≈6 cm, correspondant à 22% de la longueur du bloc, et préjudiciable pour un ouvrage.
Les courbes ont une dispersion peu élevée compte tenu des conditions d'essai, excepté celles obtenues pour une contrainte σ =30.8 kPa et σ = 41.1 kPa (Figure 4.18).

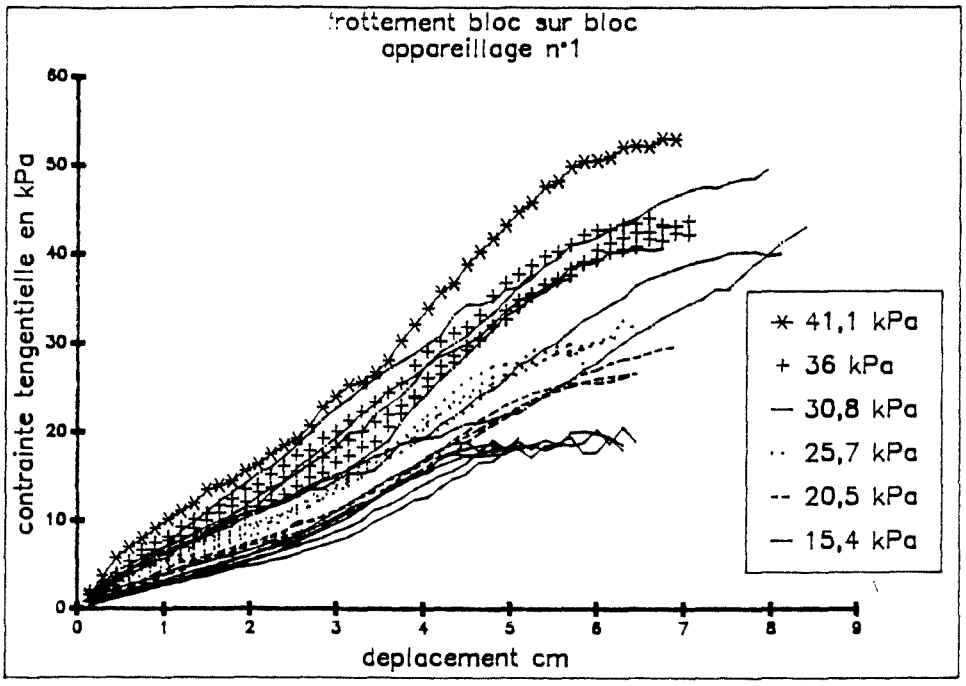


Figure 4.18 : relation contraintes tangentielles-déplacement .

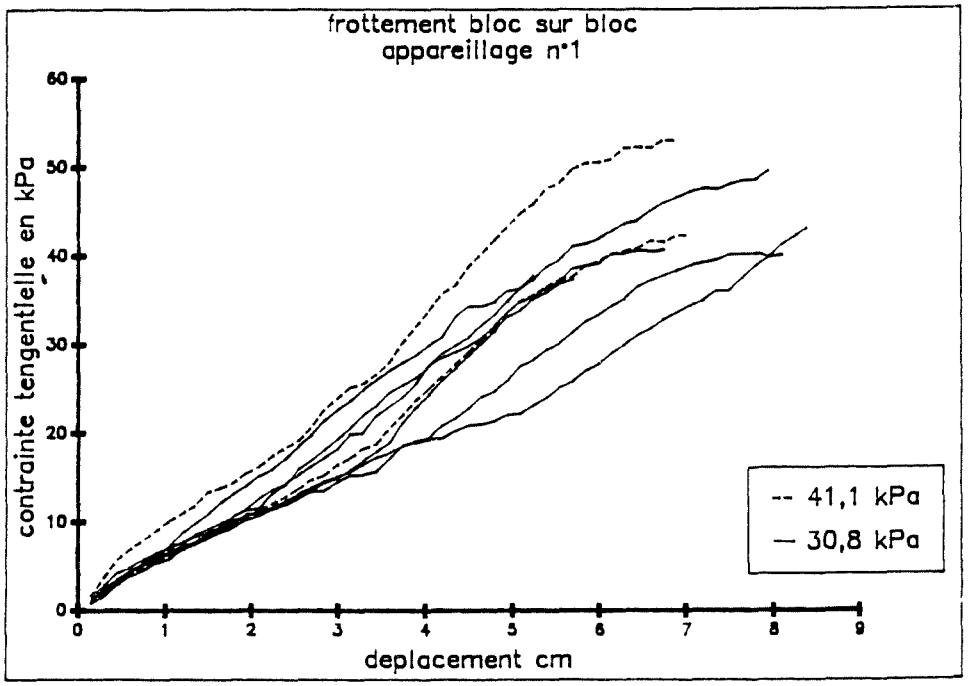


Figure 4.19 : dispersion des résultats pour σ = 41 et 30 kPa .

Malgré la répétition des essais, il est impossible de déterminer une valeur maximale moyenne. Sous l'action de σ =41 kPa les tassements observés sur la colonne

de trois blocs, sont tels que le réglage du bloc II est impossible. L'extraction ne se fait plus horizontalement. Les valeurs sont donc à prendre avec précautions.

Les valeurs de τ obtenues sont données dans le tableau 4.3.

σ en kPa	15.4	20,6	25,7	30.8	36	41,1
τ en Kpa	10	14.6	16.2	20.4	23.2	31.4
	11.5	16.2	17.3	22.3	24.1	29.1
	10.4	14.6	16.9	20.6	24.7	
	10.1		15.1	22.2		
	10.35					
	9.85					
τ moyen	10.37	15.13	16.375	21.375	24	30.25
ecart type	0.59	0.92	0.96	1.01	0.75	1.63

tableau 4.3 : valeurs de τmax pour les contraintes normales appliquées.

2.2.1.3.Analyse

La courbe d'évolution de τ/σ est donnée à la figure 4.20
L'évolution de $\tau/\sigma = f(\sigma)$ peut être assimilée à une droite d'équation constante $\mu_{f\,bb}^{*} = 0.68$, et parait donc indépendante de σ et la droite de Coulomb de l'essai passe près de l'origine.

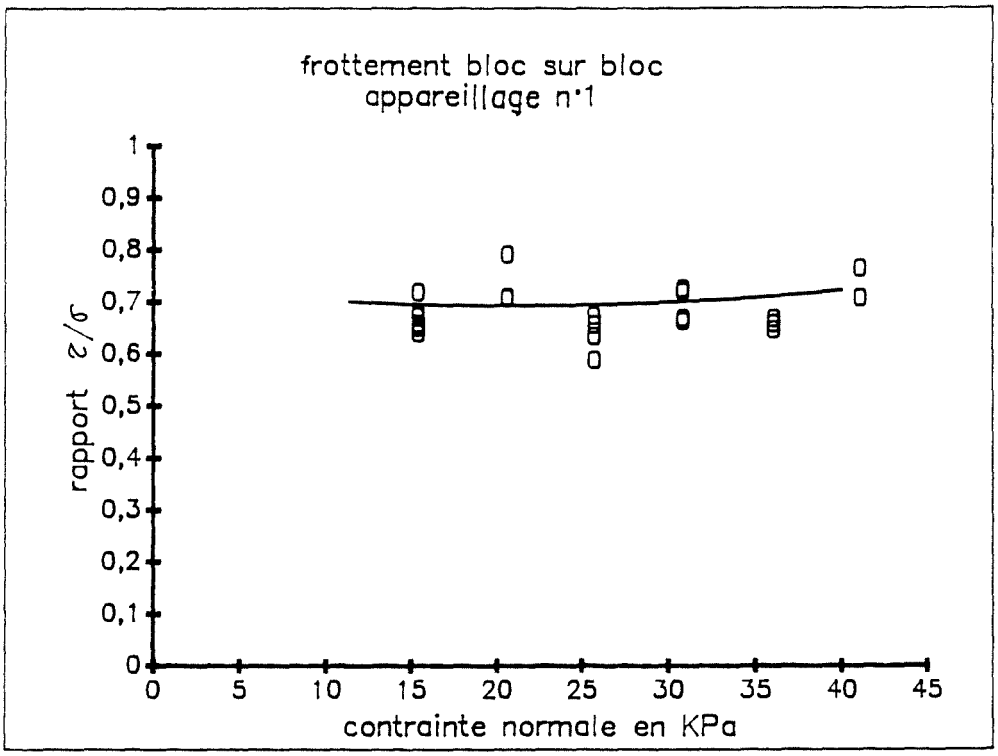


Figure 4.20 : rapport τ/σ en fonction de σ.

Le tracé des couples (τ,σ) pour les valeurs du tableau 4.3 est donné à la figure 4.21

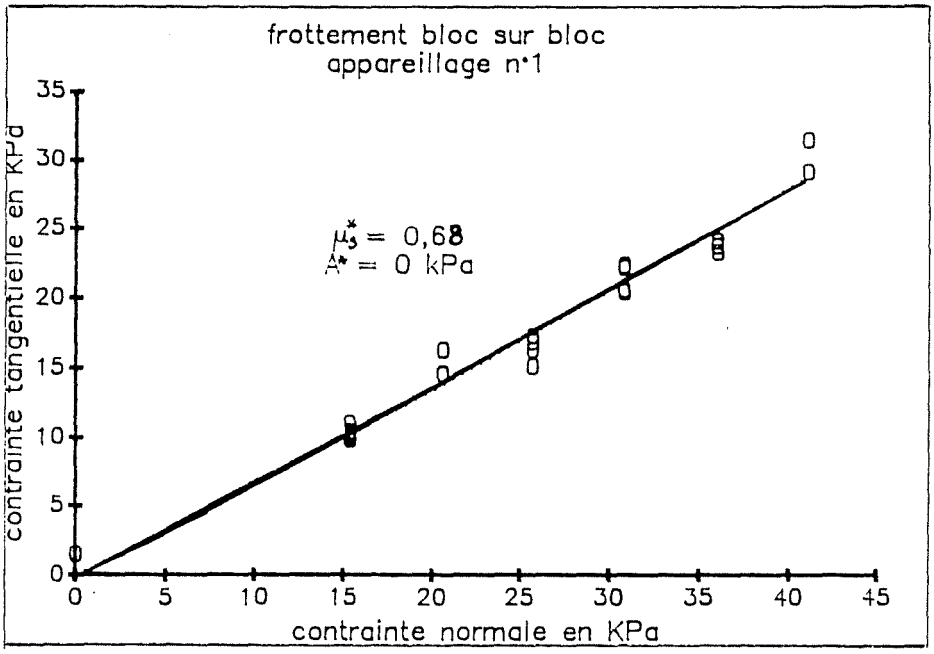


Figure 4.21 : "droite de Coulomb".

On obtient effectivement :

$\mu^*_S = 0.68$

$A^* = 0$

Ce qui correspond, par analogie avec la terminologie utilisée en mécanique des sols, à $\phi^* = 34°$

2.2.2.Essai appareillage à une surface

2.2.2.1.Résultats

Les essais sont exploités suivant la méthode utilisée pour les essais de cisaillement à la boîte de Casagrande.

Les courbes $\tau = f(d)$ sont données à la figure 4.22. Une courbe moyenne a été effectuée pour chaque contrainte donnée (Figure 4.23)

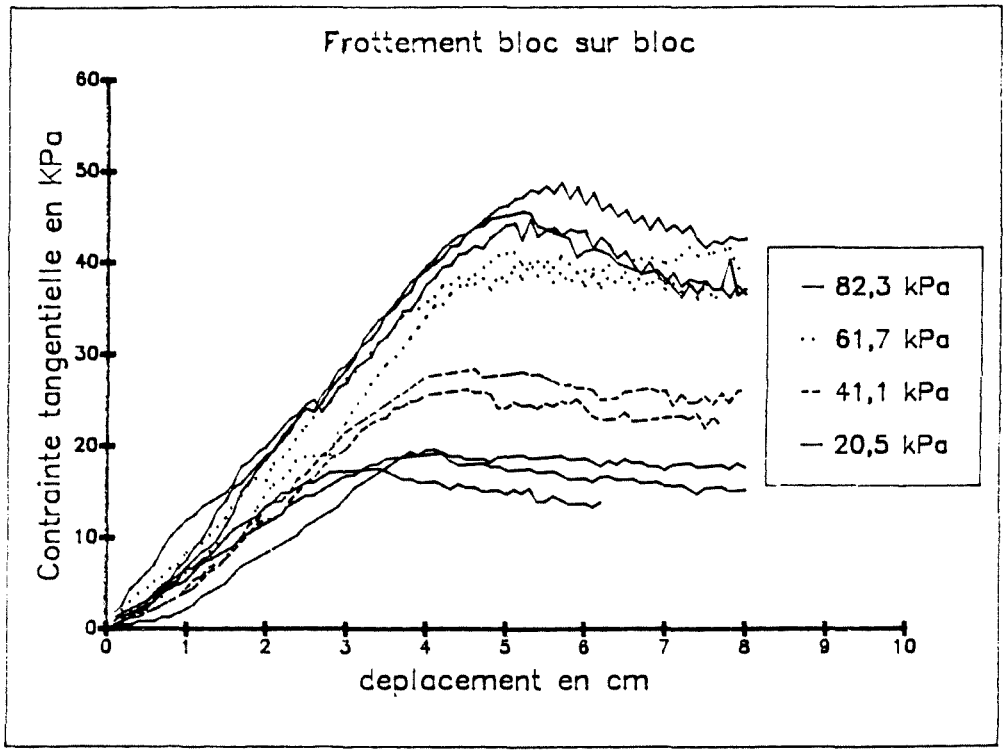


figure 4.22 : courbes contraintes tangentielles-déplacement .

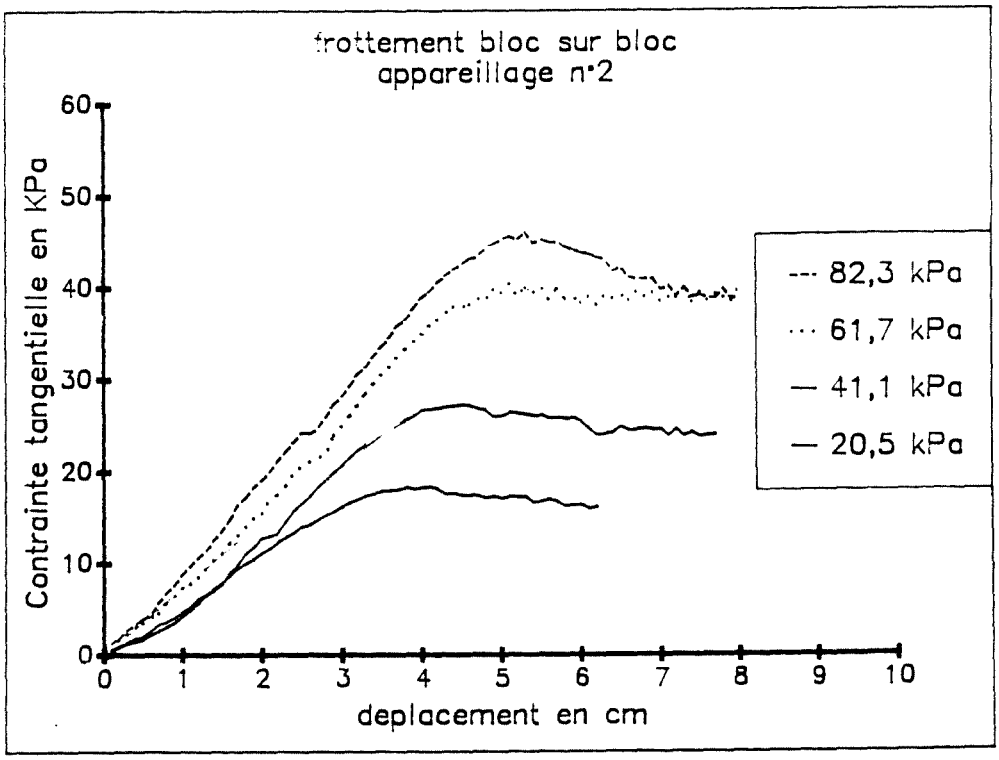


figure 4.23 : courbes moyennes des contraintes tangentielles.

Les contraintes τ maximales en fonction de la contrainte normale appliquée sont rassemblées dans le tableau 4.4 :

σ (kPa)	τ serie 1 (kPa)	τ serie 2 (kPa)	Moyenne
20,5	12,36 10,86 13,3 15,8 14,94	19,3 17,7 19,7	15.5
41,1	20,7 20,9	26,2 28,3	24
61,7	40,9 38,9	41,2 40	40.2
82,3	44,5 42,3 49,3	45,6 48,5 44	45.6

tableau 4.4.: Récapitulatif des τ_{max} (appareillage n°2).

On constate une certaine dispersion des résultats pour les contraintes faibles (σ =20.5 et σ =41 kPa) entre les deux séries d'essais. Il est en effet très difficile de maîtriser la vitesse de cisaillement contrôlée manuellement. D'autre part le maintien de la force F appliquée à une valeur constante entraîne un tassement important (2 à 3 cm) et donc une variation importante de la densité (Valeur initiale 0.3 jusqu'à $\approx$ 0.4 en fin d'essai).

On remarque également une diminution de la dispersion avec l'augmentation de σ .

2.2.2.2.Analyse

La courbe $\tau/\sigma = f(\sigma)$ est donnée à la figure 4.24 .

Le rapport τ/σ a une nette tendance à diminuer lorsque les contraintes normales augmentent, et semble tendre vers 0.5.

Sous l'effet de σ , l'irrégularité de la surface diminue : les aspérités de l'état de surface sont constituées de morceaux de plastiques pliés qui s'aplatissent lorsque σ augmente. La surface devient plus régulière, le coefficient de frottement diminue. Ceci explique également la plus forte dispersion observée aux faibles valeurs de σ , suivant la nature du plastique directement à la surface, la contrainte σ peut ne pas suffire à aplanir l'irrégularité.

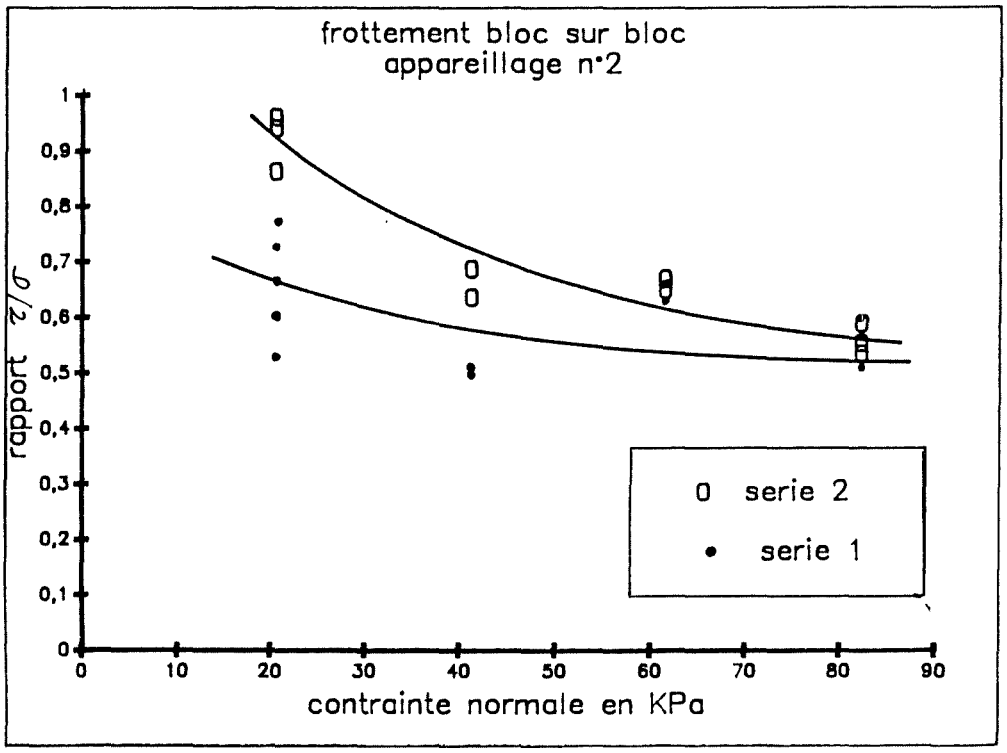


Figure 4.24 : rapport $\tau/\sigma = f(\sigma)$
série 1 : bloc inférieur entièrement Plastbloc
série 2 : bloc inférieur pour moitié Plastbloc, et pour moitié bois (diminution des tassements sous σ) .

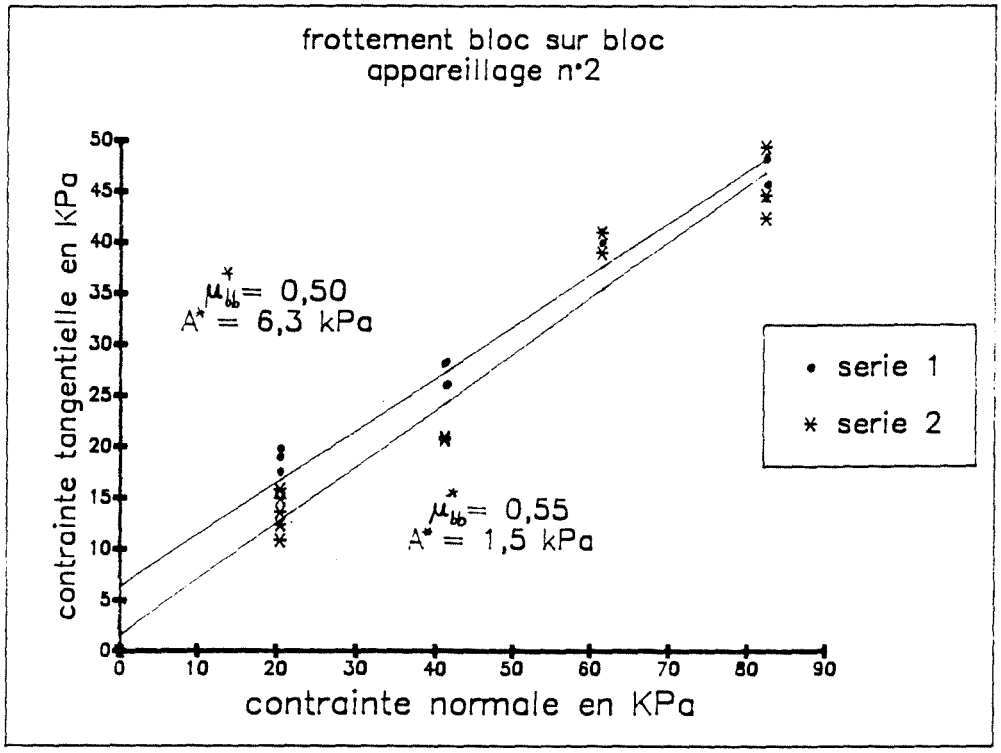


Figure 4.25:approximation par une droite de Coulomb ·

Afin de conserver une comparaison avec les sols, nous avons tracé la courbes $\tau = f(\sigma)$, figure 4.25. Les courbes obtenues montrent :

Série 1 : $= 0.5\ \sigma + 6.3$ d'où $\mu^*_{bb1} = 0.5$ et $A^* = 6.3$ kPa

Série 2 : $= 0.55\ \sigma + 1.5$ d'où $\mu^*_{bb2} = 0.55$ et $A^* = 1.5$ kPa

On pourra donc assimiler l'ordonnée à l'origine à la force nécessaire pour vaincre une aspérité donnée, sur un échantillon donné. Cette valeur est caractéristique de l'état de surface initial et des deux échantillons en présence.

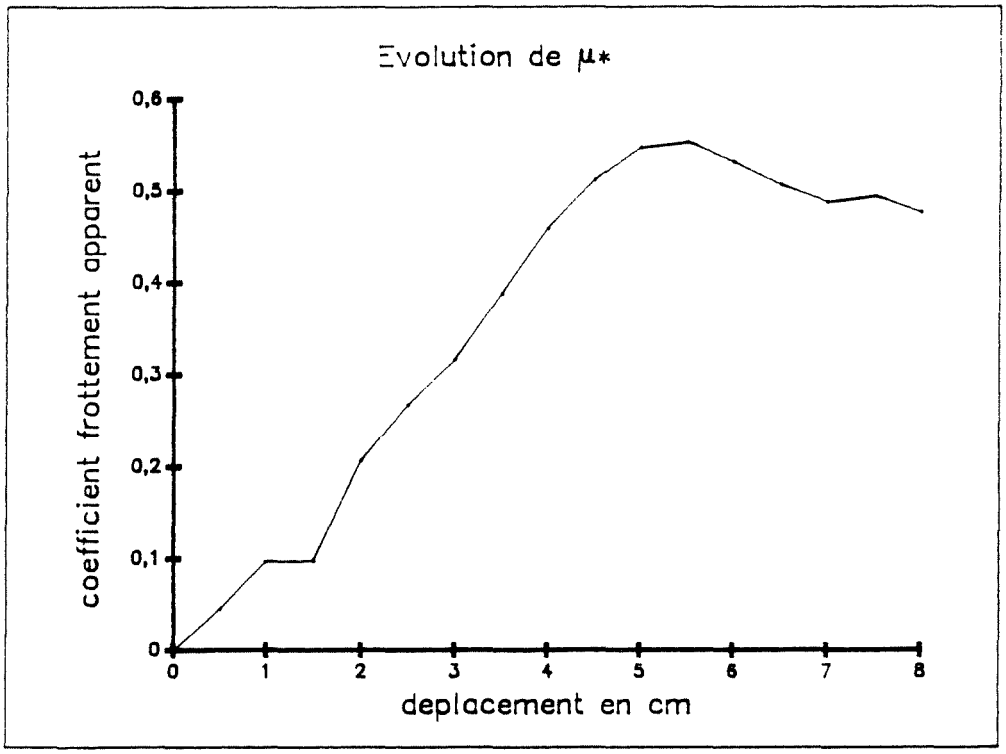


Figure 4.26: évolution du frottement apparent en fonction du déplacement.

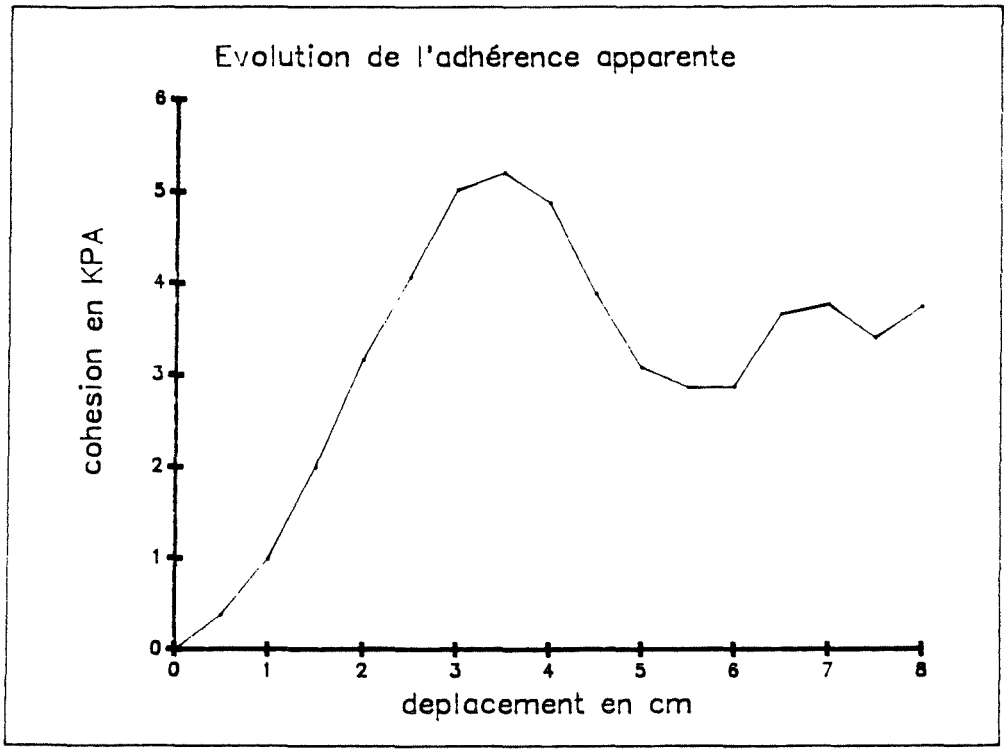


Figure 4.27 : évolution de l'adhérence apparente.

A partir des courbes moyennes T/S = f(d) obtenues sur l'appareillage n°2 (figure 4.23), les évolutions des coefficients de frottement apparent et de l'adhérence apparente en fonction de ce déplacement sont données aux figures 4.26 et 4.27

On constate que μ^*_{sb} croît pratiquement jusqu'à une valeur maximale pour d=5 cm, puis décroît.

L'adhérence apparente passe elle aussi par un maximum pour une valeur de d légèrement plus faible, puis diminue pour atteindre un palier. En fait, les aspérités se compriment ou s'étirent jusqu'à ce maximum, puis glisse l'une sur à l'autre, d'où une diminution de A^*.

2.2.2.3.Determination de $\mu^*_{bbmoyen}$

La courbe τ/σ obtenue à l'aide de tous les points est donnée à la figure 4.28. Elle se situe dans le fuseau des interprétations possibles, délimités par les lois des séries 1 et 2 effectuées avec l'appareillage 2.

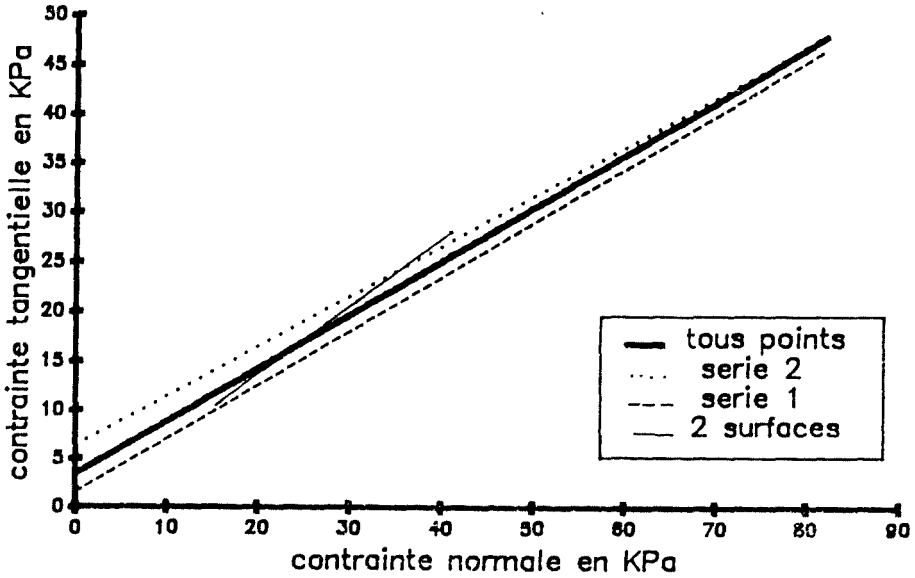


figure 4.28 : "droite de Coulomb" pour l'ensemble des essais .

On retiendra donc pour les essais de frottement bloc sur bloc, un coefficient de frottement moyen μ^*_{bbm} correspondant à un angle moyen ϕ^*_m.

$\mu*_m=0.55$ soit $\phi_m = 29°$

On admettra également que cette formule n'est pas valable pour les très faibles contraintes normales inférieures à 10 kPa. La valeur de l'angle de frottement apparent est alors beaucoup trop dépendante de l'état de surface initial et donc de la fabrication. On a vu que pour les faibles contraintes le coefficient de frottement τ/σ devient supérieur à 1.

Une comparaison avec les résultats obtenus sur le matériau polyéthylène pur (en bloc ou en feuille), montre que le coefficient de frottement est beaucoup plus élevé pour le Plastbloc, et confirme la dépendance du frottement vis à vis de l'état de surface. L'irrégularité de surface du bloc, est donc un atout quant à la stabilité par glissement différentiel entre les blocs. Il apparaît donc intéressant de ne pas les recouvrir de tissu comme cela a été fait pour les blocs du remblai expérimental.

2.3.Interface sol-bloc

L'évaluation du frottement entre le sol et le bloc s'impose pour déterminer la stabilité à la base de l'ouvrage. Dans le cadre de ces essais, deux blocs de même densité ont été utilisés. Compte tenu de l'excellente concordance des résultats, ils ont été exploités simultanément. Le sol utilisé est prélevé sur un des talus du remblai expérimental. Il est compacté dans le caisson inférieur manuellement.

Les caractéristiques sont les suivantes :

- grande proportion de limon argileux, et faible proportion de sable graveleux. L'analyse granulométrique montre qu'il s'agit d'un sol de classe A1 (limon peu plastique) (DALI-BRAHAM, 1989).
- la teneur en eau est de 12 %, et correspond à l'optimum Proctor .

2.3.1.Résultats

La courbe moyenne de T/S=f(d) est donnée à la figure 4.29, les résultats de τ pour chaque valeur de σ sont récapitulées dans le tableau 4.5 .

σ kPa	τ Bloc 1(kPa)	τ Bloc 2(kPa)	Moyenne	Ecart type
20,5	15,4 - 15 - 14	15 - 13,7	14,7	0,6
41,1	30,1 - 27,8 - 30	27,8 - 25,7	28.3	1,6
61,7	38,5 - 40,7 - 40,1	39,8 - 41 - 40,7	40,1	0,8
82,3	53,6 - 54 - 50,5	53,1 - 50,1 - 53,	52,5	1,5

tableau 4.5 : récapitulatif valeurs de τ_{max}, moyenne et écart type en kPa.

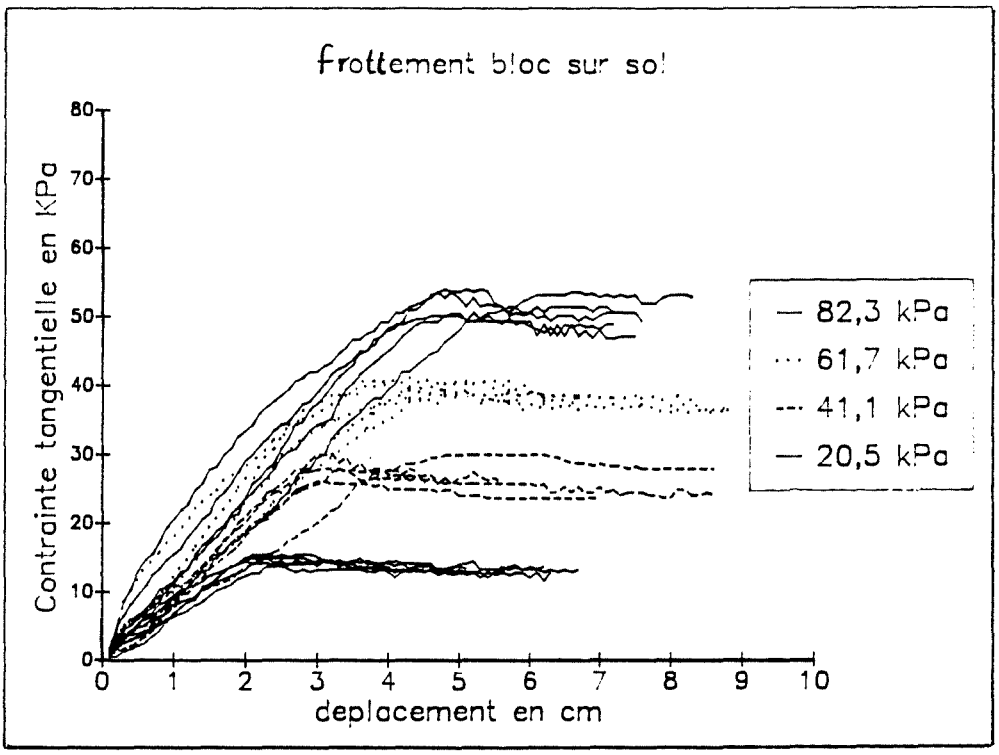


figure 4.29 : courbes contraintes tangentielles-déplacement (frottement bloc sur sol).

2.3.2.Analyse

Le rapport de τ/σ est donné à la figure 4.30 pour tous les points du tableau 4.5 précédent. On constate que τ/σ tend vers une valeur constante par une légère décroissance, en fonction de σ, moins marquée que celle du frottement à l'interface bloc-bloc.

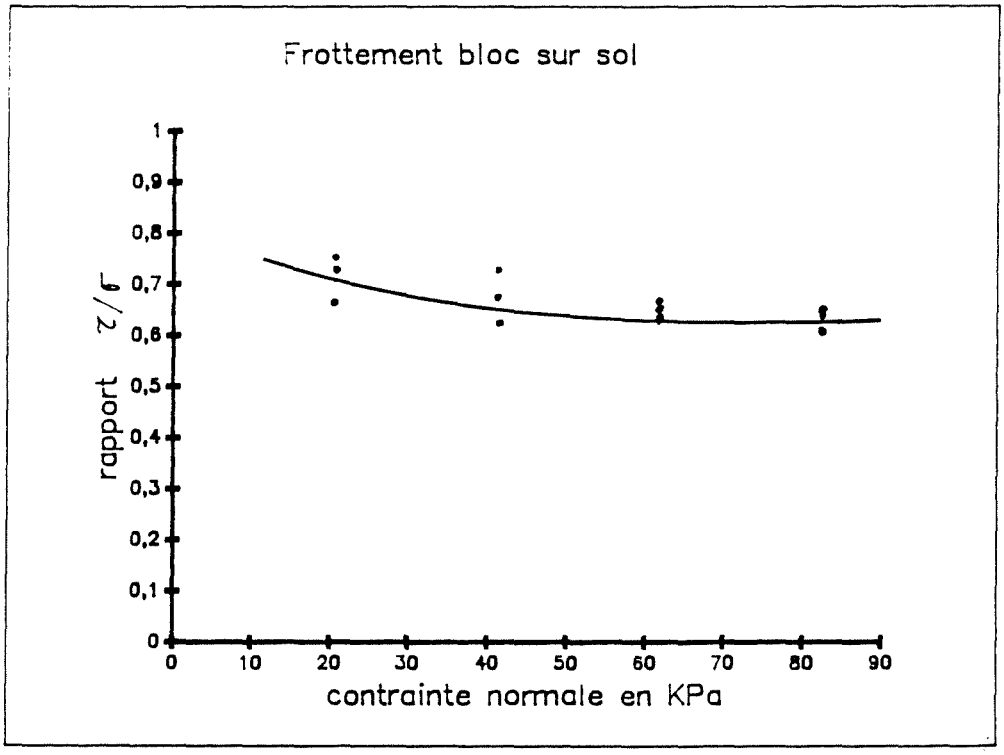


figure 4.30 : rapport $\tau/\sigma = f(\sigma)$ ·

Les couples (τ,σ) représentés à la figure 4.31 ont été lissés linéairement : On obtient la relation :

$\tau = 0.62\,\sigma + 2$ (coefficient de régression $=0.98$)

d'où $\mu*_{sb}=0.62$ ce qui correspond à un angle de frottement $\phi^*_{sb} = 31.8°$

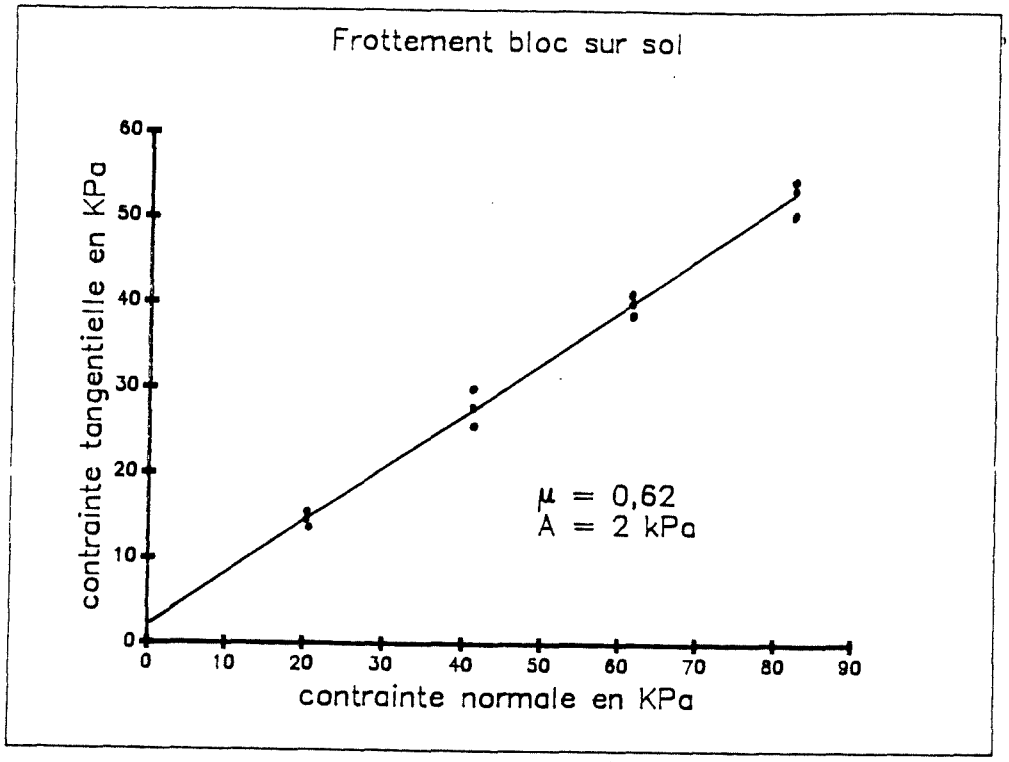


figure 4.31 : approximation par une "droite de Coulomb".

L'étude du frottement sur le sol dépend beaucoup des caractéristiques de celui-ci, c'est à dire des valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement interne. Les valeurs de $\mu*_{sb}$ ne sont valables que pour un sol donné, celui de l'essai ; Il serait nécessaire de déterminer une valeur pour tous les sols. A priori, la valeur de μ^*_{sb} est en fait borné par la valeur du frottement interne du sol :

Si la surface de frottement du bloc est très irrégulière, et le sol a un faible coefficient de frottement interne, les aspérités peuvent cisailler le sol (figure 4.32). La valeur de μ alors déterminée ne caractérise pas un frottement sur le sol, mais le cisaillement de celui-ci.

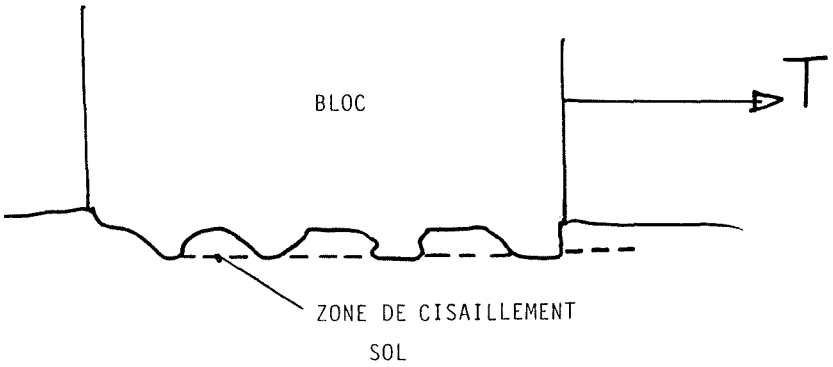


figure 4.32 : cisaillement du sol par les irrégularités du bloc.

3.ESSAIS DE CISAILLEMENT

L'étude du cisaillement interne d'un bloc est effectuée de manière identique aux essais de frottement précédents. On définit un coefficient de cisaillement noté μ_c^* déterminé par le rapport de τ_{max} sur σ . La valeur de τ_{max} est déterminée à partir de la courbes T/S = f (d) où T est l'effort de traction nécessaire au cisaillement, S l'aire de la surface de cisaillement, d le déplacement de la partie cisaillée. Dans le cas de Plastbloc, τ_{max} a été déterminée soit pour un déplacement donné d, soit par le maximum réel des courbes T/S=f(d).

On définit également le rapport τ/σ comme le coefficient de cisaillement apparent. On montre également que τ/σ tend vers la pente de la droite de Coulomb tracée pour les couples (σ, τ). On appellera donc μ^*_c cette valeur limite, déterminée par le lissage linéaire de la droite de Coulomb.
Par analogie, avec la terminologie de la mécanique des sols, on donne ϕ_c^* angle de cisaillement apparent du matériau, tel que :

$$\phi_c* = \arctan(\mu_c^*).$$

et une cohésion apparente C^*, ordonnée à l'origine.

3.2.Essais avec l'appareillage n°1

3.2.1.Résultats

Les courbes T/S = f(d) sont données à la figure 4.33 .

Si l'on distingue bien les courbes correspondant à σ = 82,3 kPa, celles obtenues pour les valeurs σ = 41 kPa et σ = 61,5 kPa, ne sont pas ordonnées. Il est impossible de distinguer un faisceau de courbes correspondant à chacune des deux contraintes normales. Le tracé des courbes moyennes sur chaque contrainte montre effectivement que les contraintes normales 41 kPa et 61,7 kPa sont parfaitement confondues. (figure 4.34).

Ceci est également vérifiable sur les valeurs de τ_{max} données au tableau 4.6.

σ kPa	τ app. n°1(kPa)	moyenne	ecart type
20,5	23.25 18	20.6	2.6
30.8	29.2	29.2	
41,1	31.5 40.5 49.5 30	37.8	7.8
61,7	40.8 38.2 34.6 28.7 42.2	36.9	4.8
82,3	78 76.5 84	79.5	3.2

tableau 4.6 .

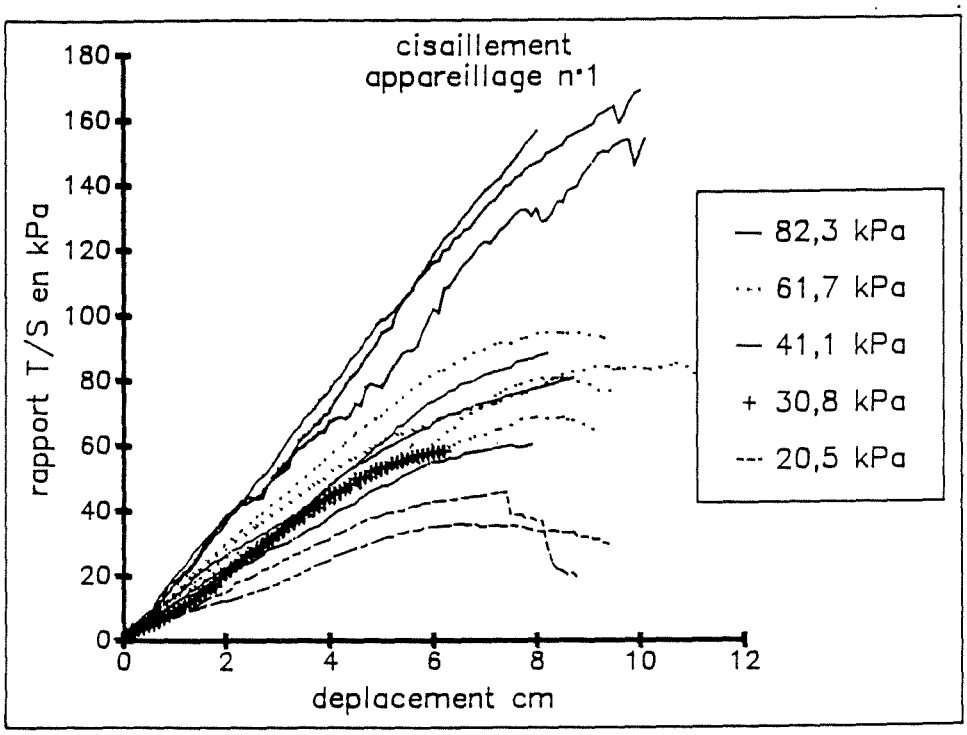


figure 4.33 : relation $\tau/\sigma = f(d)$.

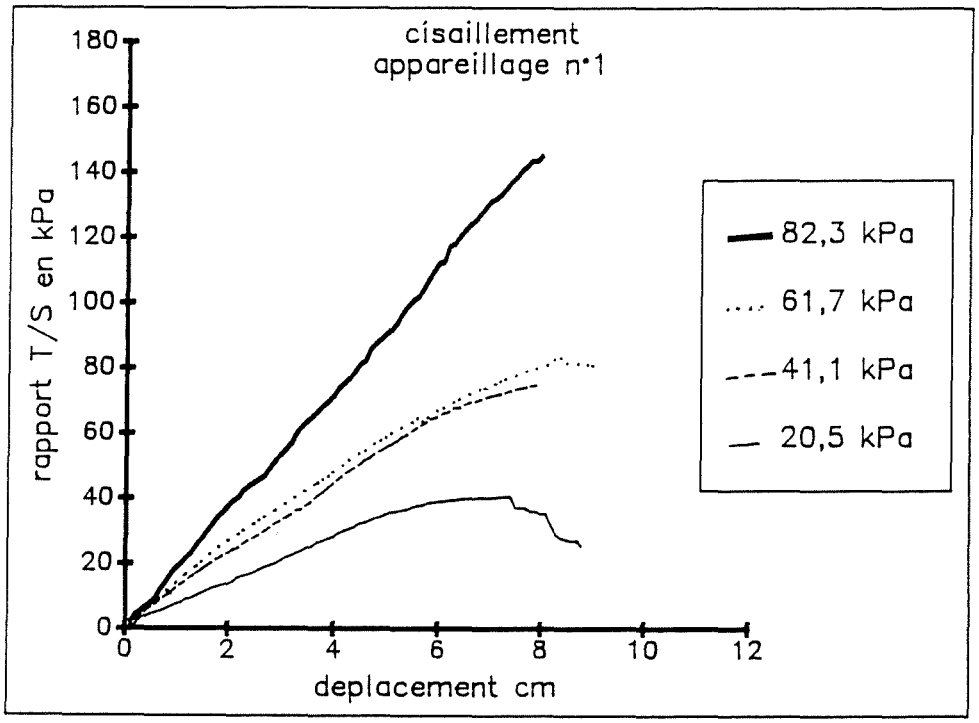


figure 4.34 : mise en évidence de la dispersion des mesures.

La dispersion des valeurs est très importante et peut être liée aux imperfections de l'appareillage déjà mentionnée auparavant.

Lorsque l'on maintient la contrainte normale, les deux blocs se tassent, modifiant la surface de cisaillement initialement amorcée. En effet les tassements observés peuvent atteindre 2 à 3 cm.

La rupture est perturbée également par la forte compressibilité latérale du matériau. Des zones de compression localisées près des plaques de butée entraînent une répartition non uniforme de la contrainte normale, et sans doute de l'effort tangentiel T.

On n'obtient donc jamais de maximum marqué sur la courbe T/S = f(d) et l'essai est stoppé lorsque une valeur de d suffisamment grande est atteinte. Cette valeur est de l'ordre de 8 à 10 cm et correspond à une déformation à la rupture de 30 % environ.

D'autre part, le déplacement est mesuré à l'arrière de la surface de cisaillement et il englobe la déformation de compression latérale de l'échantillon, et est donc majoré par rapport au déplacement réel.

Ces divers problèmes existaient lors des essais de frottement, mais n'ont pas été aussi marqués.

3.1.2.Analyse

Le rapport τ/σ est donné à la figure 4.35. Il présente une décroissance en fonction de σ . On remarque également que la dispersion des valeurs était déjà importante, même pour un déplacement plus faible (5 cm).

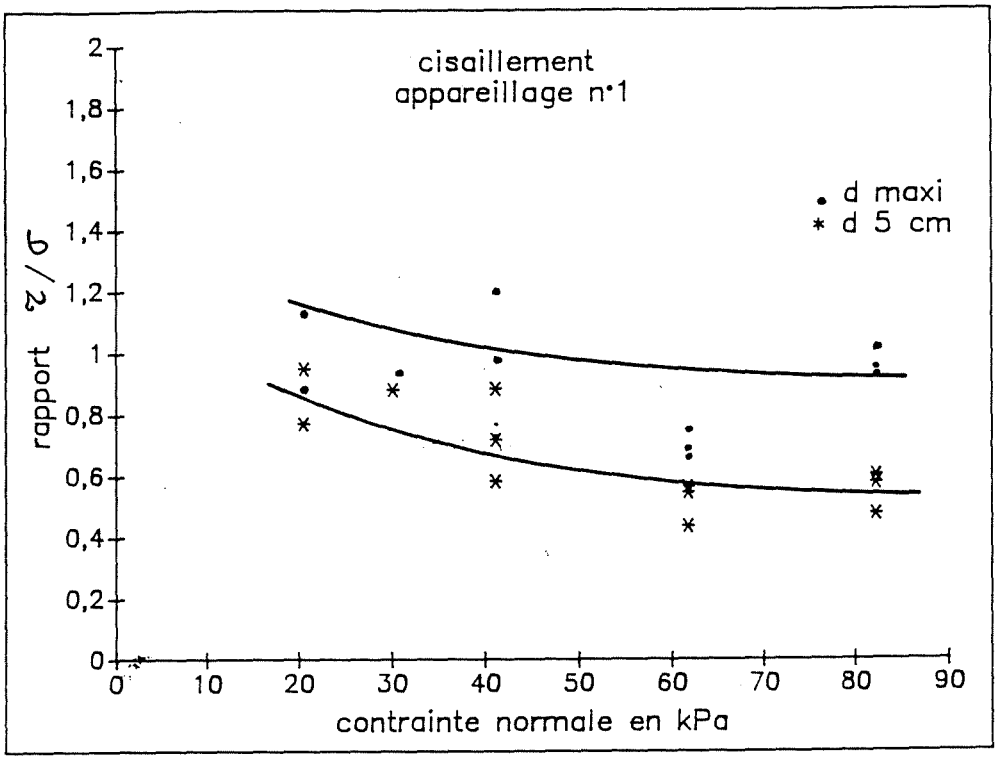


figure 4.35 : rapport $\tau/\sigma = f(\sigma)$.

La valeur de μ_c^* pour les grandes contraintes normales est de l'ordre de 0,88. On peut donc considérer un angle de cisaillement apparent de 42°. Le tracé de la droite de Coulomb montre une cohésion apparente de l'ordre de $C^* = 5$ kPa

3.2.Essais à l'appareillage n°2

3.2.1.Résultats

Les valeurs de T/S pour les différentes contraintes normales sont représentées à la figure 4.36. Un essai à $\sigma = 0$ a été effectué afin d'obtenir plus de précision concernant la valeur de la cohésion apparente.

On constate que même pour des déplacements élevés de l'ordre de 8 cm, aucun palier n'apparaît. Les courbes sont également similaires à celles que l'on obtient en cisaillement des matériaux alvéolaires (figure 2.20 chapitre 2).

Ceci nous indique également que les paliers obtenus sur l'appareillage n°1 sont sans doute dus à des phénomènes parasites liés à la déformation de l'échantillon.

3.2.2.Analyse

La courbe de τ/σ est effectuée pour un déplacement de 8 cm. On admettra que la déformation correspondante est suffisamment grande, et que le rapport $\mu_c^* = \tau/\sigma$ à 10 cm est une approximation par défaut du coefficient de cisaillement. La courbe est donnée figure 4.36. On observe une décroissance et une faible dispersion des valeurs, ce que l'on peut également voir au tableau 4.7

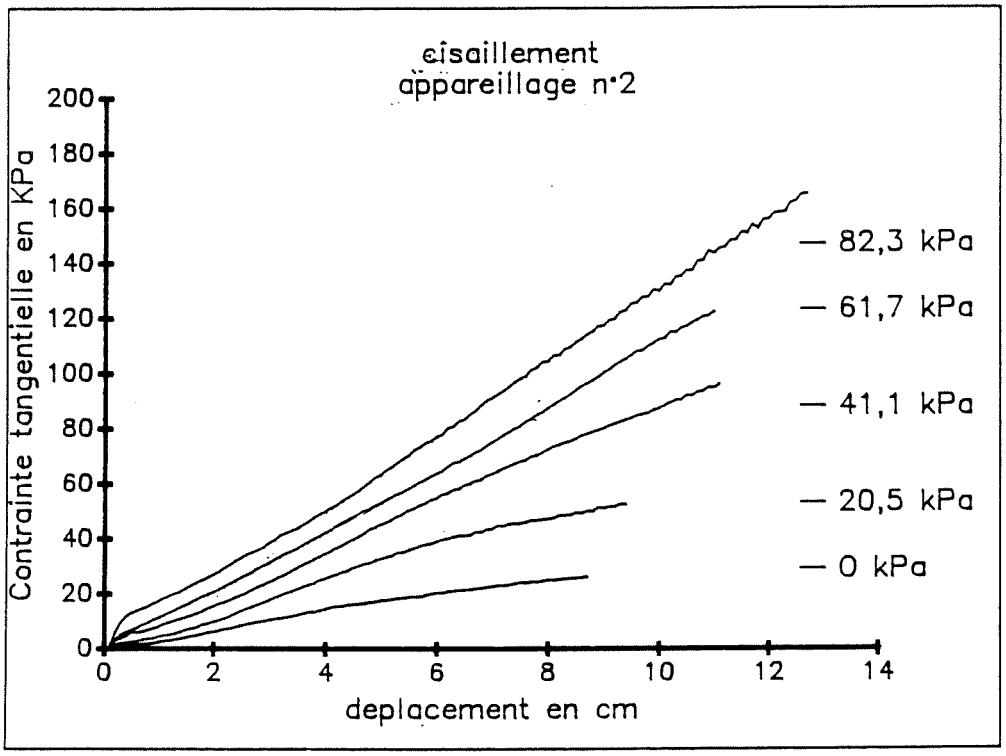


figure 4.36 : courbes moyennes $\tau = f(d)$.

σ kPa	τ app n°1 kPa	moyenne	ecart type
0.37	19.2 31 31	27	5.5
20.5	40.8 50.5 49.3 49.	47.5	3.8
41.1	74.9 68.2 77.3 73.7 68.8	72.5	3.5
61.7	90.7 95.6 79.1 86	87.8	6
82,3	111.4 94.4 107.8	100.4	7.2

tableau 4.7: valeurs de τ_{max}, moyenne et écart-type en kPa, pour 10 cm de déplacement.

A partir des courbes T/S, nous avons tracé les courbes moyennes pour chaque contrainte (figure 4.37) et déterminé la valeur du coefficient de cisaillement apparent correspondant à la valeur limite du rapport τ/σ vers les grandes contraintes (figure 4.38) pour des déplacements d donnés (tous les 0,5 cm).

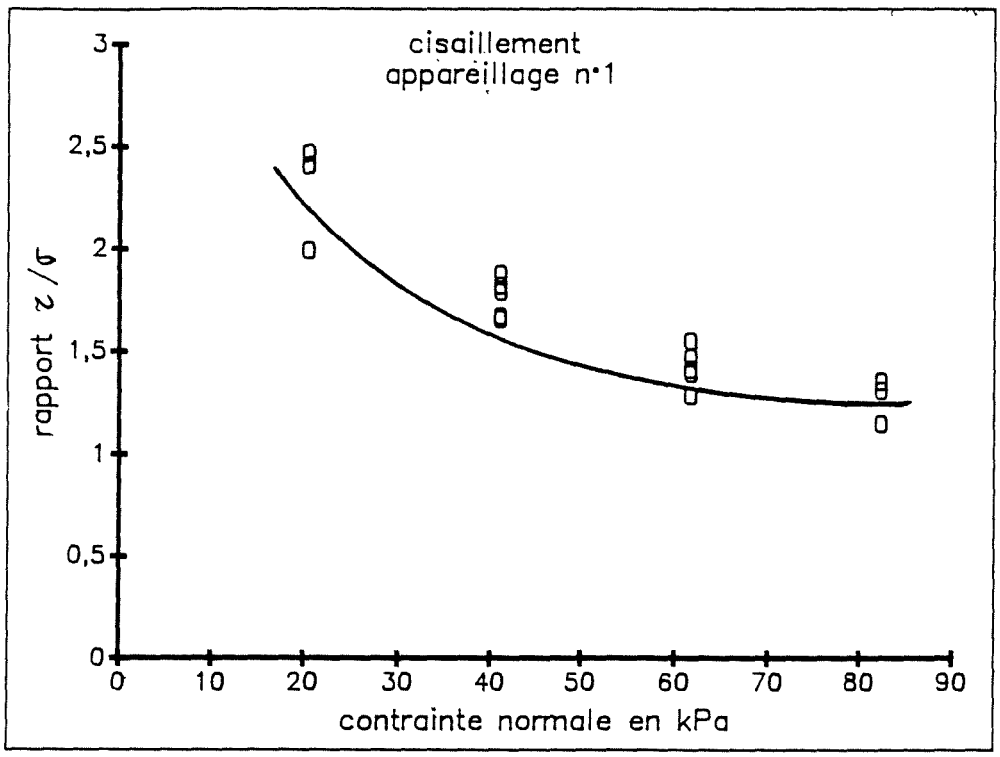


figure 4.37 : rapport $\tau/\sigma = f(\sigma)$ pour d = 10 cm.

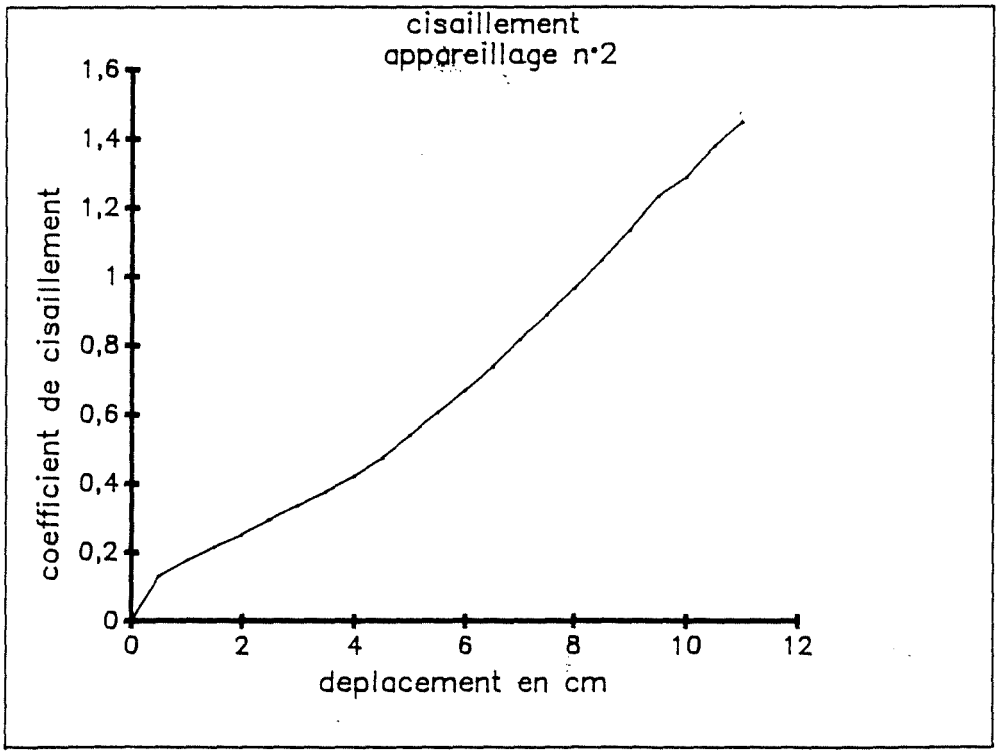


figure 4.38 : évolution du cisaillement apparent en fonction du déplacement.

On constate que μ_c^* ne présente jamais de maxima dans le domaine de déplacement étudié. La rupture réelle du matériau n'est pas atteinte. En effet le matériau est constitué de lanières de plastique qui sont entremêlées et très longues. La rupture est donc difficile, car les lanières s'étirent et glissent les unes par rapport aux autres.

Le coefficient de cisaillement apparent obtenu pour 10 cm tend vers 0,95. La droite de coulomb tracée avec cette valeur présente une cohésion apparente de 29 kPa (figure 4.39). L'angle de cisaillement apparent est donc de l'ordre de 44 °.

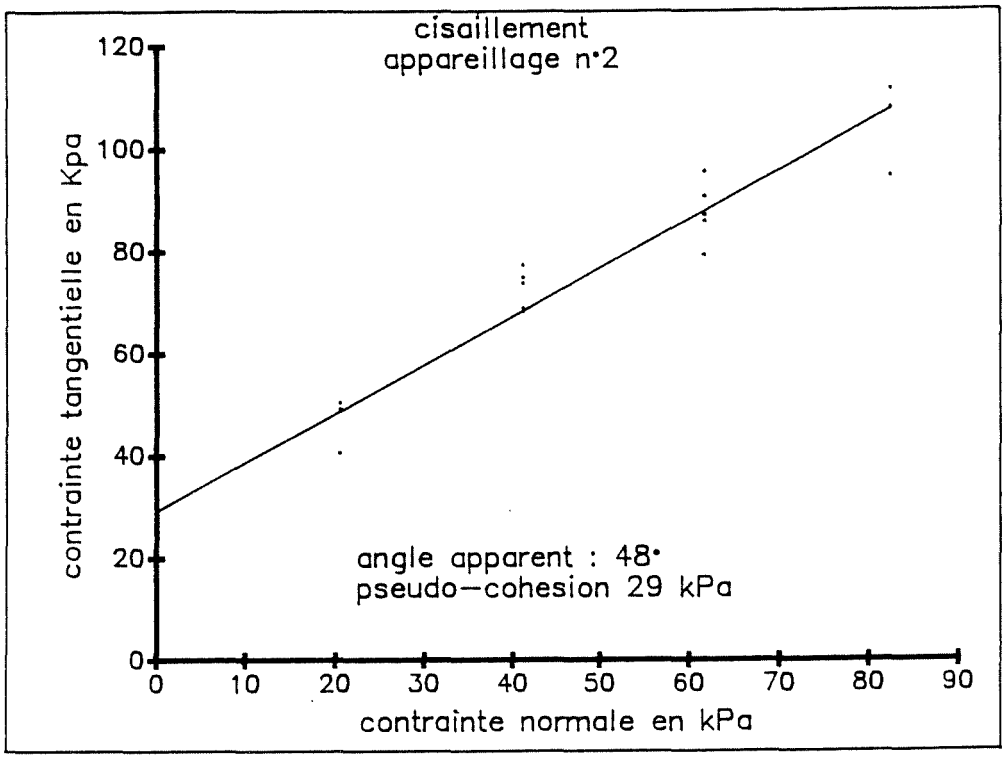


figure 4.39 : approximation par une "droite de Coulomb".

Les essais de cisaillement ont montré que l'appareillage peut modifier les résultats lorsque le matériau est très compressible :

avec l'appareillage 1 : $\mu^*_c = 0.88$
avec l'appareillage 2 : $\mu^*_c = 0.95$

Le deuxième appareillage nous a donné satisfaction, mais la valeur du coefficient de cisaillement apparent obtenue n'est pas celle de la rupture. Néanmoins celle-ci est déjà très grande et permet de considérer que, au sein d'un massif Plastbloc, le cisaillement d'un bloc a peu de chance d'être mobilisé.

4.STABILITE DE L'OUVRAGE AU GLISSEMENT.

Les différents essais de frottements effectués avaient pour but de déterminer les risques les plus probables de rupture. Les résultats de μ^* sont donc tous rassemblés à la figure 4.40.

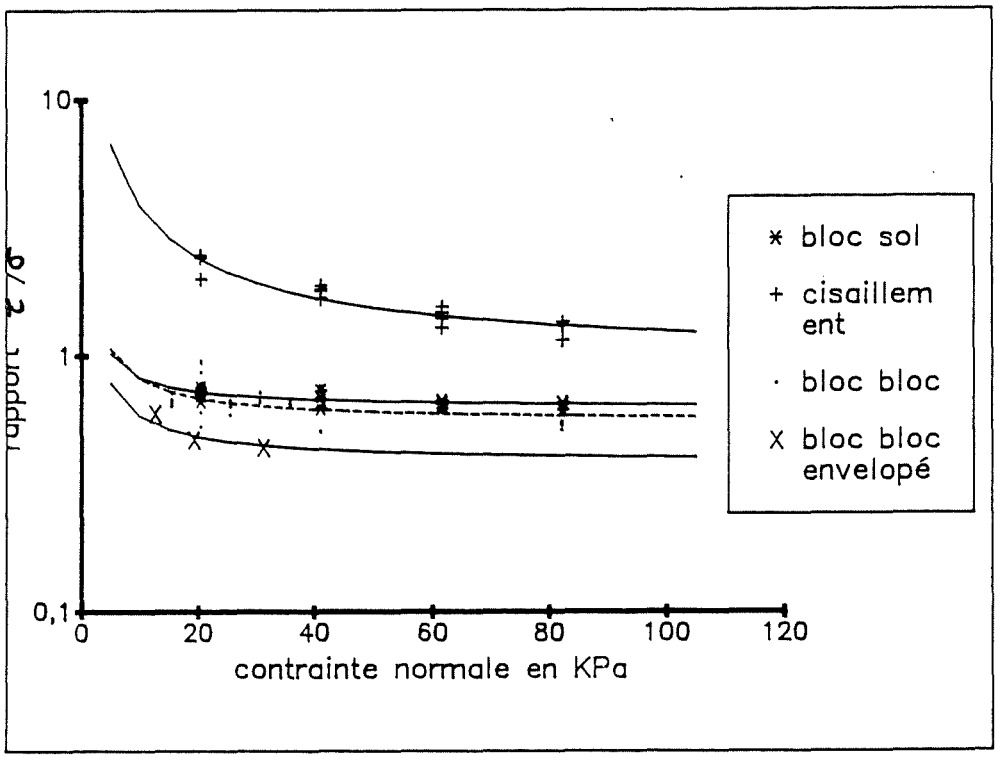


figure 4.40 : comparaison des frottements et cisaillement en présence .

On constate que les résultats de cisaillement sont nettement détachés des autres. Comme nous l'avons déjà dit, cette forme de rupture est improbable puisque μ_c^* est grand et la contrainte tangentielle, due à la poussée des terres sur le remblai, nécessaire pour l'obtenir aura déjà entraîné :

- soit un glissement des blocs sur le sol.
- soit un glissement d'une couche de blocs sur une autre.

Le glissement bloc sur bloc est préférentiel puisque la courbe de μ_{bb}^* est située sous celle de μ_{bs}^* .

Sous l'action de la poussée des terres, la rupture la plus probable du remblai est donc :

- Le glissement du remblai sur le sol support (figure 4.41)
- Le glissement d'une partie supérieure du remblai sur une couche inférieure de blocs. (figure 4.42)

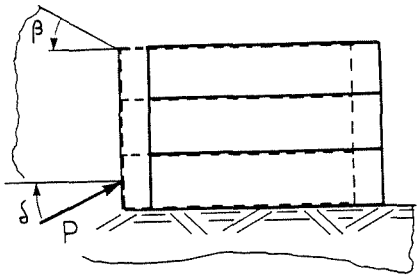


figure 4.41 :
glissement d'ensemble.

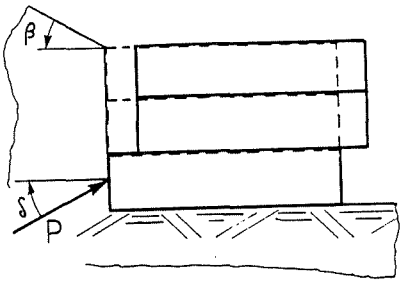


figure 4.42 :
glissement de blocs.

Ce sont vis à vis de ces deux phénomènes que nous allons essayer de proposer un prédimensionnement. Pour cela nous nous baserons sur les méthodes de vérifications de stabilité externe au glissement (RECOMMANDATIONS Comité Français des Géotextiles et Géomembrannes 1990).

4.1.Vérification du glissement bloc sur sol

La poussée des terres (et donc l'action tangentielle qui entraîne le glissement) n'est fonction que des caractéristiques du sol et de la profondeur de l'interface bloc sol. Pour un remblai donné, elle est donc constante et parfaitement définie.

La vérification doit se faire dans le cas le plus défavorable. Considérons le cas de glissement de la figure 4.43 :

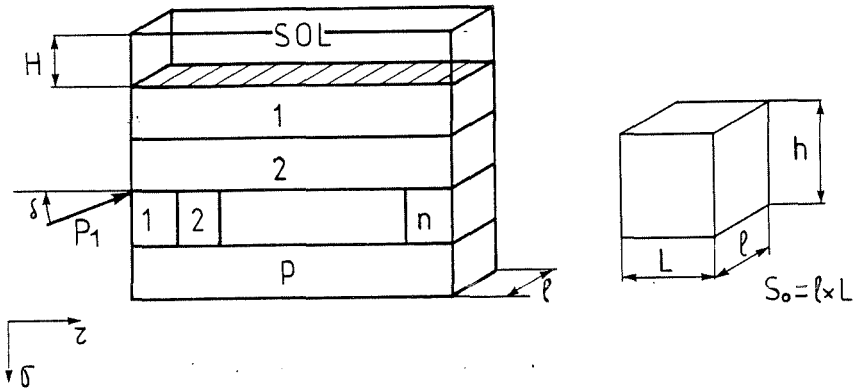


figure 4.43 : schéma notations et conventions adoptées .

Il s'agit du cas le plus défavorable car :

- Les frottements sur les flancs verticaux de la tranche de remblai ne sont pas nuls dès que les blocs sont suffisamment jointifs.
- Les talus latéraux viennent s'opposer au glissement par la poussée qu'ils engendrent : ils rajoutent également un frottement à leur contact avec les blocs.

Il nous faut déterminer N_{min} nombre minimal de blocs à disposer sur la couche inférieure pour que la surface de frottement soit suffisamment importante pour annuler le glissement.

Les contraintes appliquées sur la surface de glissement sont donc les suivantes :

- stabilisatrice : σ_S due au poids des blocs et de la couche de chaussée .
- tangentielle : τ due à la poussée des terres sur la tranche considérée comme rigide.

On considère la poussée maximum possible c'est à dire $\delta = 0$, et un coefficient de sécurité de 1,5 est affectée à la force de frottement mobilisée par σ sur l'interface.

Pour que la stabilité soit vérifiée, il faut donc :

$1{,}5\ P/S < \mu_{sb}^{*}\ \sigma$ où

S : Aire de frottement, $S = N_{1min} \cdot S_0$ (S_0 aire d'un bloc)
P : Résultante de la Poussée des terres sur la tranche
σ : contrainte due au poids des blocs et de la chaussée.
μ_{sb}^{*} : coefficient de frottement minimal de l'interface sol bloc
p : nombre de couches de blocs

On obtient donc :

$$N_{1min} > \frac{(1{,}5\ P)}{(S_0\ \mu_{sb}^{*}\ \sigma)}$$

$$N_{1min} > \frac{3\ K_a \gamma_{sol}\ (H + p\ h)^2}{4\ S_0\ \mu_{sb}^{*}\ (\gamma H + \gamma_{bloc}\ p\ h)}$$

4.2.Vérification du glissement bloc sur bloc

La démarche est identique, on émet les mêmes hypothèses :

- la tranche pouvant glisser est rigide.
- le glissement se produit au-dessous de la couche p quelconque.
- il suffit donc de remplacer dans la formule précédente le paramètre caractéristique de l'interface (μ) par μ_{sb}^*

Pour qu'il n'y ait pas glissement à la couche p, il suffit que le nombre de blocs de cette couche soit au moins égal à N_{2min} tel que :

$$N_{2min} > \frac{3\, K_{a\gamma}\, \gamma_{sol}\, (H + p\, h)^2}{4\, S_o\, \mu_{sb}^*\, (\gamma_H + \gamma_{bloc}\, p\, h)}$$

4.3.Applications numériques

Des applications numériques ont été faites pour des remblais comportant jusqu'à 7 hauteurs de blocs, dans le cas suivant (figure 4.44):

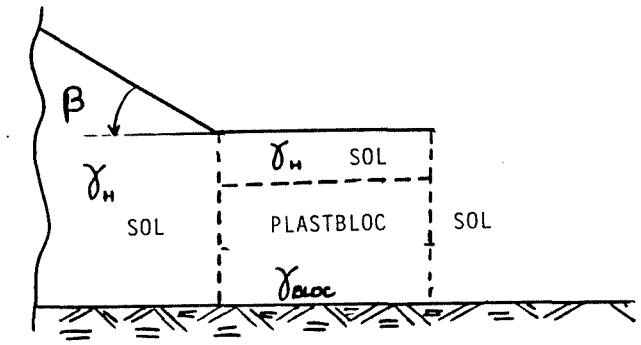


figure 4.44 : notations.

On fait varier :

- ϕ du sol actif entre 15° et 50°
- $\beta = \phi, 0, -\phi$
- γ_H = 20 kN/m^3 et 25 kN/m^3.
- γ_{bloc} = 5 kN/m3.
- S_o = 0,84 m², h = 1,2 m.(correspondant aux blocs du remblai expérimental)
- μ_{sb}^* = 0,62 et μ_{sb}^* = 0,55 (déterminés précédemment)

Les résultats sont rassemblés dans les tableaux 4.8 et 4.9 dans le cas où ß = 0. les autres cas sont donnés en annexe 2.

glissement sur bloc					ß=0				
H (m) =	1	Poids sol (kN/m3) =			20	So(m²)=	0.84		
h (m) =	1.2	Poids bloc (kn/m3) =			5	μ=	0.55		
		Poids chaussée (kn/m3) =			20				
ϕ =	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Kay =	0.704	0.589	0.49	0.406	0.333	0.271	0.217	0.172	0.133
p									
1	5	4	3	3	3	2	2	2	1
2	9	7	6	5	4	4	3	3	2
3	13	11	9	8	7	5	4	4	3
4	18	15	13	11	9	7	6	5	4
5	23	19	16	13	11	9	7	6	5
6	28	23	20	16	13	11	9	7	6
7	33	28	23	19	16	13	11	8	7

tableau 4.8 : glissement bloc sur sol .

glissement sur le sol support					ß=0				
H (m) =	1	Poids sol (kN/m3) =			20	So(m²)=	0.84		
h (m) =	1.2	Poids bloc (kn/m3) =			5	μ=	0.62		
		Poids chaussée (kn/m3) =			20				
ϕ =	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Kay =	0.704	0.589	0.49	0.406	0.333	0.271	0.217	0.172	0.133
p									
1	4	4	3	3	2	2	2	1	1
2	8	7	6	5	4	3	3	2	2
3	12	10	8	7	6	5	4	3	3
4	16	13	11	9	8	6	5	4	3
5	20	17	14	12	10	8	7	5	4
6	25	21	17	15	12	10	8	6	5
7	29	25	21	17	14	12	9	8	6

tableau 4.9 : glissement bloc sur bloc .

On remarque que le nombre minimal de blocs à prévoir par couche est important lorsque le sol poussant possède un faible angle de frottement interne.

Ce nombre de blocs est obtenu dans un cas particulièrement défavorable, puisque nous avons négligé toute possibilité de stabilisation par les frottements latéraux, et que la poussée des terres est affectée d'un coefficient de sécurité. De plus, le coefficient de frottement apparent est d'autant plus faible que les contraintes normales sont fortes. Or dans les cas réels d'ouvrage, elles se situent dans les faibles valeurs de

notre précédente étude. Le frottement réel est donc supérieur à la valeur prise en compte pour les calculs.

Prenons l'exemple d'un remblai de 3 couches de blocs, poussé par un sol d' angle de frottement de 25°.
La stabilité d'ensemble est obtenu si :

$$N_{1min}(3) = 7 \text{ blocs.}$$

Le glissement bloc sur bloc est inexistant :

- entre les couches 2 et 3 si : $N_{2min}(2) = 5$ blocs
- entre les couches 1 et 2 si : $N_{2min}(1) = 3$ blocs

Vérification dans le cas du remblai expérimental

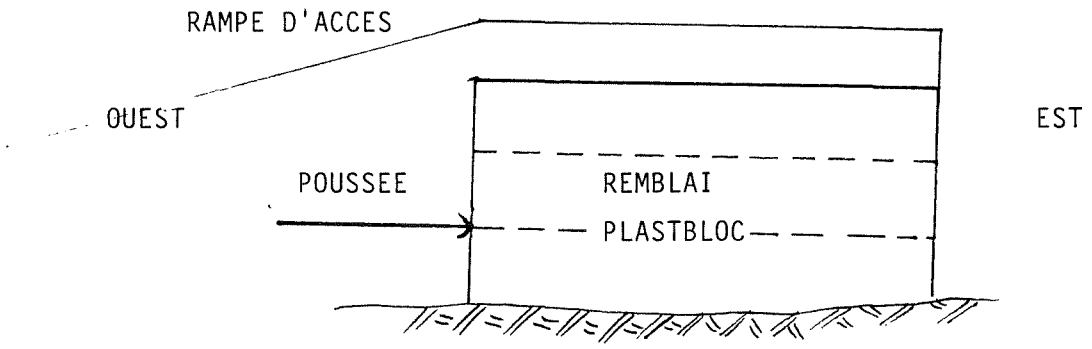


figure 4.45: remblai expérimental.

On rappelle que :
- les blocs sont enveloppés dans du tissu .
- les glissements sont du type bloc sur sol, puisqu'il y a un intercalaire en Plasterre.
- on ne connait que le frottement bloc sur bloc : $\mu = 0{,}35$.
- l'action déstabilisante provient de la poussée de la rampe d'accès .

Pour déterminer le coefficient de frottement bloc sur sol, on propose l'hypothèse suivante :

$$\frac{\mu^* bb}{\mu^* sb} = \frac{\mu^* bb \text{ (bloc enveloppé).}}{\mu^* sb \text{ (bloc enveloppé).}}$$

on obtient donc :

$$\mu^* sb \text{ (bloc enveloppé)} = 0{,}41.$$

le remblai est tel que : $\phi = 20°$, $\beta/\phi = -1$,on a donc :

N1min = 4.
N2min = 7.
N3min = 11.

Le remblai comporte 6 blocs sur chaque couche, et aucun glissement n'a été observé. Les talus latéraux et le frottement entre les blocs sur leurs faces verticales, permettent de diminuer de façon importante le nombre minimal de blocs de chacune des couches. Il est préférable de ne pas donner de facteur de réduction, le remblai expérimental étant un cas particulier.

Conclusion

Les essais expérimentaux de frottement nous ont permis de caractériser les interfaces existantes au sein du remblai. Nous avons donc obtenu :

μ^*sol-bloc = 0,62
μ^*bloc-bloc = 0,55
μ^*cisaillement = 0,95

Nous pouvons donc conclure que la stabilité du remblai sous la poussée des terres peut être rompue par glissement d'ensemble sur le sol, ou sur les couches de blocs.

Bien que liés à l'appareil expérimental et aux échantillons de sol et de blocs choisis, les résultats obtenus nous paraissent pouvoir correspondre aux cas les plus classiques.

La méthode de prédimensionnement proposée et synthétisée sous forme de tableaux peut être utilisée très facilement pour les applications réelles à venir.

CHAPITRE 5
ESSAIS DE CHARGEMENTS CYCLIQUES EN LABORATOIRE

CHAPITRE 5 ESSAIS DE CHARGEMENTS CYCLIQUES EN LABORATOIRE

Si les essais précédents ont permis de contribuer à la caractérisation d'un remblai sous sollicitations statiques, il est indispensable de connaître l'évolution de son comportement sous une sollicitation due au trafic routier. En effet, l'action d'un passage répété de poids lourds entraîne des dégradations non observées en chargement monotone. Ne pouvant procéder à des essais en vraie grandeur sur le remblai expérimental, nous avons choisi de caractériser le matériau en laboratoire sous une sollicitation se rapprochant le mieux possible de celle d'un trafic lourd.

1.MODELISATION DU TRAFIC ROUTIER

1.1.Action sous la chaussée

L'étude de l'action des surcharges routières sur le sol support n'est pas nouvelle. BARKSDALE (1971) a montré que les contraintes sur le sol avaient la forme suivante :

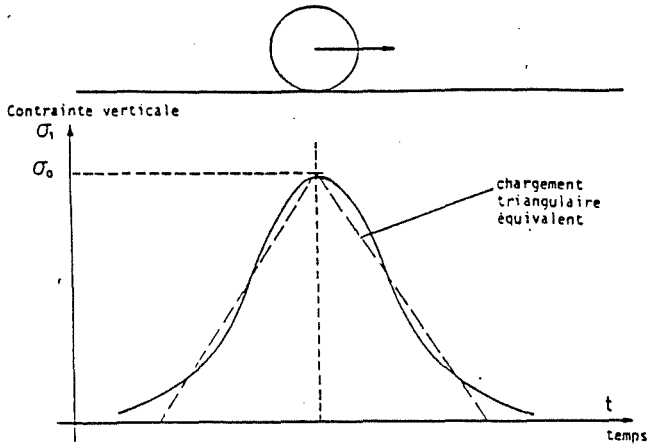


figure 5.1 : allure des contraintes sous chaussée circulée (BARKSDALE 1971).

La courbe est en forme de cloche, que l'on admet être modélisée par un chargement triangulaire, équivalent en dessous d'une profondeur critique liée à la géométrie de la chaussée (figure 5.2).

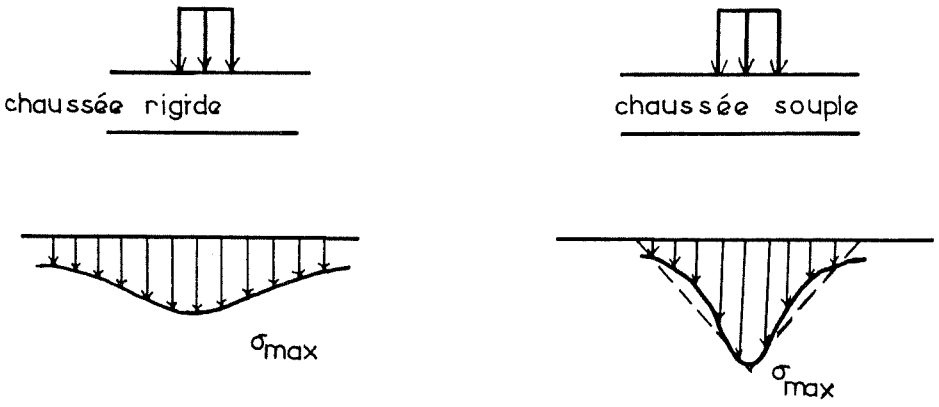


figure 5.2 : influence de la géométrie de la chaussée .

* l'intensité maximale de la contrainte dépend du type de chaussée (elle peut être 20 fois plus faible dans le cas d'une chaussée rigide que dans le cas d'une chaussée souple) et de la profondeur.

* la durée d'application de la charge dépend essentiellement de la vitesse de circulation du véhicule et de la profondeur : par exemple un véhicule circulant à 60 km/heure sollicite pendant 1/10 ème de seconde un point situé à 50 cm sous la chaussée. Et la densité du trafic influe sur le temps de repos entre deux sollicitations.

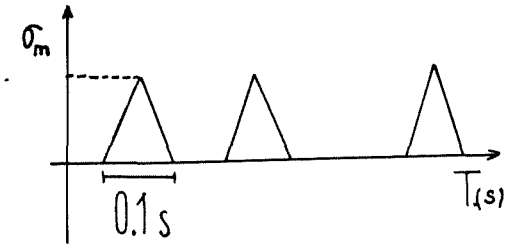


figure 5.3

1.2.Etudes cycliques antérieures (bibliographie)

Les études concernant les sables, sols, bitumes sous des chargement cycliques sont nombreuses. Elles sont effectuées principalement sous deux types d'appareillages .

- les "manèges" type LCPC :

Ce sont les plus proches de la modélisation du trafic réel. Ils existent en grandeur réelle ou en modèle réduit. Le principe est simple : il consiste à faire tourner une roue chargée, fixée sur un bras tournant autour d'un axe.

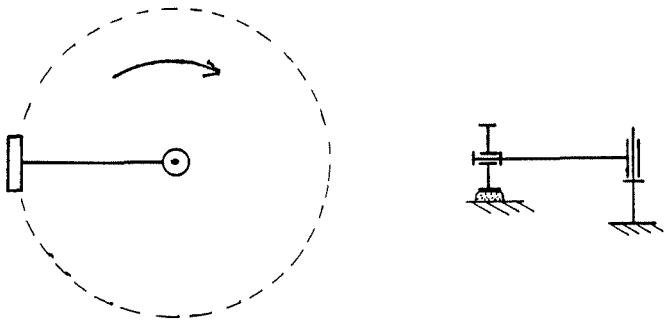


figure 5.4 : schéma de fonctionnement d'un carroussel LCPC .

Le temps d'application de la charge (très faible) en un point correspond au temps réel. Ce type de système est essentiellement destiné à l'étude des matériaux pour couche de roulement. L'appareillage est très spécifique et coûteux.

- les presses cycliques :

Elles sont beaucoup plus simples et moins chères. Ces presses sont couramment utilisées, et beaucoup plus polyvalentes. Mais elles modélisent moins bien le chargement réel, notamment parce qu'elles ne peuvent l'appliquer pendant un temps très court.

C'est le système que nous avons choisi au laboratoire.

Les différents paramètres des expérimentations sous chargement cyclique effectuées par d'autres auteurs sont rassemblés au tableau 5.1.

Les fréquences d'essais sont toutes supérieures ou égales à 1 Hz. Cette valeur semble être la limite entre les expérimentations dites dynamiques (sismique...) et les expérimentations simplement cycliques (THANOPOULOS 1981).

1.3.Choix des paramètres de notre expérimentation

On choisit une sollicitation du type triangle équivalent. Il faut donc déterminer la valeur de la charge maximale sous la chaussée, le nombre de cycles à effectuer, le temps de repos éventuel compris entre chaque cycle (figure 5.5).

Type	Nb cycles		max	but	Auteurs
manège vraie grandeur (ø 30 m)	5 10^4	σ 0,1 1,8 s t	essieu de 13 kN	dégradation des chaussées	LUCAS REQUINARD SOUPLET (75)
manège modèle réduit (ø 3 m)	10^4	σ 0,1 3 s t	essieu 13 kN	étude des bitumes sous diff. condit. climatiques	RONCIN (81)
presse en essai in situ	10^4	σ 7s 7s t	Qmin=50 à 250 kN Qmax=150 à 300 kN	étude de fonda tion superfi- cielle sous charg.cyclique	AMAR BAGUELIN CANEPA (87)
presse sur modèle réduit de chaussée (échelle 1/3)	4 10^4	σ 1s t σ t	70 à 190 kPa (essieu 13T 140 kPa)	sol bicouche avec géotextile	RIONDY (86)
presse	> 10^6	σ 1s t	50 à 150 kPa	comportement hydrodynamique des sols sup- port de chaus.	RIBOULET (79)
presse manuelle triaxiale	2 10^3	σ 20 s t	50 à 70 kPa	comportement de matériaux pulvérulents SABLE	THANOPOULOS (81)
presse hydraulique modèle réduit	10^4 à 10^5	σ 3,5 s 2,5 s t	100 kPa	comportement du polystyrène en remblai	HAMADA YAMANOUCHI (87)

tableau 5.1: récapitulatif d'essais cycliques effectuéspar divers auteurs ·

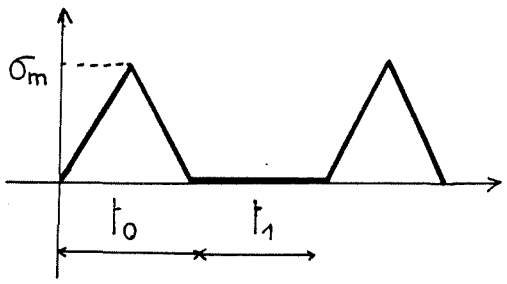


figure 5.5 :signal triangulaire.

1.3.1.Détermination de σ_{max}

On suppose que le trafic obéit au système B_r : roue isolée de 100 KN. Ce type de chargement est le plus défavorable (figure 5.6).

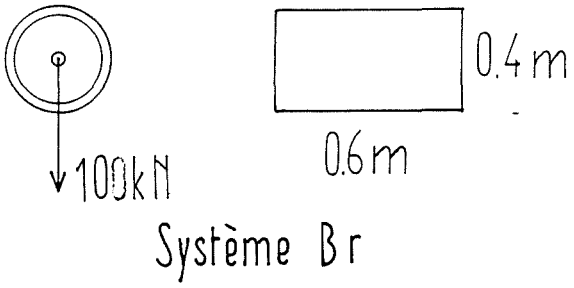


figure 5.6 : système B_r.

Les blocs sont enterrés sous 1 m de chaussée composée de sol (dans le cas du remblai expérimental) et des diverses couches de chaussées.

La contrainte verticale qui s'exerce sur le bloc est donc la somme des contraintes dues à la couche de sol (σ_p) et au trafic ($\Delta\sigma$) (figure 5.7).

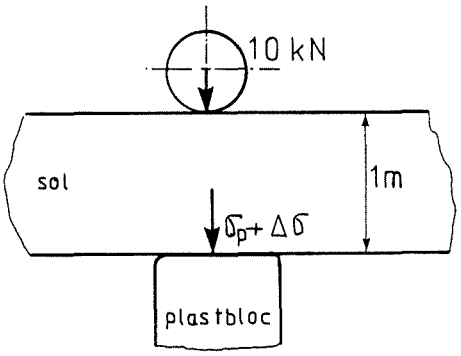


figure 5.7: schématisation des sollicitations.

$\sigma_p = \gamma_{moy} * h$

γ_{moy} étant le poids volumique moyen des couches surmontant les blocs.

Dans notre cas, on admettra que γ_{moy} est de 23 KN.

Le calcul de σ s'effectue à l'aide de la théorie de Boussinesq. On admettra que la charge à l'essieu est ponctuelle et égale à P :

on a donc :

$$\Delta\sigma = \frac{3 P . 1}{2 \pi . (1+r^2/z^2)}$$

La contrainte due à la charge ponctuelle en un point situé directement sous celle-ci donne :

$$\Delta\sigma = 48 \text{ kPa}$$

Le schéma de la contrainte que subit un point de la surface du bloc est donc la suivante :

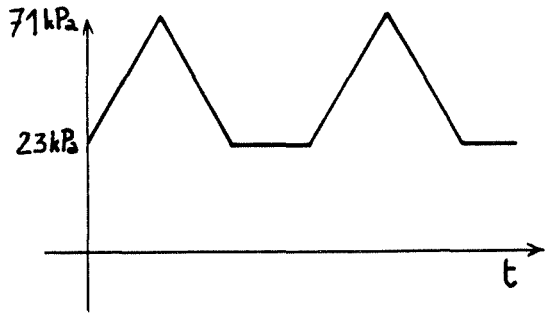


figure 5.8 : contrainte subie par un point.

Il s'agit d'une contrainte ondulée de compression (annexe 3).

1.3.2.Largeur du signal et nombre de cycles

La durée du chargement d'un point à la surface du bloc dépend essentiellement de la vitesse du véhicule, et de la contrainte critique σ_c en dessous de laquelle on considère qu'un point n'est plus chargé.

- on choisit (arbitrairement) σ_c = 1 kPa ce qui correspond à environ 1/50ème de $\Delta\sigma$, et peut donc être négligé.

- la vitesse du véhicule est choisie égale à 15 km/h (RIONDY 1986) et correspond à la vitesse moyenne de circulation des camions sur un chantier.

On montre (par les formules de Boussinesq) que la distance r_c entre un point sollicité par une contrainte inférieure à 1 kPa et le point d'application de cette contrainte est de l'ordre de 2,3 m (figure 5.9).

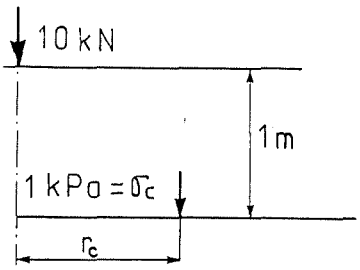


figure 5.9 : notations .

Le temps d'application du chargement triangulaire est dont de :

$$t = v*2*r_c$$

où v est la vitesse du véhicule.

d'où t = 1,1 s environ.

Le temps de repos entre deux triangles de chargement dépend de la fréquence du trafic.

Nous choisissons une valeur de l'ordre de 2 à 3 secondes .Ce temps est relativement court, mais joue en faveur de la sécurité puisque le matériau est viscoélastique.

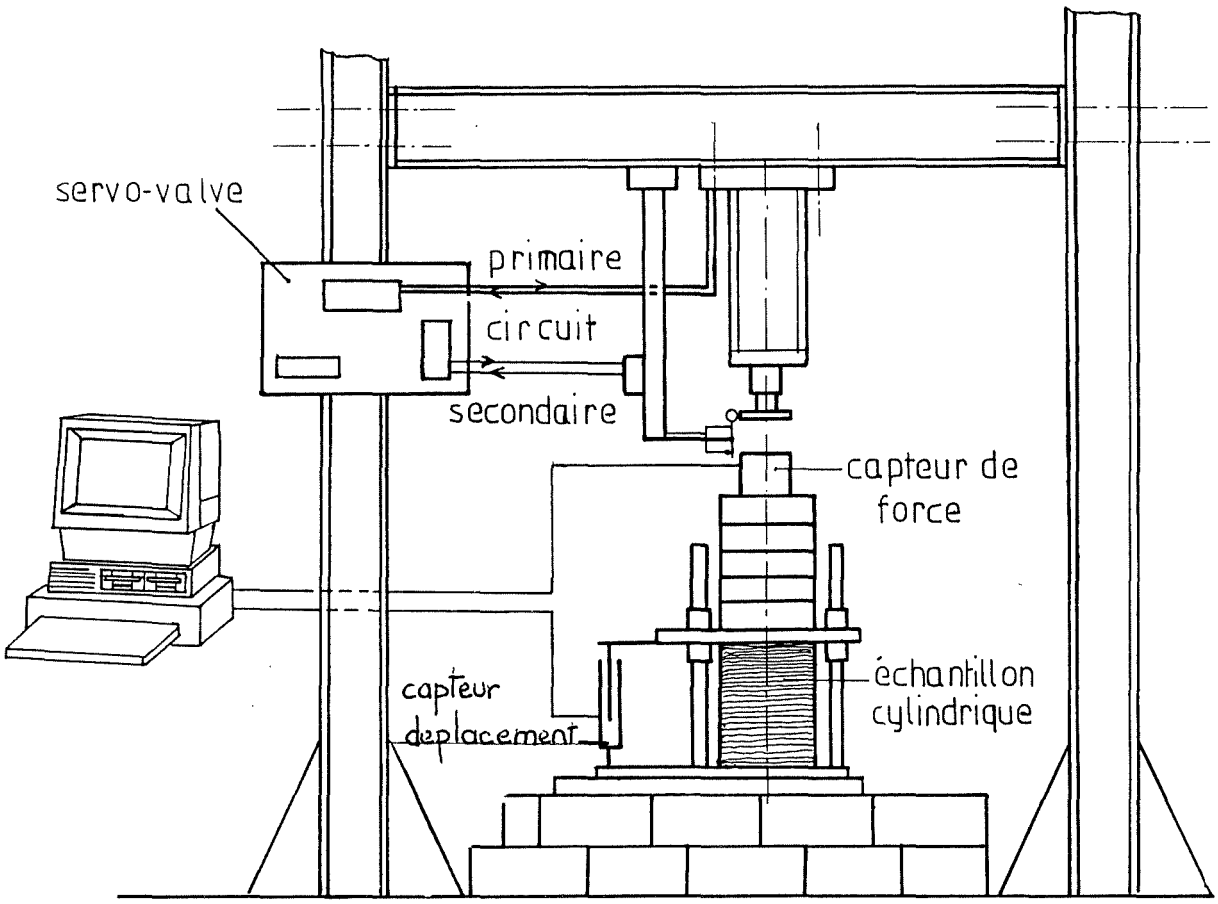


figure 5.10 : schéma de principe du dispositif.

Enfin le nombre de cycles est fixé à 10 000. C'est certes bien en dessous du nombre de cycles subis par un ouvrage au cours de sa vie mais couramment adopté.

2.Description des essais

2.1.Appareillage

Le schéma de l'appareillage utilisé est donné à la figure 5.10.

Il s'agit d'un mécanisme pneumatique. Un circuit d'air primaire permet la mise en pression de la chambre du vérin et la montée en charge. Un circuit de fuite déclenche la mise en décompression, et donc le déchargement. Un réglage permet

d'augmenter la pression et donc la contrainte appliquée sur l'échantillon ($\Delta\sigma$). Le système est donc à contraintes imposées, mais la vitesse d'application de la contrainte ne peut pas être contrôlée.

Le circuit secondaire permet le réglage des divers paramètres suivants :

- vitesse de montée en charge.
- vitesse de déchargement .
- temps de repos du vérin en position haute.

* un capteur de déplacement d'une course de 10 cm (précision au 10ème de mm) est fixé sur le bâti et mesure le tassement de l'échantillon.

* un capteur de force (capacité 4500 N) permet d'enregistrer l'effort cyclique.

* l'effort statique correspondant au poids de la couche de chaussée est appliqué par l'intermédiaire de 5 masses de 20 kg.

* une acquisition automatique des données est effectuée par l'intermédiaire d'un micro-ordinateur. La fréquence d'acquisition est de l'ordre de 10 Hz pendant la durée du chargement, puis de 5 Hz pendant le repos. Une fréquence d'acquisition plus importante entraîne malheureusement la saturation du disque dur.

Le système pneumatique est entièrement indépendant du système d'acquisition et ne peut être piloté par l'informatique. Les divers réglages s'effectuent donc par tâtonnement. La pression minimale permettant de déclencher la montée en charge entraîne un chargement $\Delta\sigma$ sur l'échantillon supérieur à celui souhaité. Il ne nous est pas possible d'abaisser le temps de chargement à la valeur souhaitée de 1 seconde.

Le chargement finalement appliqué à nos échantillons est donc le suivant (figure 5.11):

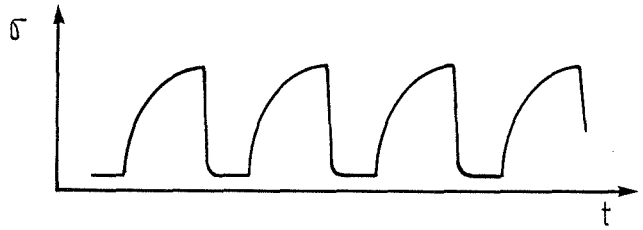


figure 5.11 : signal réellement appliqué.

Le temps de repos entre deux cycles est de l'ordre de 2 à 3 s, et varie légèrement au fur et à mesure que l'échantillon se tasse.

Pour chaque échantillon par l'intermédiaire du système d'acquisition on enregistre la contrainte, la déformation de l'échantillon au cours du temps et du nombre de cycles effectués.

Ces informations sont ensuite exploitées pour les cycles :
1, 2,.., 10, 20,.., 100, 200,.., 1 000, 2000,.., 10 000 à l'aide d'un programme écrit au laboratoire.

On étudiera pour chaque échantillon :

* la courbe contrainte déformation (c'est à dire les cycles).
* l'évolution des déformations au maximum de chargement et au minimum de chargement, et l'amplitude des déformations en fonction du nombre de cycles.

* la déformation pour un cycle donné en fonction de la densité initiale d_0 de l'échantillon.

Les paramètres étudiés seront donc :

- la présence ou non d'un chargement statique de chaussée.
- le temps de vieillissement de l'échantillon sous ce chargement statique.
- la densité initiale d_0.

2.2.Essais effectués

L'échantillon choisi est un modèle à symétrie de révolution réalisé de manière identique à ceux des essais de cisaillement mais dans un moule cylindrique : diamètre 20 cm, et élancement de 1,5 environ, pour éviter un flambement éventuel. Ils ont été effectués dans 3 densités initiales différentes : 0,3 ; 0,4 ; 0,5..

Compte tenu des remarques précédentes concernant les limites techniques de notre appareillage, les deux types de chargement finalement appliqués sont les suivants :

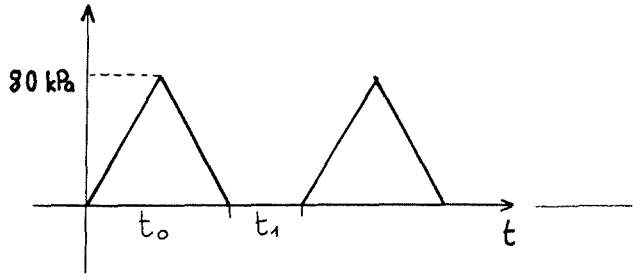


figure 5.12 a :chargement type A, (noté p = 0).

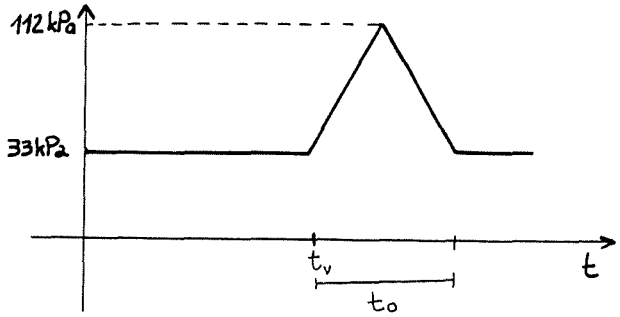


figure 5.12 b : chargement type B, (noté p = 33).

Pour les chargements du type B, trois durées de vieillissement t_V sont envisagées :

- nulle (noté p = 33 $t_V = 0$).
- 1 semaine (noté p = 33 $t_V = 1$ se).
- 1 mois (noté p = 300 t_V = 1 mois).

Enfin rappelons que le nombre de cycles moyen a été fixé à 10 000.

Les valeurs des paramètres variant légèrement d'un essai à l'autre, elles sont récapitulées dans le tableau 5.2 :

N° échant.	max	min	to en s	t1 en s	Nb de cycles	densité initiale	tv	intitulé
12	079	0	3,6	2,7	7275	0,284	0	d=0,3 p=0
13	079	0	2,7	3,3	10580	0,372	0	d=0,4 p=0
16	079	0	3,2	2,8	6770	0,289	0	d=0,3 p=0
2	079	0	3	1	9404	0,48	0	d=0,5 p=0
5	112	33	2,2	3,8	9995	0,3	0	d=0,3 p=33 t=0
1	112	33	2,5	1,3	10054	0,4	0	d=0,4 p=33 t=0
14	112	33	2,5	2,8	10000	0,382	0	d=0,4 p=33 t=0
3	112	33	2,6	1,6	20000	0,43	0	d=0,43 p=33 t=0
4	112	33	2,8	1,4	10220	0,48	0	d=0,5 p=33 t=0
10	112	33	2,6	3,6	13156	0,287	1 semaine	d=0,3 p=33 t=1semaine
7	112	33	2,8	2,2	17383	0,384	1 semaine	d=0,4 p=33 t=1semaine
6	112	33	2,9	1,4	12000	0,48	1 semaine	d=0,5 p=33 t=1semaine
8	112	33	2,9	1,4	10000	0,377	1 mois	d=0,4 p=33 t=1mois
9	112	33	2,7	1,6	9987	0,47	1 mois	d=0,5 p=33 t=1mois
15	112	33	2,7	1,5	10000	0,47	1 mois	d=0,5 p=33 t=1mois
11=9	112	33	2,7	1,6	100576	0,47	recharg. après 1 sem. de repos	d=0,5 rechargement

tableau 5.2 : récapitulatif des essais effectués , valeurs des différents paramètres.

3.CYCLES CONTRAINTES DEFORMATIONS

3.1.Essais statiques

Un essai sous une compression quasi statique de 80 kPa est effectué sur des échantillons cylindriques de densité 0.3, 0.4, 0.5, non préchargés.

La vitesse de déformation utilisée est de 1.2 10^{-5} s^{-1}.

Les résultats obtenus montrent une contrainte très instable liée à la relaxation du matériau. Un lissage a donc été effectué. La courbe contrainte déformation pour les 3 densités est représentée à la figure 5.13.

Les déformations maximales obtenues, ainsi que la déformation rémanente au déchargement sont données dans le tableau 5.3

Le calcul du module tangent à la courbe a été effectué pour deux points : au chargement maximum (E_b), et au début de la mise en charge (E_a). Compte tenu de la

dispersion des points de la courbe, ils ont été calculés d'après la courbe moyenne (tableau 5.3).

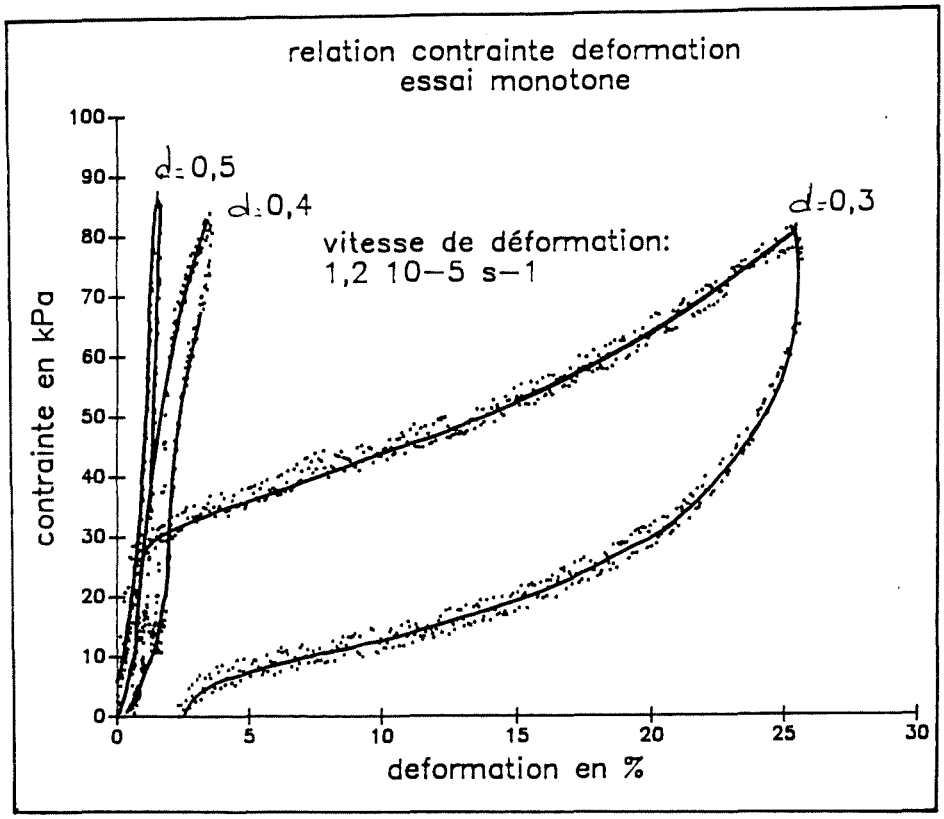


figure 5.13 : essais statiques.

densité	d = 0,3	d = 0,4	d = 0,5
ε max (%)	25,4	3,6	1,4
ε min (%)	2,51	0,75	0,6
Ea (MPa)	2 à 3	2 à 3	2 à 3
Eb (MPa)	0,54	1,00	2,5

tableau 5.3 : déformations et modules moyens du chargement statique.

L'essai de densité 0,3 montre clairement que son comportement est gouverné essentiellement par celui de la structure en films plastiques. L'air s'échappe facilement et ne modifie pas énormément le comportement de la matrice. Le comportement des échantillons de densité 0,4 et 0,5 est similaire, la structure comportant plus de plastique étant plus rigide.

On peut conclure que les déformations maximales et rémanentes dépendent de la densité initiale, et le module tangent, dont l'ordre de grandeur est celui d'un élastomère, également.

3.2.Essais cycliques

3.2.1.Notations

On rappelle que :

$\Delta\sigma$: amplitude de la contrainte cyclique

σ_p : contrainte statique de chaussée.

$\sigma = \sigma_p + \Delta\sigma$: contrainte totale.

on notera alors :

ϵ_v : déformation éventuellement accusée par l'échantillon à l'instant où démarre le chargement cyclique, elle est due à la présence d'une charge de chaussée.

ϵ_{tot} : la déformation totale

$\epsilon_c = \epsilon_{tot} - \epsilon_v$:la déformation due uniquement à la charge cyclique

ϵ_{max} et ϵ_{min}, σ_{max} et σ_{min} sont données à la figure 5.14, et toutes les valeurs de déformations seront exprimées en pourcentage.

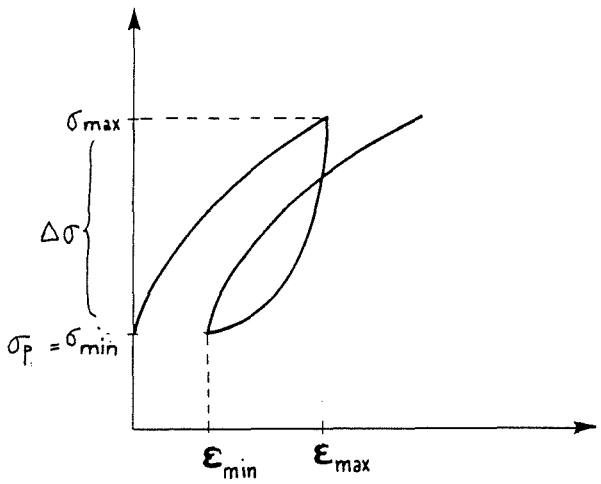


figure 5.14 : définitions et notations.

On désignera souvent les échantillons par leur densité initiale prévue, (0,3...), sauf lorsque il est nécessaire de la connaître avec précision. En effet, lors de la fabrication, le regonflement entraîne une différence entre la densité prévue, et celle obtenue.

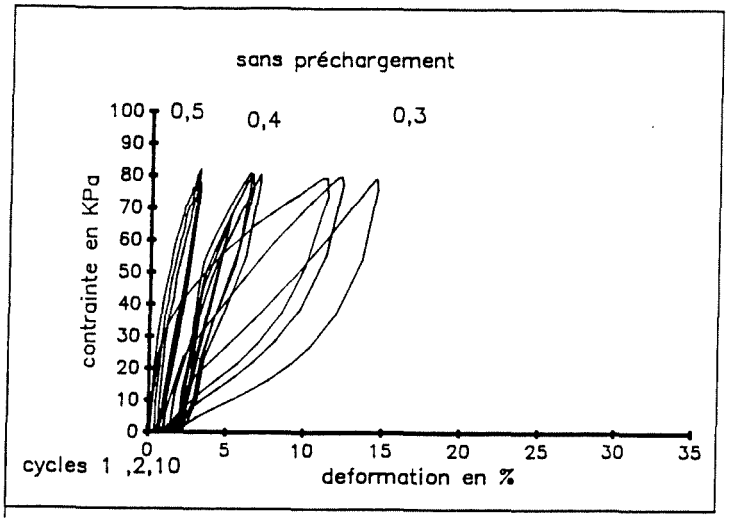
3.2.2.Résultats et analyse

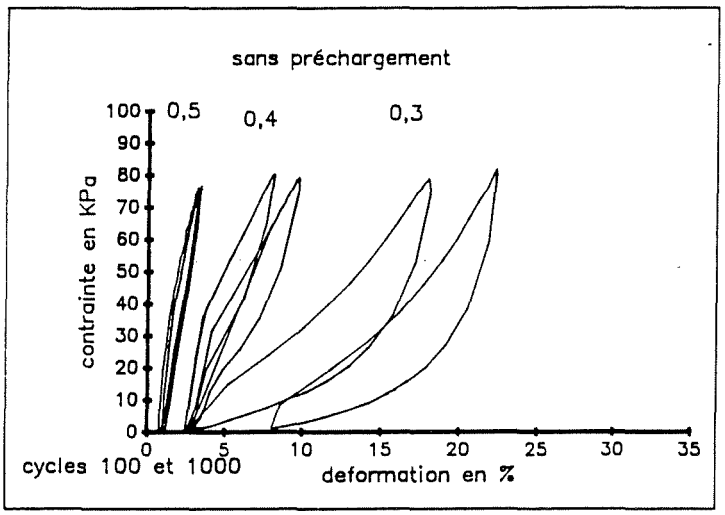
3.2.2.1.Domaine de déformation

Les figures 15.A et 15.B présentent les cycles contraintes déformations obtenus pour les essais de type A, et, B avec préchargement instantané (sans vieillissement), les autres résultats étant présentés en annexe 2.
On constate que le domaine de déformations engendrées par les cycles est très lié à la densité initiale de l'échantillon testé, comme l'indique le tableau 5.4

do	0,5	0,4	0,3
ε (%)	0 à 3 %	8 à 12 %	20 à 35 %

tableau 5.4 : domaine d'évolution des déformations.





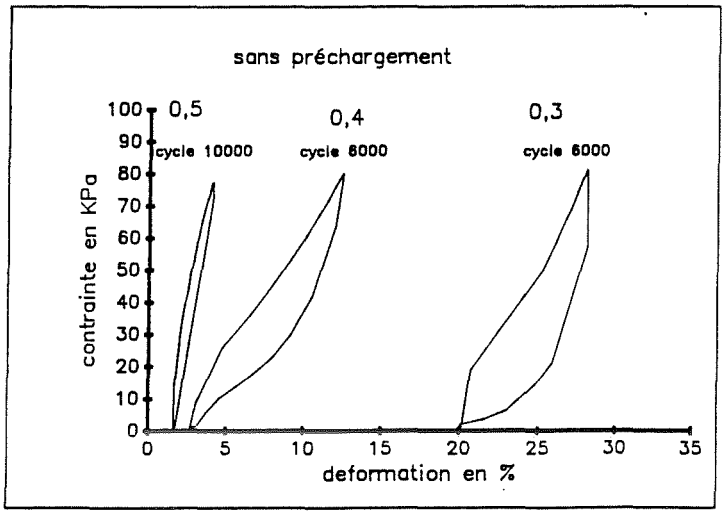


figure 5.15A : essai type A cycles 1,2,10,100,1000,et dernier.

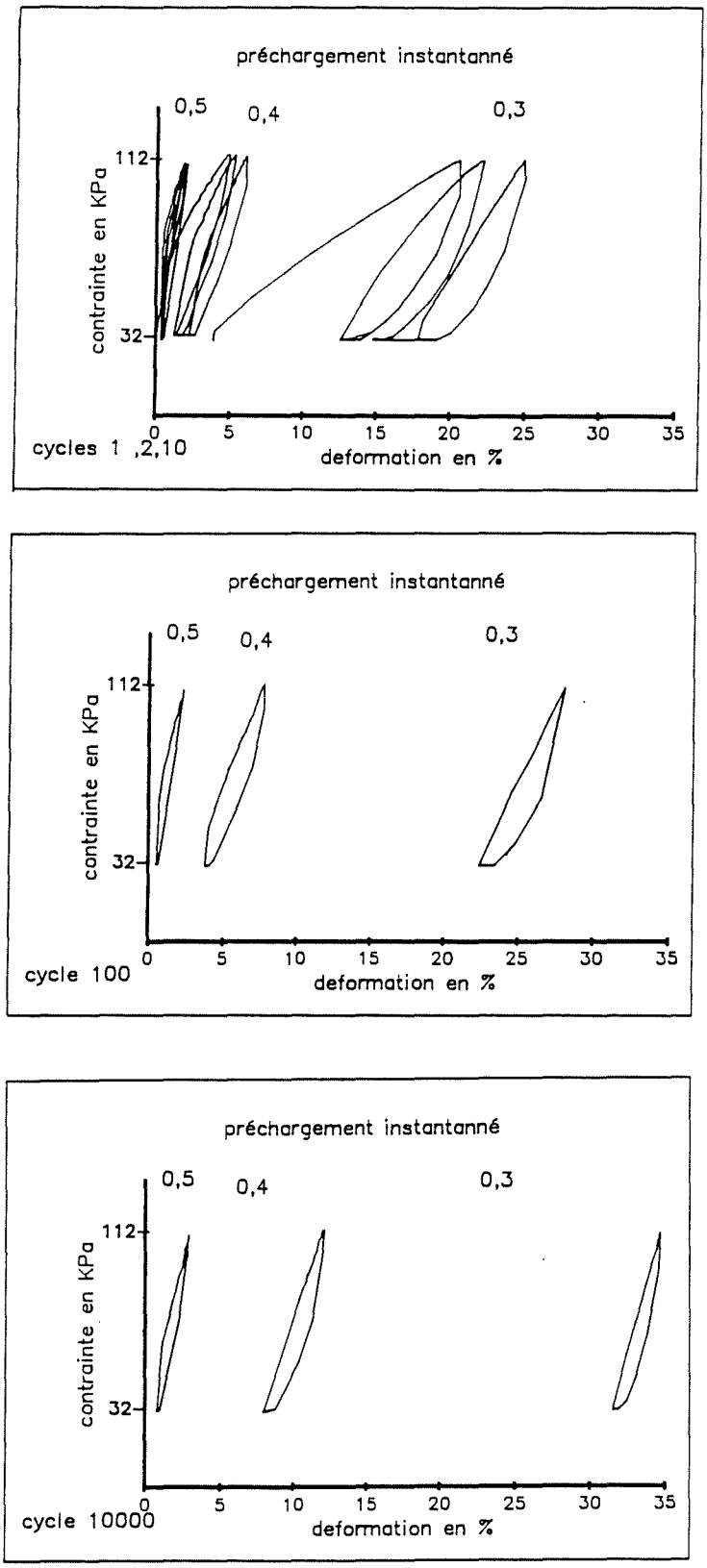


figure 5.15b : essai type B $t_v = 0$, cycles 1, 2, 10, 100, 10000

La densité 0,3 présente une déformation très importante, dès le premier cycle (15 %), qui double au cours des 10 000 cycles. La translation des cycles contraintes déformations le long de l'axe des déformations est également dépendant de cette densité initiale. L'accroissement de déformation moyenne est donnée au tableau 5.5 entre les cycles 1 et 10 000. La densité 0,5 présente une déformation très faible qui évolue peu .

do	0,3	0,4	0,5
ε moy 1er cycle	17 %	3 %	1,5 %
ε moy 10^4 cycles	30 %	10 %	2 %
accroissement de déformation	13 %	7 %	0,5 %

tableau 5.5 : accroissement de déformation moyenne en 10000 cycles.

Les accroissements sont donnés à la figure 5.16 en fonction de la densité initiale des échantillons, pour tous les essais.

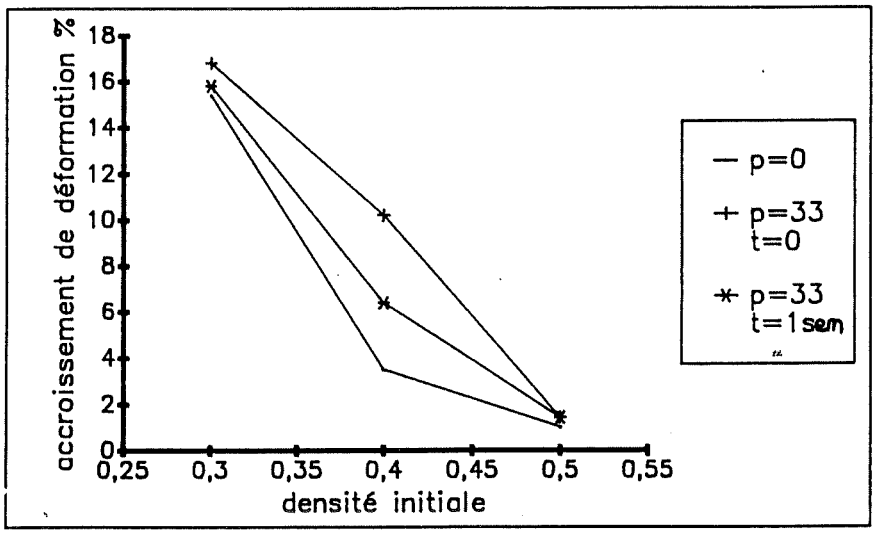


figure 5.16 : translation du domaine de déformation en fonction de la densité initiale .

Une légère variation de la densité initiale entraîne donc une grande variation du domaine de déformation dans lequel évoluent les cycles, notamment pour les faibles densités.

a- Influence du vieillissement

Il est observable en comparant les courbes p=33 t= 0, p=33 t=1 semaine, p=33 t= 1 mois

Globalement, le vieillissement tend à diminuer l'accroissement de déformation de l'échantillon, au cours des cycles (tableau 5.6.)

do	0,3	0,4	0,5
t=0 accroissement (en %)	16,8 %	10,2 %	1,43 %
t= 1 semaine accroissement (en %)	15,8 %	6,4 %	0,68 %

tableau 5.6.

b- influence du préchargement

Elle est observable en comparant les courbes p=0 , et p=33.
Le préchargement accroît nettement le domaine de déformation des échantillons. En fait, les échantillons préchargés, puis testés sans vieillissement présentent une déformation de fluage, importante pour les faibles densités.

3.2.2.2.Evolution de la raideur des cycles

On définit un module moyen de raideur du cycle par :

$$E_{moy} = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{(\epsilon_{max} - \epsilon_{min})}$$ (LEMAITRE, CHABOCHE 1984)

Cette définition est légitime pour les cycles très fermés (d=0,4 et d= 0,5) mais nous l'utiliserons également pour d= 0,3 à des fins de comparaison.

E_{moy} est représentatif d'une évolution globale du matériau au cours des cycles. Cette évolution est donnée à la figure 5.17 pour tous les échantillons.Le tableau 5.7 présente un résumé de l'évolution en 10 000 cycles.

densité		E cycle 1 (MPa)	E cycle 10^4 (MPa)	sens variation
p = 0	0,3	0,8	0,45	↘ / 2
	0,4	1,75	0,85	↘ / 2
	0,5	3,2	3,2	⇝ cst
p = 33 t = 0	0,3	0,9	2,5	↗ x 2,5
	0,4	2,3	2,1	⇝ cst
	0,43	1,6	2,3	↗ x 1,5
	0,5	5,6	3,9	↘ / 1,5
p = 33 t = 1 semaine	0,3	0,99	2	↗ x 2
	0,4	1,2	2	↗ x 2
	0,5	4	2,5	↘ / 1,5
p = 33 t = 1 mois	0,4	1,3	1,77	↗ x 1,4
	0,5	18	9,5	↘ / 2
	0,5	22,4	15,6	↘ / 1,4
recharg.	0,5 rechargt	14,5	13,8	⇝ cst

tableau 5.7 : évolution de la raideur moyenne au cours des cycles.

On constate que :

- le module moyen est d'autant plus élevé que la densité est forte. Cette raideur est de l'ordre de celle des élastomères .
- les échantillons préchargés présentent globalement des modules plus élevés que les échantillons ayant subi un test type A.
- le vieillissement d'une semaine n'apporte pas d'amélioration significative. On observe par contre au dernier cycle que les matériaux tendent vers une même raideur (=2 MPA).
- le préchargement de 1 mois des échantillons de densité 0,5 entraîne une raideur nettement plus élevée, confirmée par deux essais.

La dernière colonne indique le sens de variation de la raideur, et de combien elle a été multipliée ou divisée en 10 000 cycles. On remarque que :

- les échantillons de faible densité voient leur raideur divisée par deux. Une diminution de E_{moy} correspond à un adoucissement du matériau. Ceci est

effectivement confirmé par la rupture de 3 d'entre eux avant le cycle 10 000 (2 en densité 0,3 et 1 en densité 0,4).

- pour la densité 0,5 le comportement reste constant globalement, avec une légère tendance au durcissement .

Pour les échantillons ayant subi des tests de type B :

- les densités 0,4 et 0,3 présentent un durcissement important (raideur multipliée par deux)
- la densité 0,5 présente un adoucissement important : raideur divisée par 1,5.

Le vieillissement ne modifie pas les remarques précédentes : les faibles densités durcissent, alors que l'échantillon de densité 0,5 s'adoucit. Il possède néanmoins une raideur suffisamment grande, qui même divisée par deux reste plus forte que celle des autres échantillons.

Le durcissement observé pour les faibles densités montre l'intérêt d'un préchargement : il permet d'augmenter la raideur initiale de l'échantillon, et entraîne une amélioration importante au cours des cycles. elle est due essentiellement à la densification progressive de l'échantillon (tableau 5.8):

	d=0,3			d=0,4				d=0,5				STATIQUE		
	p = 0	p = 33 t = 1sem	p = 33 t = 1sem	p = 0	p = 33 t = 0	p = 33 t = 1sem	p = 33 t=1mois	p = 0	p = 33 t = 0	p = 33 t = 1sem	p = 33 t=1mois	d=0,3	d=0,4	d=0,5
do	0,284	0,3	0,287	0,372	0,4	0,384	0,37	0,48	0,48	0,47	0,47	0,305	0,384	0,478
d final	0,45	0,46	0,47	0,46	0,43	0,47	0,44	0,49	0,49	0,48	0,47	0,406	0,4	0,484
gain	60 %	53 %	63 %	20 %	20 %	22 %	17 %	2 %	2 %	2 %	0 %	33 %	4 %	1,5 %

tableau 5.8.: gain de densité en 10000 cycles.

Conclusion

En première approche, plus la densité juste avant l'essai est forte, meilleur est le comportement. Par contre lorsque la densité est déjà importante (0,5), les cycles peuvent entraîner une fatigue du matériau bien que la raideur de l'échantillon de densité 0,5 reste supérieure à celles des échantillons d=0,4.

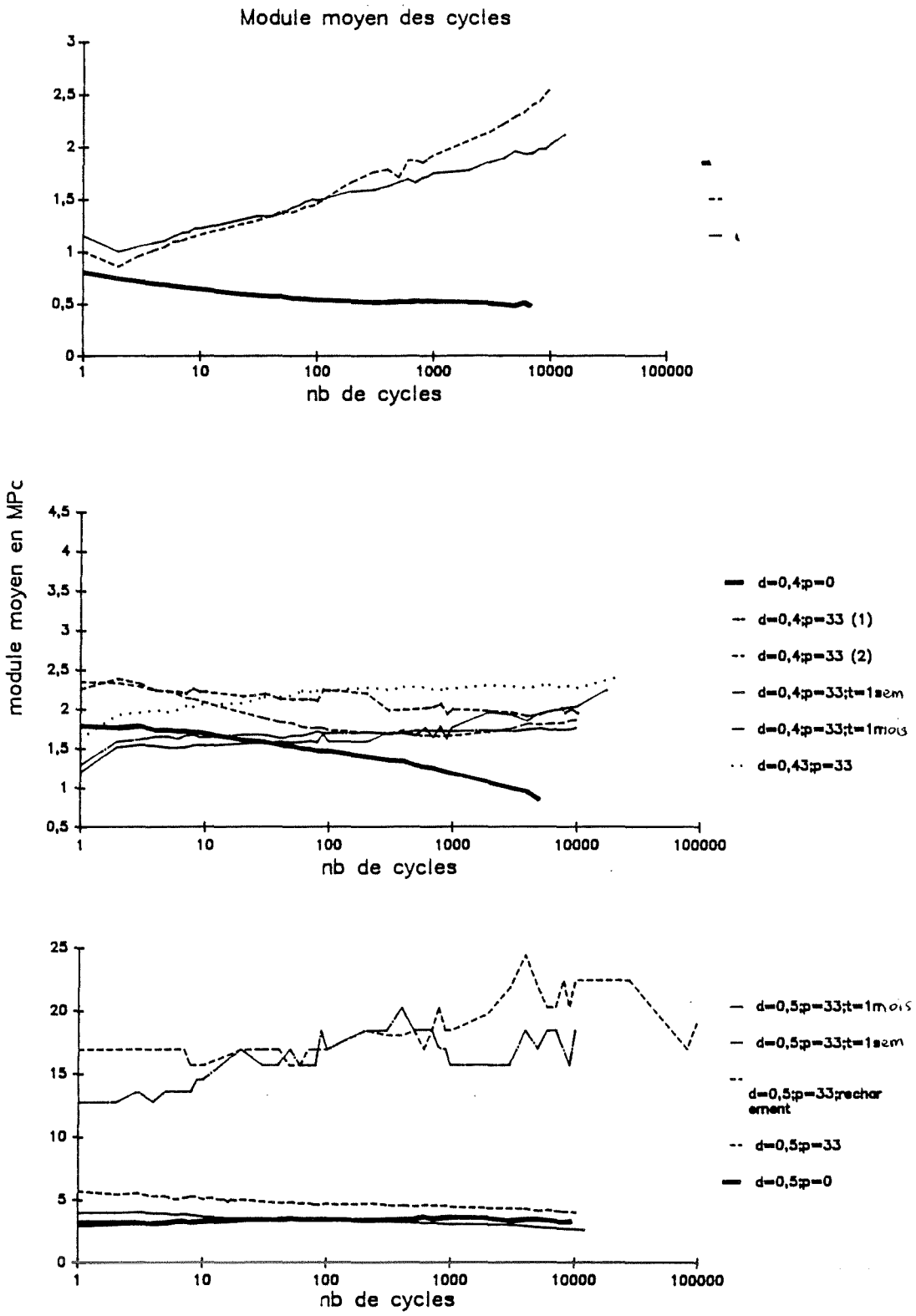


figure 5.17 : module moyen en fonction du nombre de cycles .

3.2.2.3. Transformation de l'allure des cycles

L'évolution de l'allure des cycles permet de mettre en évidence la modification de comportement entre échantillons préchargé ou non.

On observe nettement en regardant la figure 5.15 que les hystérésis sont toutes fermées à 10 000 cycles, quelle que soit la densité initiale de l'échantillon. Ce phénomène est déjà amorcé au 100ème cycle, alors que les premiers cycles sont très différents : fermés pour d=0,5,ouverts pour d= 0,4, et très ouverts pour d=0,3. Ces premiers cycles sont en fait similaires aux courbes d'hystérésis sur les essais quasi statiques (figure 5.13).

Ce changement de forme du cycle s'accompagne d'un changement de concavité, également observable sur les essais de type A (figure 15.A). On peut caractériser cette concavité par le calcul du module tangent à la courbe de chargement en 2 points caractéristiques, et leur évolution au cours des cycles.

Le module tangent est calculé à l'amorce du chargement, puis juste avant le déchargement (figure 5.18.)

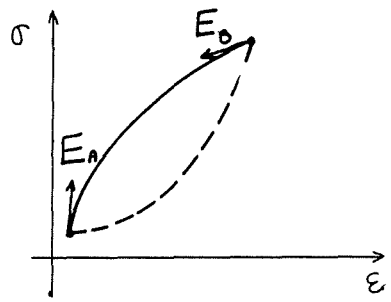


figure 5.18 : définition de E_a et E_b .

On prendra pour E, la pente moyenne sur 3 points de mesure :

$$E_i = 1/2 \left[\frac{(\sigma_{i+1} - \sigma_i)}{(\epsilon_{i+1} - \epsilon_i)} + \frac{(\sigma_i - \sigma_{i-1})}{(\epsilon_i - \epsilon_{i-1})} \right]$$

On admet que l'évolution de E_A à E_B tout au long du chargement se fait de manière continue. Suivant les valeurs respectives de E_A et E_B, deux types de comportement sont possibles :

$E_A > E_B$ d'où $E_A / E_B > 1$: allure du cycle type I (figure 5.19)
$E_A < E_B$ d'où $E_A / E_B < 1$: allure du cycle type II
Lorsque $E_A/E_B >> 1$ ou $E_A/E_B << 1$ la courbure devient très marquée.

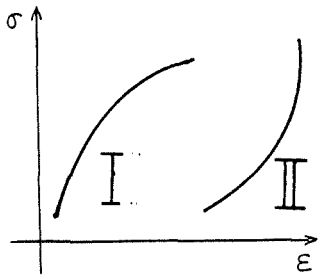


figure 5.19 : allure des cycles type I et type II.

L'allure du déchargement n'est pas étudiée, car il se fait trop rapidement, et nous n'avons pas suffisamment de points à notre disposition.

Les valeurs du rapport E_A / E_B sont données au tableau 5.9 pour les essais de type A, et ceux de type B avec préchargement sans vieillissement.

	p = 0				p = 33 t = 0			
cycle	1	2	100	10^4	1	2	100	10^4
do	EA/EB	EA/EB	EA/EB	EA/EB	EA/EB	EA/EB	EA/EB	EA/EB
0,3	7,7	10,7	1	0,7	9,5	2,6	1	0,8
0,4	3,1	3,1	3,1	0,8	4,6	3,7	1,2	0,6
0,5	13	4,6	2,1	2,5	7	4	3,4	2

tableau 5.9 : valeurs du rapport E_a/E_b pour 2 types d'essais: sans préchargement et préchargement instantané.

On observe que lorqu'il y a préchargement, les cycles des échantillons de densité 0,3 et 0,4 passent du type I au type II. Pour la densité 0,3, E_A et E_B à 10 000 cycles sont du même ordre de grandeur, et confirment l'impression de linéarité de la courbe de chargement. Pour les échantillons de densité 0,5 l'allure du cycle ne change pas, et reste de type I. Lorsqu'il y a aucun préchargement, les mêmes observations peuvent être faites, mais les courbes présentent une courbure beaucoup plus marquée (figure 5.17).

3.2.2.4 Interprétation

On a vu (au paragraphe 3 chap.2) que le comportement des matériaux alvéolaires est la superposition de deux phénomènes :

- compression de l'air.
- compression d'une structure en polymère comportant des cloisons.

La prépondérance de l'un ou l'autre dépend de la proportion de cellules ouvertes (comportement de la structure creuse) par rapport à celle de cellules fermées (comportement de l'air).

La transformation des cycles d'une allure de type I vers celle de type II indique que l'on a une prépondérance du comportement des cloisons de la matrice, c'est à dire une forte proportion de cellules ouvertes. Au début des cycles, compte tenu de la rapidité du chargement, on comprime de l'air, puis au fur et à mesure des cycles, celui ci trouve des chemins pour s'échapper du matériau. On a alors un matériau qui se comporte comme un alvéolaire à cellules ouvertes.

Ce comportement est très marqué pour les essais sans préchargement où son absence permet une entrée d'air importante lors du déchargement.

Pour les échantillons de densité 0,5, dont l'allure des cycles ne se modifie pas, on peut estimer que le comportement prépondérant est celui de l'air, le matériau s'apparente donc à un alvéolaire à cellules fermées. En effet l'allure de la courbe du chargement statique montre que cet échantillon se comporte identiquement aux autres densités, mais avec une structure plus résistante, à cause de la quantité de plastique plus importante. En revanche lors d'un chargement cyclique, la vitesse de chargement est trop importante pour laisser à l'air le temps de se frayer un chemin entre les feuilles de plastiques, ce qui donne l'impression d'une prépondérance du comportement de l'air.

Conclusion

Les essais cycliques permettent de mettre en évidence :

- un adoucissement cyclique pour les densité 0,3 et 0,4 lorsqu'il n'y a pas préchargement .
- un durcissement pour ces mêmes densités lorsqu'il y a préchargement.
- pour les échantillons de densité 0,5 le comportement inverse est observé.

Dans le cadre d'un choix de densité pour un ouvrage réel, il faudrait a priori exclure tout matériau présentant une altération des propriétés en essais cycliques : c'est à dire qu'il est nécessaire de précharger le remblai, avant de faire la mise en circulation.

Toutefois, l'utilisation d'un matériau de faible densité n'est pas souhaitable, l'amélioration de ses propriétés n'étant obtenue qu'après une déformation préjudiciable à l'ouvrage. La densité 0,5 parait la mieux appropriée compte tenu des raideurs observées.

4.EVOLUTION DES DEFORMATIONS EN FONCTION DU NOMBRE DE CYCLES

4.1.Essais préliminaires

La déformation totale subie par un échantillon soumis à un chargement de type B résulte de plusieurs phénomènes :

- une déformation purement cyclique engendrée par les variations de contrainte entre σ_{max} et σ_{min}.

- une déformation due à un préchargement imposé de 33 kPa.
- une déformation liée au fluage du matériau sous la charge statique, même durant les cycles.

Nous émettrons l'hypothèse d'une parfaite superposition de ces phénomènes (notamment celui du fluage) afin de les découpler.

Les mesures effectuées au cours de l'essai cyclique fournissent une déformation ϵ qui représente la déformation due aux cycles superposée à celle due au fluage pendant la durée des 10 000 cycles (entre 12 et 24 heures d'essai).

Il est donc nécessaire d'évaluer ce fluage en fonction du temps pour éventuellement corriger la déformation acquise.

Ces essais de fluage ont été réalisés en collaboration avec EL GHOCHE (1991) dans le but de modéliser le comportement en fluage du matériau Plastbloc.
Ils ont été effectués sur des échantillons identiques aux nôtres.

Nous n'exposerons ici que les essais se rapportant à notre domaine de contrainte .

La contrainte de fluage est appliquée soit directement soit par paliers jusqu'à 23, 55, 103, 151 kPa. Les mesures du tassement des échantillons sont faites, après 1mn, 2 mn, 5 mn, 10 mn, 20 mn, quelques heures. Elles sont représentées en fonction de ln t à la figure 5.20, pour les valeurs de contraintes de 23 kPa, et 55 kPa qui correspondent à notre domaine de contraintes appliquées.

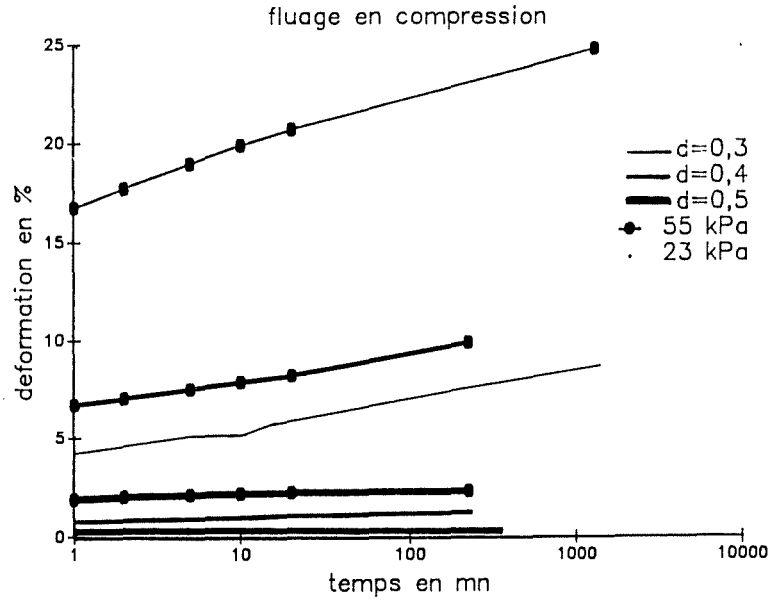


figure 5.20 : fluage des échantillons.

L'exploitation de l'ensemble des essais effectué permet de conclure que le fluage de l'échantillon est une fonction linéaire de ln (t) dépendant de la contrainte appliquée et de la densité initiale de l'échantillon. Cette linéarité avait déjà été mise en évidence sur les blocs réels. La déformation de fluage peut donc être mise sous la forme :

$$\epsilon = \epsilon_{inst} + a \ln t$$

Les valeurs de ϵ_{inst} et de a sont données au tableau 5.10

	d = 0,3	d = 0,4	d = 0,5
σ=23 kPa	ϵ = 4,07 + 0,630 lnt	0,782 + 0,086 lnt	0,218 + 0,010 lnt
σ=55 kPa	ϵ = 17,08 + 1,104 lnt	6,575 + 0,59 lnt	1,96 + 0,0741 lnt

tableau 5.10: approximation des déformations par une loi linéaire de ln t.

A partir de l'ensemble des essais, on a étudié l'évolution à un temps donné des déformations en fonction de la contrainte appliquée, pour chacune des densités. La figure 5.21 donne la déformation à 1 minute.

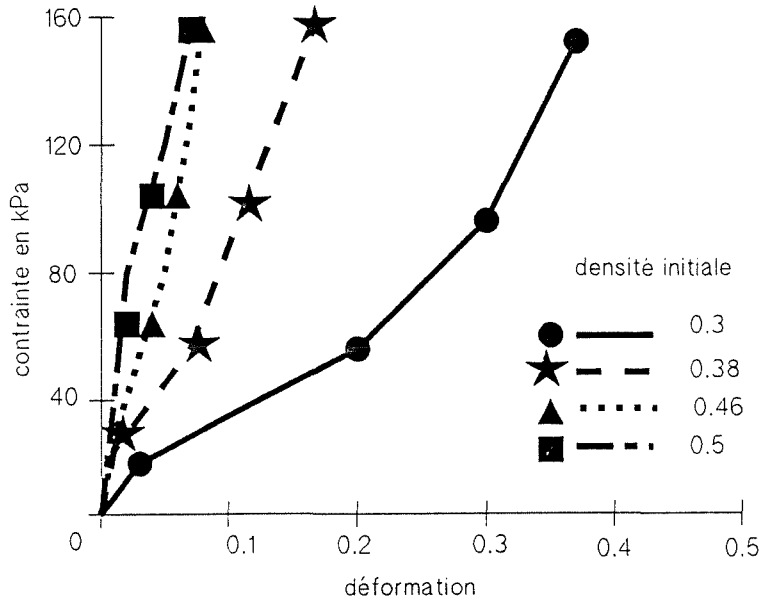


figure 5.21 : évolution en fonction de la densité (EL GHOCHE 1992).

Pour déterminer les valeurs de ϵ_{inst} et de a pour nos échantillons soumis à la charge de chaussée de 33 kPa une interpolation linéaire est faite, telle que :

$$\epsilon_{33}(t) = 0{,}69\ \epsilon_{23}(t) + 0{,}31\ \epsilon_{55}(t)$$

on obtient donc les lois de fluage suivantes pour les échantillons soumis au préchargement de 33 kPa (tableau 5.11)

d = 0,3	ϵ=8,103 + 0,776 lnt
d = 0,4	ϵ=2,57 + 0,240 lnt
d = 0,5	ϵ=0,758 + 0,029 lnt

tableau 5.11 : loi linéaire concernant le domaine de contrainte des essais cycliques.

Cette estimation du fluage est suffisante pour découpler les phénomènes. A titre d'exemple, nous la calculons pour le dernier cycle (10 000 ème).
Il s'agit uniquement du fluage intervenant durant la durée des cycles ; en effet, nos mesures de déformation juste avant le démarrage des cycles prennent en compte le fluage intervenu durant le vieillissement. On considère une durée moyenne des essais de 18 heures.

essai avec préchargement instantané :

d=0,3 ϵ = 5,4 %
d=0,4 ϵ = 1,7 %
d=0,5 ϵ = 0,2 %

essais avec préchargement de 1 semaine :

d=0,3 ϵ = 0,08 %
d=0,4 ϵ = 0,02 %
d=0,5 ϵ = 3 10^{-3} %

essais avec préchargement de 1 mois :

d=0,3 ϵ = 0,02 %
d=0,4 ϵ = 6 10^{-3} %
d=0,5 ϵ = 7 10^{-4} %

Ces résultats montrent que l'on pourra négliger l'augmentation de la déformation due au fluage lorsqu'il y a eu un préchargement pendant une longue durée .

4.2.Déformations au cours des cycles

Les grandeurs permettant de caractériser le comportement du matériau sont :

- la déformation cyclique moyenne : elle permet d'apprécier le comportement global du matériau.
- la déformation cyclique minimale : elle fournit une information sur la part rémanente du comportement .
- la déformation cyclique maximale .
- l'amplitude de la déformation.

A partir du suivi des déformations au cours des cycles, nous allons étudier comment les déformations cycliques évoluent et l'influence du préchargement et du vieillissement sur ces caractéristiques.

4.2.1.Déformation cyclique moyenne

Pour un cycle donné N,

$$\epsilon_{cmoy}(N) = \frac{\epsilon_{cmax}(N) + \epsilon_{cmin}(N)}{2}$$

L'évolution de ϵ_{cmoy} en fonction de N est donnée à la figure 5.22 pour tous les essais, type A et B.

4.2.1.1.Allure générale

On remarque que les déformations moyennes sont d'autant plus grandes que la densité initiale de l'échantillon est faible (tableau 5.12).

do dernier cycle	0,3	0,4	0,5
ϵ moy % p = 0	30	11,5	2,5
ϵ moy % t = 0	29 (6000 cycles)	12,2 (6000 cycles)	3,8 (10^4 cycles)

tableau 5.12 : déformation moyenne cyclique en fonction de la densité ·

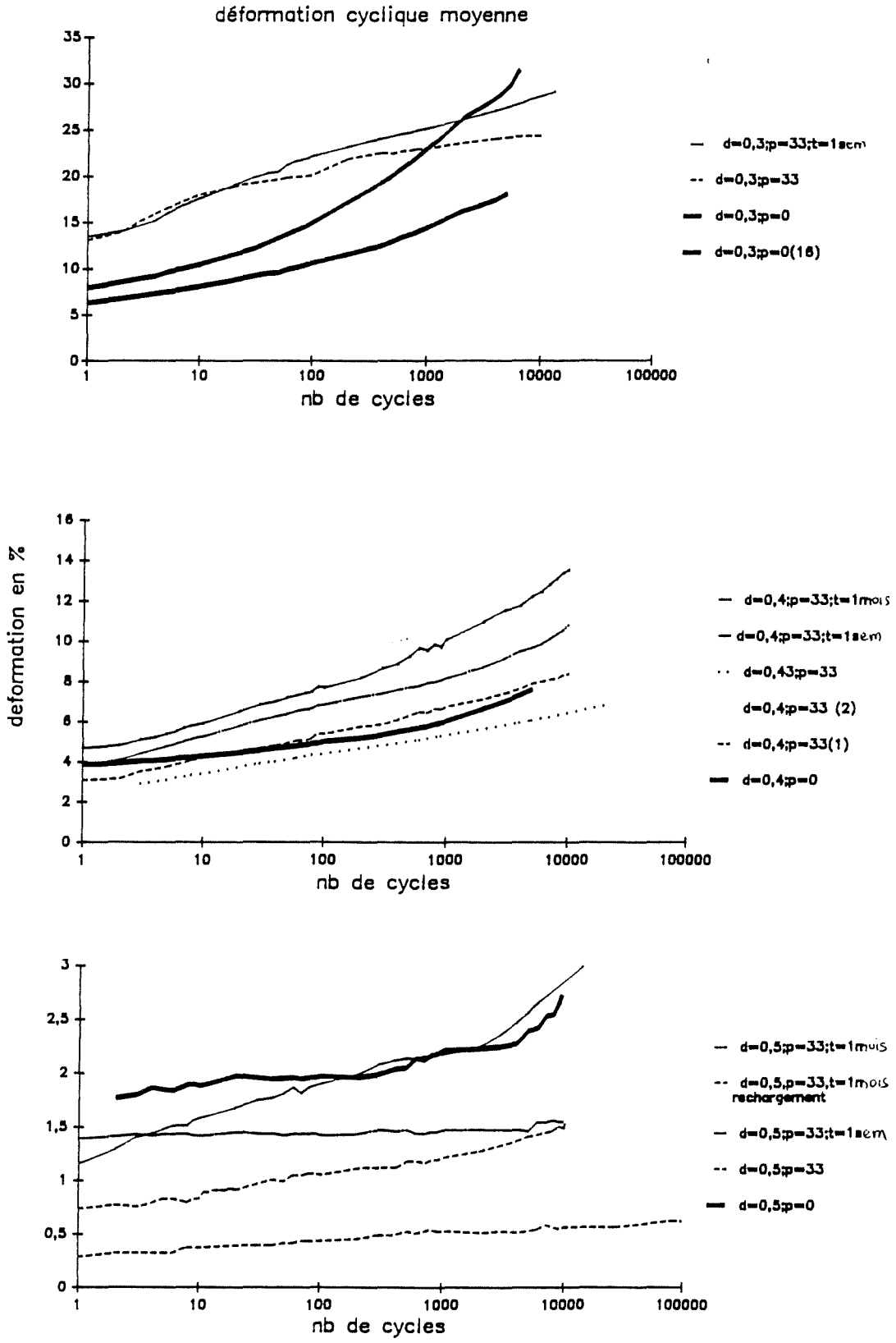


figure 5.22 : déformation moyenne cyclique mesurée lors des essais ,

L'accroissement de cette déformation entre les premier et dernier cycles est donnée au tableau 5.13.

do ε en %	0,3	0,4	0,5
p = 0	12,4	3,9	1
t = 0	16,8	7,28	0,78
1 semaine	15,8	10,2	1,43
1 mois	-	6,4	0,68

tableau 5.13 : accroissement de la déformation en 10 000 cycles.

On constate que la déformation croît plus vite lorsque la densité initiale est faible.

La densité initiale est donc un paramètre ayant beaucoup d'influence sur les déformations observées.

4.2.1.2.Influence du préchargement

Sur les courbes précédentes, on remarque que le préchargement :

- augmente la déformation cyclique moyenne pour d= 0,3.
- la laisse du même ordre de grandeur pour d=0,4, compte tenu des variations de densité des échantillons.
- la laisse du même ordre de grandeur pour d=0,5, compte tenu des variations de densité des échantillons.

Toutes les courbes sont des fonctions croissantes de ln N. Les essais de type B (avec préchargement) présentent de plus une linéarité de ln N. Les essais de types A présentent une courbure plus marquée à partir de 5000 cycles environ (densité 0,3, et 0,4); ils ne peuvent donc pas être assimilés avec justesse à une droite de ln N. On a observé pour ces échantillons une rupture avant le 10 000ème cycle.

Un lissage linéaire par la méthode des moindres carrés a été effectué sur toutes les courbes sous la forme :

$$\epsilon_{moy} = a_0 + a_1 \ln N$$

a_0 : ordonnée à l'origine, représente la déformation moyenne au premier cycle.
a_1 : pente de la droite, représente la vitesse de déformation en fonction de ln N.

Les valeurs de coefficient a_0 et a_1 sont données dans le tableau 5.14 ainsi que les coefficients de corrélation obtenus.

	intitulé	ao	a1	coeff corrélation
d = 0,3	p = 0 d = 0,3	4,98	1,350	0,96
	p = 33 t = 0	11,8	1,050	0,99
	p = 33 t=1sem	12,1	1,630	0,99
d = 0,4	p = 0	3,34	0,430	0,91
	p = 33 t = 0	2,42	0,550	0,99
	p = 33 t=1sem	3,4	0,874	0,97
	p = 33 t=1mois	1,19	0,156	0,96
	p = 33 t = 0	-	-	-
d = 0,5	p = 0	1,47	0,112	0,62
	p = 33 t = 0	0,6	0,056	0,98
	p = 33 t=1sem	1,19	0,156	0,96
	p = 33 t=1mois	0,26	0,074	0,9
	p = 33 t=1mois	1,39	0,0124	0,64
	p = 33 recharg	0,3	0	0,95

tableau 5.14 : lissage linéaire des déformations moyennes.

Les valeurs du coefficient de corrélation montre que le lissage linéaire est correct pour tous les essais avec préchargement (supérieur à 0,95).

On peut donc confirmer l'évolution logarithmique de la déformation cyclique moyenne en fonction du nombre de cycles.

Le matériau Plastbloc subit donc une accommodation importante lorsqu'il est préchargé. Celle-ci est moins rapide lorsque le préchargement n'existe pas et tend vers un phénomène de Rochet lorsque l'on s'approche de la rupture (d=0,3 et d=0,4).

4.2.1.3.Influence du vieillissement

Il s'agit ici de comparer les courbes :

p=33 t=0
p=33 t=1semaine.
p=33 t=1 mois

La figure 5.22 précédente montre que :

- pour d=0,3 ϵ_c (t=0) < ϵ_c (t=1 semaine).
- pour d=0,4 ϵ_c (t=0) < ϵ_c (t=1 semaine) > ϵ_c (t=1mois).
- pour d=0,5 ϵ_c (t=0) < ϵ_c (t=1 semaine) > ϵ_c (t=1mois).

Si un vieillissement d'un mois entraîne bien une diminution de déformation par rapport à celle obtenue à une semaine, il apparait paradoxal que la plus faible des déformations cycliques soit obtenue pour un temps de vieillissement nul.
On s'attendait à un classement décroissant des déformations cycliques en fonction du temps de vieillissement .

Les désordres peuvent provenir de différentes sources :

- surestimation de la déformation de fluage au cours des 18 heures que dure l'essai, pour les échantillons à préchargement non vieilli. Or on remarque sur les courbes donnant la déformation directement mesurée, c'est à dire comprenant le fluage que cet ordre est identique (figure 5.23)

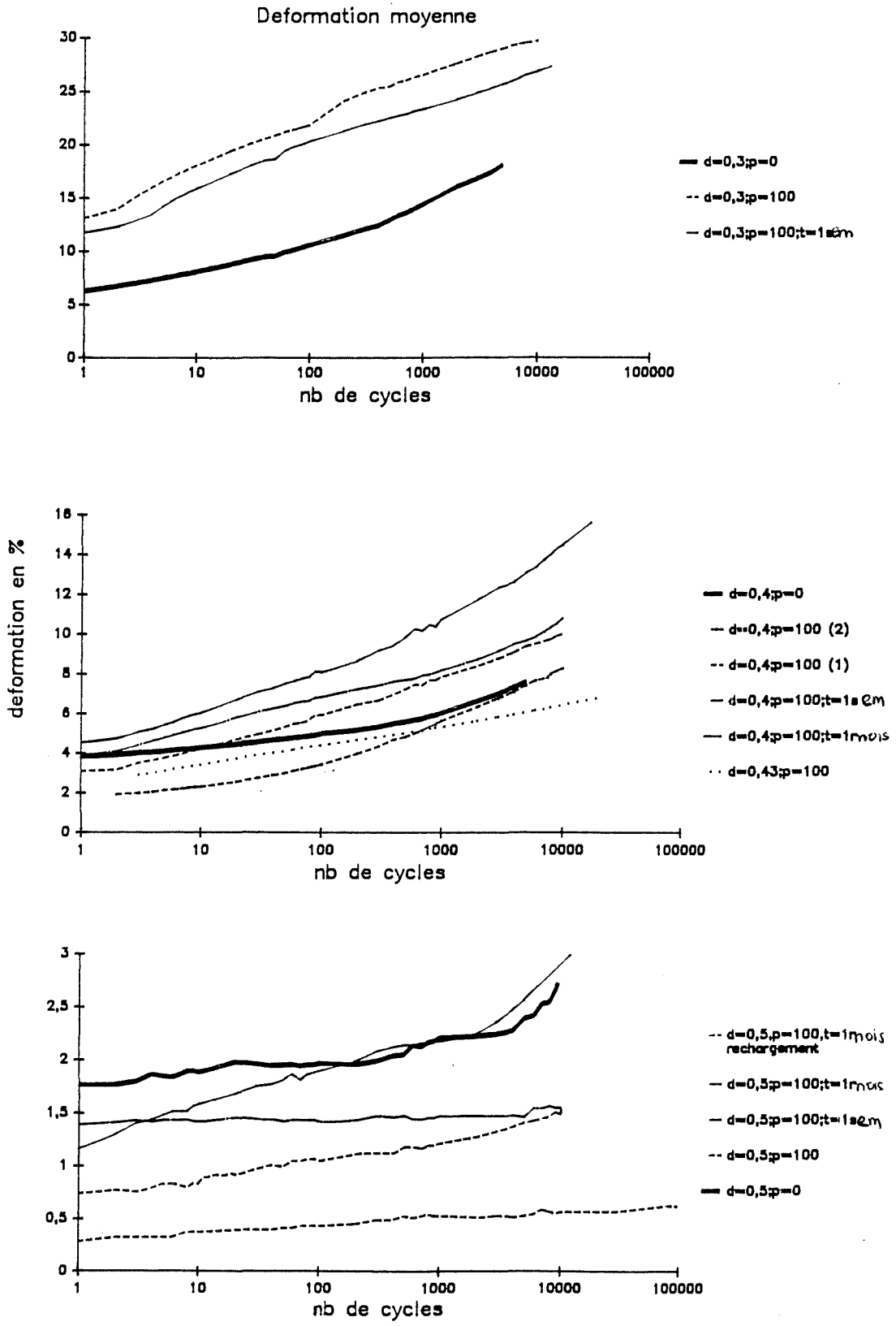


figure 5.23 : déformation moyenne mesurée lors des essais.

- variation de température ambiante entre les essais effectués. Les essais à une semaine ont bénéficié effectivement d'une température supérieure : 28 à 29 °C environ au lieu de 23 à 24°C pour les autres essais. Ceci explique sans doute leur vitesse de déformation plus importante.

- variation de la densité initiale importante au cours du préchargement ; la densité juste avant les cycles des échantillons est donnée dans le tableau 5.15.

	d = 0,3		d = 0,4			d = 0,43	d = 0,5			
	t = 0	t=1sem	t = 0	t=1sem	t=1mois		t = 0	t=1sem	t=1mois	t=1mois
do	0,3	0,287	0,4	0,384	0,377	0,43	0,48	0,48	0,47	0,48
do essai	0,315	0,320	0,41	0,391	0,383	0,44	0,48	0,48	0,47	0,48

tableau 5.15 : densité initiale, juste avant essai des cycles.

On constate effectivement que :
pour la densité 0,4, l'échantillon non vieilli présente une densité beaucoup plus forte que celles des autres de la catégorie.

- défaut de planéité des faces.

Pour la densité 0,5 les différences sont faibles, mais un défaut de planéité des faces de l'échantillon de 5mm peut entraîner une déformation parasite de l'ordre de 2% sur la déformation calculée. L'un des échantillons testé après un mois est sans doute dans ce cas là. Ce type d'erreur n'est pas présent pour les autres échantillons, où l' application du préchargement tasse suffisamment l'échantillon pour atténuer ce problème. En effet aucun des préchargements appliqués n'a entraîné de déformation de cet échantillon de densité 0,5.

En résumé, l'analyse des courbes montre que :

- la déformation moyenne peut être considérée comme une fonction affine de ln N de façon satisfaisante pour les échantillons ayant subi un préchargement.
- l'accommodation du matériau est donc meilleure lorsqu'il existe un préchargement vieilli ou non.

- l'influence du temps de vieillissement est difficilement discernable ; elle est sans doute liée à la densité que l'échantillon accuse juste avant les essais cycliques. On peut malgré tout conclure que le vieillissement atténue la déformation moyenne.
- il semble donc que la densité initiale soit le facteur d'influence majeur en ce qui concerne l'évolution de la déformation cyclique moyenne.

4.2.2.Déformation cyclique maximale et minimale

4.2.2.1.Allure générale

Les déformations cycliques minimales et maximales sont données aux figure 5.24 et 5.25 .

Les nombreux points anguleux observés sur les courbes de la densité 0,5 sont liés à la précision du capteur de déplacement (0,04 % en déformation), et à une fréquence d'échantillonnage trop faible.

Ce sont des fonctions croissantes de ln N. Il y a donc accumulation de déformation minimale pour l'échantillon. Elle indique la densification minimale de l'échantillon au cours des cycles. Cette déformation représente une déformation permanente acquise lors des cycles, compte tenu du temps de repos entre chaque cycle. Le matériau étant viscoélastique une fréquence cyclique plus faible serait sans doute moins préjudiciable pour la déformation minimale.

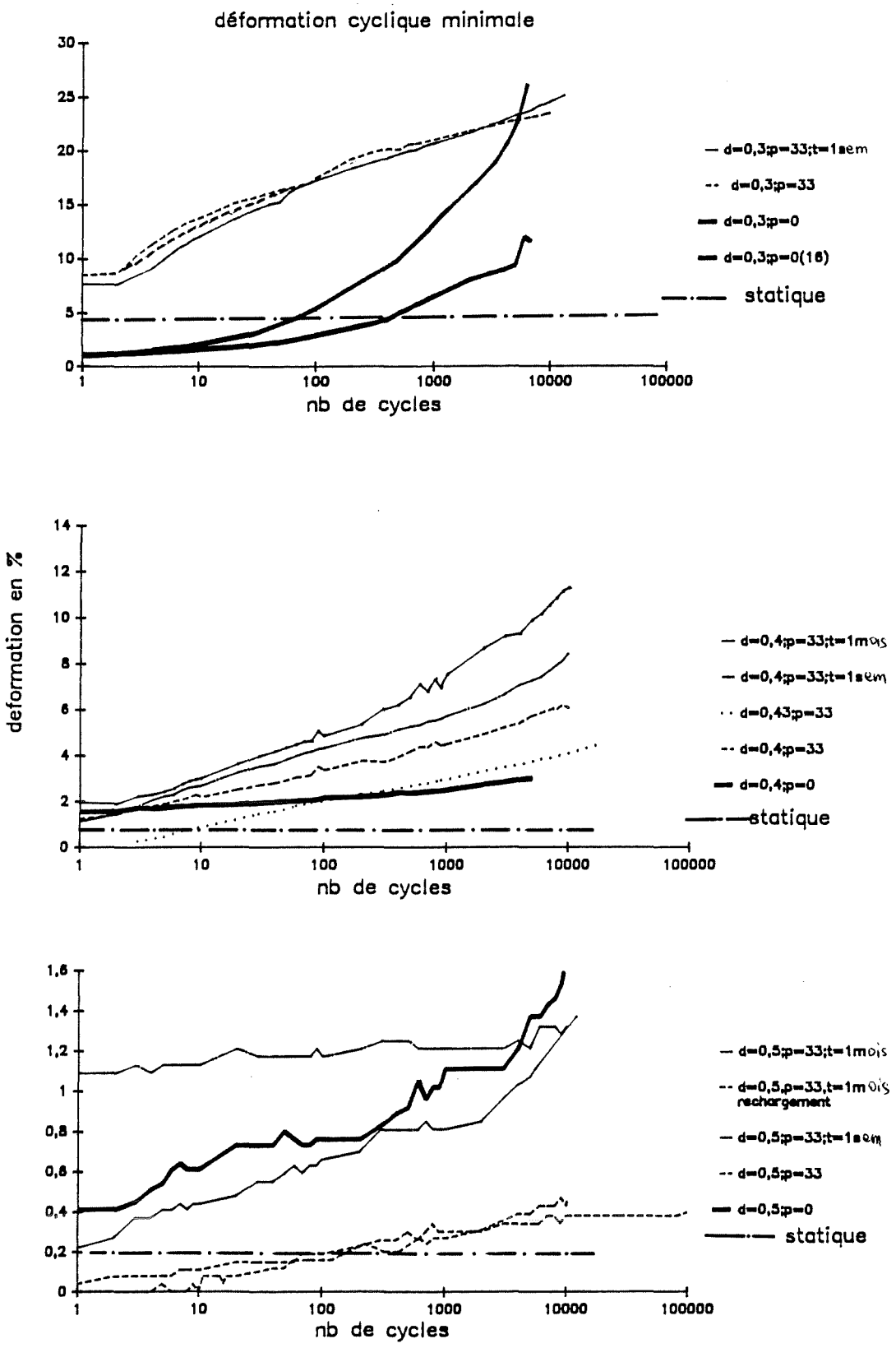


figure 5.24 : déformation cyclique rémanente.

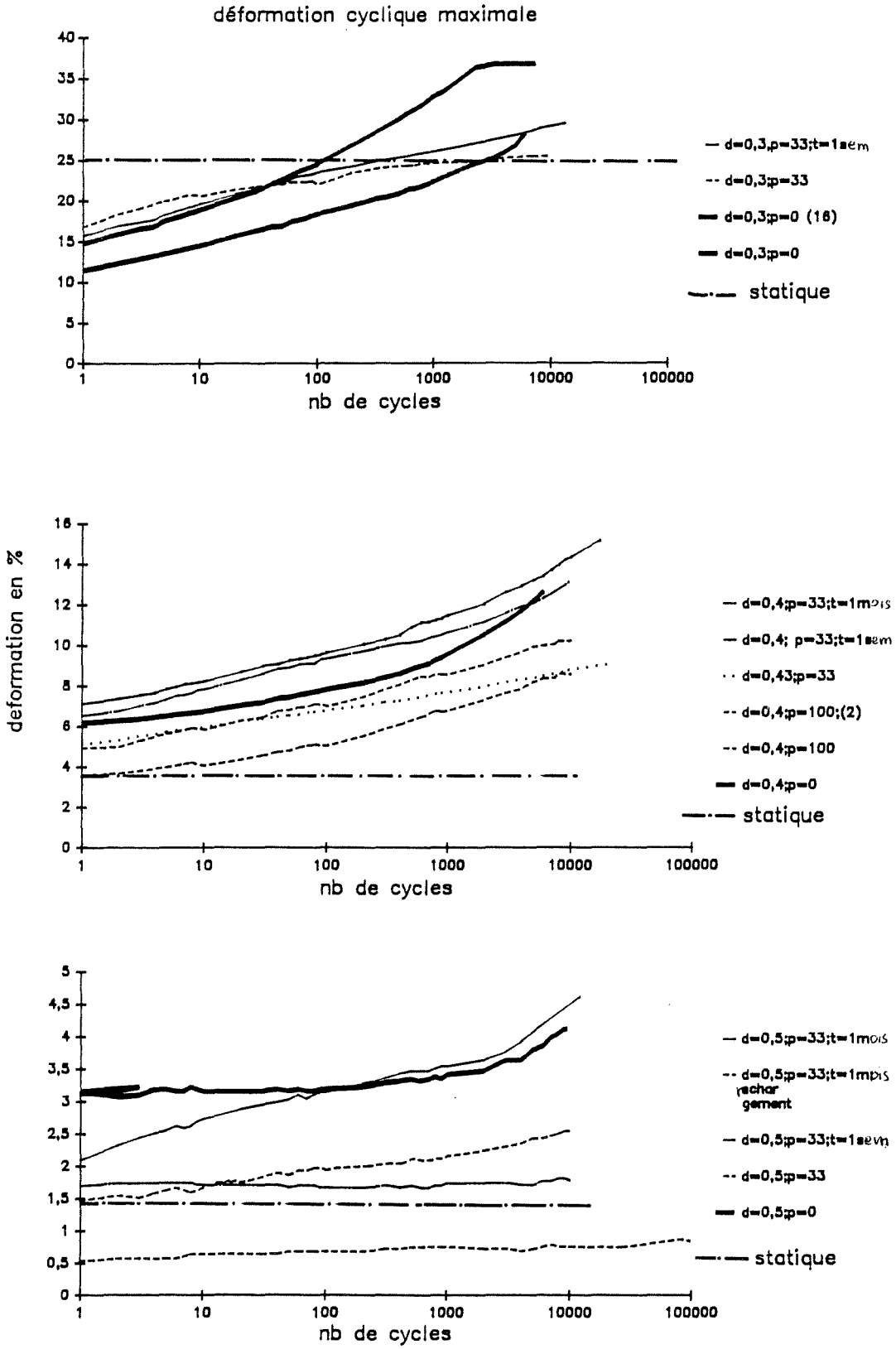


figure 5.25 : déformation cyclique maximale.

4.2.2.2.Influence du préchargement

Comme pour les déformations moyennes, on remarque une évolution linéaire des déformations minimales et maximales lorsqu'il y a eu préchargement. Pour les essais de type A, la déformation minimale présente une courbure marquée en densité 0,3, prenant l'allure d'un phénomène de Rochet à partir de 1 000 cycles.

Les résultats d'un lissage linéaire sous la forme :

$$\epsilon = a_0 + a_1 \ln N$$

sont donnés dans le tableau 5.16 :

intitulé	ε MIN			ε MAX		
	a o	a 1	corré- lation	a o	a 1	corré- lation
p = 0 d = 0,3	0	2,53	0,89	13,02	2,78	0,99
p = 0 d = 0,3	0	1,113	0,85	10,45	1,779	0,981
p = 0 d = 0,4	1,42	0,162	0,96	5,149	0,683	0,895
p = 0 d = 0,5	0,32	0,113	0,92	2,947	0,086	0,7
d=0,3 p=33 t=0	9,82	1,38	0,99	17,49	0,74	0,99
d=0,4 p=33 t=0	0,648	0,51	0,99	4,2	0,591	0,99
d=0,4 p=33 t=0	0	0,474	0,9	2,5	0,576	0,97
d=0,43 p=33 t=0	0	0,344	0,99	5,03	0,27	0,99
d=0,5 p=33 t=0	0,83	0,054	0,96	1,4	0,115	0,97
d=0,3 p=33 t=1sem	7,77	1,086	0,98	16,43	1,401	0,99
d=0,4 p=33 t=1sem	0,47	1,01	0,97	6,34	0,793	0,98
d=0,5 p=33 t=1sem	0,211	0,098	0,95	2,17	0,123	0,97
d=0,4 p=33 t=1mois	0,96	0,734	0,98	0,621	0,685	0,98
d=0,5 p=33 t=1mois	1,08	0,021	0,82	1,69	0	0,9
d=0,5 p=33 t=1mois	0,523	0,015	0,90	0,523	0,149	0,85
d=0,5 rechargt	0,039	0,035	0,95	0,565	0,0228	0,9

tableau 5.16 : lissage linéaire, valeurs de a_0 et a_1.

On constate que les coefficients de corrélation sont meilleurs pour les essais préchargés. L'influence du préchargement semble plus marquée pour les déformations minimales :

Le préchargement entraîne une diminution de la vitesse des déformations maximales et une augmentation de celle des déformations minimales (coefficient a_1). Dans le cas des échantillons de densité 0,4 et 0,5, les déformations minimales évoluent pratiquement parallèlement aux déformations maximales.

Le comportement de l'échantillon de densité 0,3, indique que la quantité d'air expulsée sous σ est importante. Ce qui permet d'interpréter le comportement comme celui d'un alvéolaire avec un grand nombre de cellules ouvertes, et dont les cloisons offrent peu de résistance.

Pour l'échantillon de densité 0,5, il est difficile de distinguer la part de résistance liées aux cloisons qui sont plus nombreuses, de celle de l'air qui peut être totalement emprisonné par les feuilles de plastiques, ces dernières jouant le rôles de cellules fermées.Les mêmes remarques pour la densité 0,4 peuvent être faites.

4.2.2.3.Influence du vieillissement

Les remarques faites lors de l'étude de la déformation cyclique moyenne sont valables également pour ϵ_{cmax} et ϵ_{cmin}.

Le vieillissement influence la déformation au premier cycle : celle-ci diminue en fonction du temps de vieillissement (coefficient a_0), excepté pour un échantillon vieilli un mois sous charge. Ce dernier présente vraisemblablement un défaut de planéité.
La diminution des déformations est observable entre les vieillissements de 1 mois et une semaine, mais celle-ci est sans doute atténuée par les variations de densité initiale des échantillons d'une même catégorie lorsque l'on compare les essais de vieillissement nul et les autres.

4.2.2.4.Comparaison avec un chargement statique

Les valeurs de la déformation obtenue sous le chargement statique exposé au paragraphe 3.1 sont également représentées sur les figures 24 et 25. Elles peuvent être comparées avec les déformations obtenues pour les essais de type A, le préchargement modifiant la déformation maximale.

Compte tenu des ordres de grandeur des déformations qui sont obtenues sur les échantillons de densité 0,5, on pourra admettre que la déformation statique est similaire à la déformation cyclique, qu'il s'agisse des valeurs minimales ou maximales

Pour les deux autres densités, les remarques sont les suivantes :

- densité 0,3 : les déformations cycliques sont plus faibles que les déformations statiques, ce qui est simplement lié au caractère viscoélastique du matériau. Plus la vitesse de sollicitation est grande et plus la déformation est faible.
Compte tenu de la cumulation de déformation, la déformation cyclique devient supérieure à celle obtenue en statique, pour environ 100 cycles (ϵ_{min}) et 5000 cycles (ϵ_{max}).

- densité 0,4 : Les déformations statiques obtenues sont toujours plus faibles que celles des essais cycliques bien que les densités soient identiques.

En résumé,

On peut assimiler les déformations ϵ_{cmax} et ϵ_{cmin} à des fonctions linéaires de ln N de façon satisfaisantes lorsque les échantillons sont préchargés. On confirme donc le caractère accommodant du matériau.
Le préchargement augmente la vitesse de déformation rémanente de façon importante pour les faibles densités ; ce qui indique que le durcissement cyclique observé est lié à l'augmentation de déformation permanente.
Il tend à uniformiser les vitesses de déformation vers une valeur identique pour les densités 0,4.

Le vieillissement a une influence plus difficilement discernable, car elle peut être atténuée par une différence de densité initiale faible ou une variation de température ambiante.
Par contre il permet, à densité initiale rigoureusement identique, de diminuer légèrement la déformation maximale et minimale au cours des cycles.

4.2.3.Amplitude de déformation

Les courbes d'amplitude de déformation en fonction du nombre de cycles sont données à la figure 5.26 .

Les remarques concernant l'amplitude de déformation dépendent directement de ce que nous avons pu observer sur l'évolution du module moyen des cycles au paragraphe 3.2.2.2. En effet, ce dernier est lié à l'amplitude par la formule :

$$E_{moyen} = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{(\epsilon_{max} - \epsilon_{min})}$$

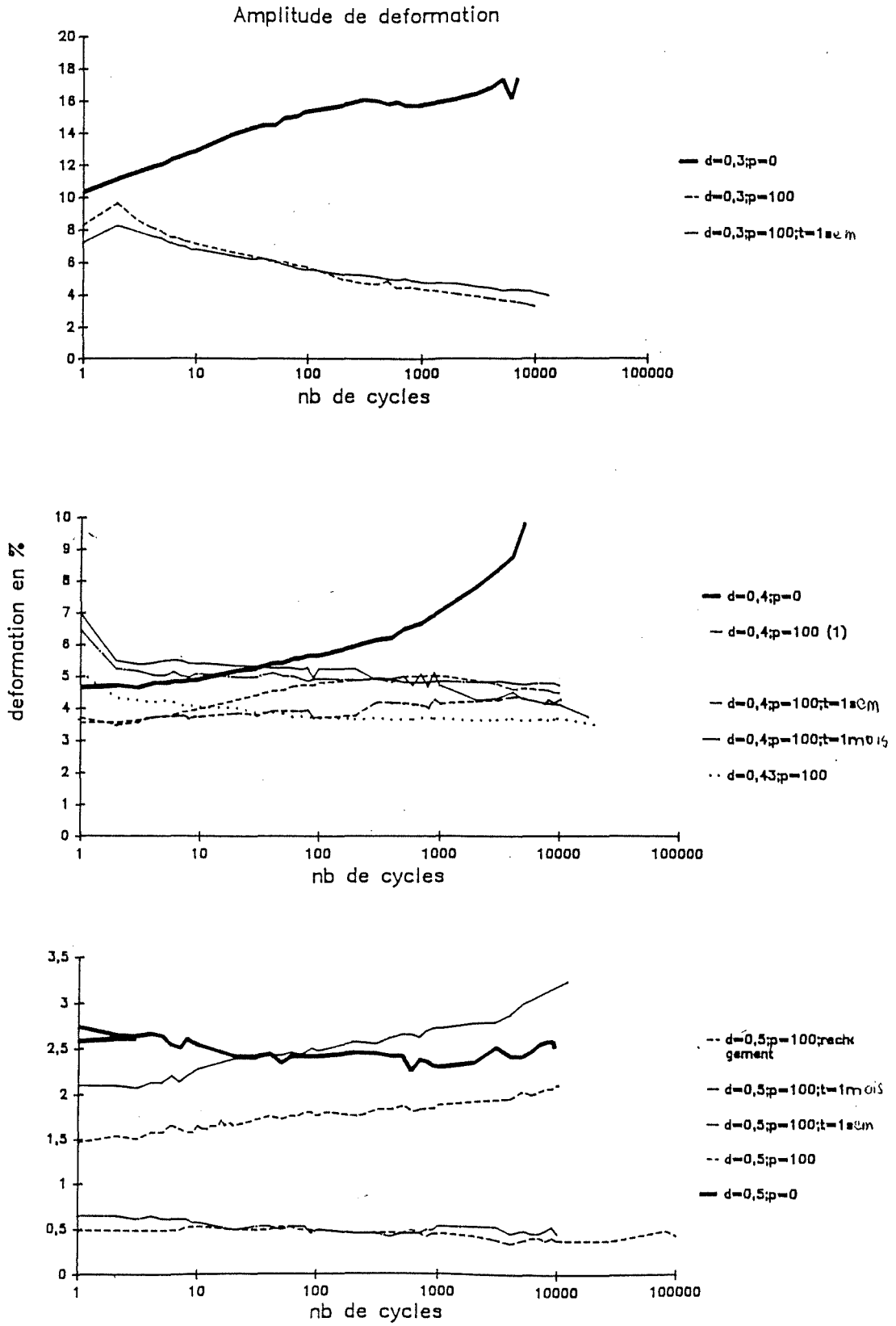


figure 5.26 : Courbe d'amplitude de déformations.

Une augmentation de l'amplitude de déformation entraîne un adoucissement cyclique du matériau tandis qu'une diminution de cette amplitude montre un durcissement cyclique. On retrouve donc les résultats déjà évoqués :

- le préchargement entraîne un adoucissement des échantillons de densité 0,5 et un durcissement dans les autres cas.
- les essais de type A entraîne un adoucissement avec rupture pour les densités 0,3 et 0,4 et un durcissement léger en densité 0,5

Conclusion

L'évolution des déformations au cours des cycles peut être assimilée à une fonction linéaire de ln N lorqu'une surcharge de chaussée est appliquée. Le matériau Plastbloc quelle que soit sa densité initiale présente alors une accommodation cyclique .

La déformation rémanente du matériau est importante et liée à la présence de la charge de chaussée pour les échantillons de faible densité ; elle est à l'origine du durcissement observé dans ce cas.

Le vieillissement a une influence plus faible que celle de la densité de l'échantillon au moment de l'essai, et elle peut donc être atténuée par une variation faible de la densité entre échantillons d'une même catégorie.

D'un point de vue déformation, les échantillons les plus aptes à être utilisés en remblais sont ceux de densité 0,4 moyennant un certain nombre de précautions (trafic peu dense et peu lourd), et surtout ceux de densité 0,5, qui compte tenu de leur forte raideur présentent des déformations compatibles avec la réalité d'un chantier.

5.PREVISION DU COMPORTEMENT D'UN OUVRAGE

Les essais cycliques effectués ont permis d'évaluer le comportement uniquement de la déformation cyclique, et sur un nombre de cycles inférieur à celui réellement subi par un ouvrage réel. En 20 ans une chaussée de classe T_3 reçoit environ 350 000 passages de véhicules lourds, il est donc nécessaire de prévoir le comportement pour un grand nombre de cycles, à partir de nos essais.

Cette prévision dans le temps peut se faire à partir :

Cas n°1 : De l'instant où les blocs sont disposés dans le remblai : il faudrait alors tenir compte de la déformation du bloc dès la pose de la surcharge de chaussée (sol, couche de roulement) et du fluage sous cette charge.

Cas n°2 : De l'instant où la circulation est établie, il convient alors de tenir compte du fluage du matériau sous la charge de chaussée, notamment dans le cas où la circulation est ouverte immédiatement après la fin de la construction. Les déformations dues à l'application de la surcharge sont ajoutées à l'action de la circulation. Ces dernières peuvent être estimées à partir de la loi de comportement en fluage donnée à l'annexe 1 .

C'est ce dernier cas que nous allons chercher à modéliser.

De plus, les résultats des essais précédents ont montré que l'effet du vieillissement est souvent atténué par celui d'une variation faible de la densité. Nous allons donc considérer dans une première approche que l'évolution des déformations moyennes (qui caractérisent le comportement global de l'ouvrage) en fonction du nombre de cycles peut être mise sous la forme :

$$\epsilon_{moy} = \epsilon_{inst} + a_1 (d_{oc}) \ln N \text{ où}$$

ϵ_{inst} est la déformation instantanée de l'échantillon sous la charge de chaussée au moment de la mise en circulation.

d_{oc} est la densité initiale de l'échantillon au moment de la mise en circulation (c'est à dire au moment de l'essai cyclique)

$a_1(d_{oc}) = f(d_{oc})$ est une fonction de la densité d_{oc}

Cette hypothèse est légitime puisque la déformation cyclique est linéaire avec ln N, et que le fluage intervenant au cours de la durée de vie du remblai est également linéaire avec ln N dès lors que l'on connaît la fréquence de passage des véhicules.

5.1.Choix de la fonction $a_1 = f(d_{oc})$

Pour choisir l'allure de la fonction $f(d_{oc})$ nous avons représenté les courbes des coefficients a_1 en fonction de d_{oc}, déterminés par le lissage linéaire des déformations moyennes (paragraphe 4.2.1.). Celles-ci sont données à la figure 5.27 :

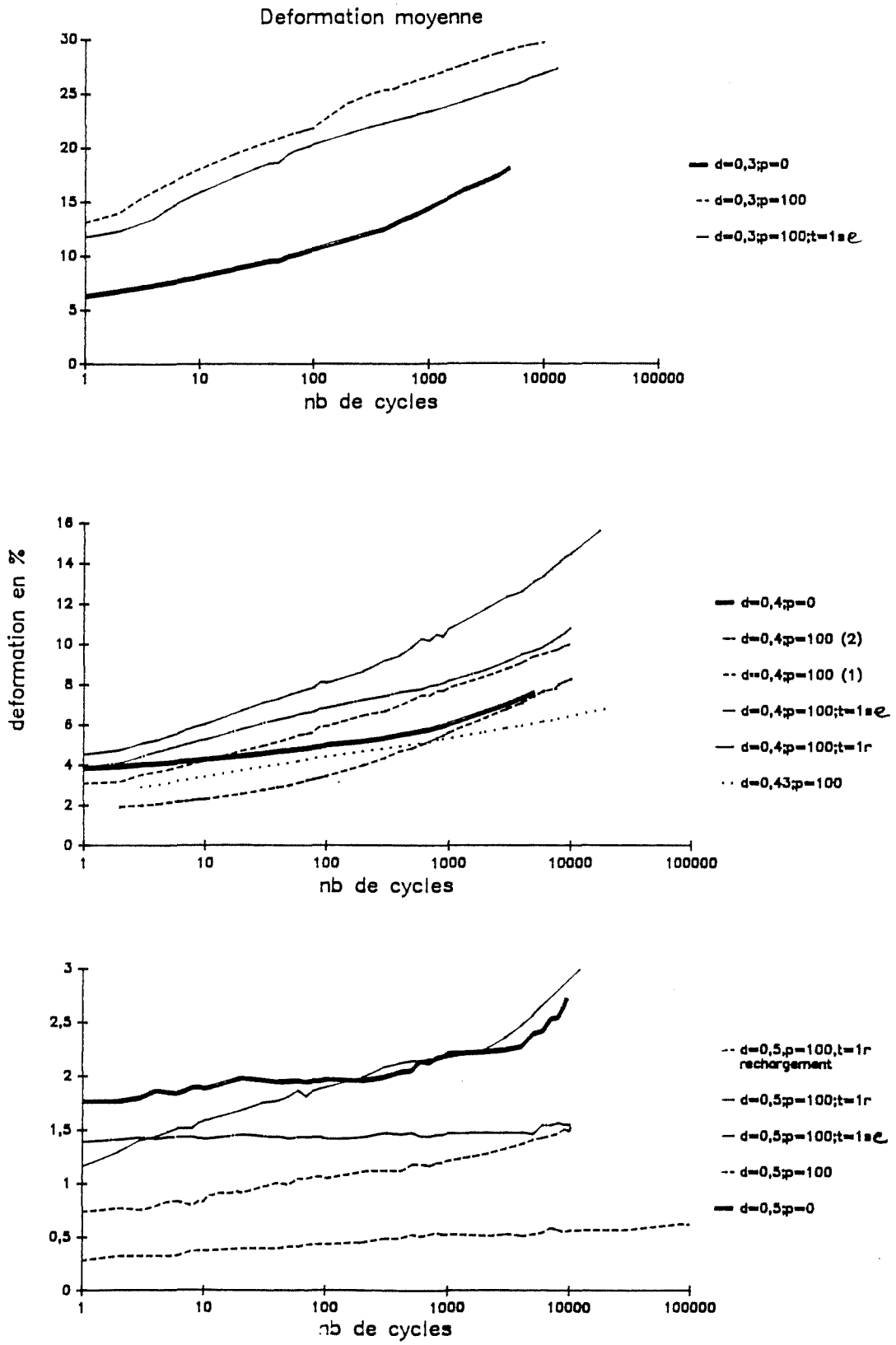


figure 5.27 : évolution de la déformation moyenne.

Il est nécessaire que la fonction $a_1(d_{oc})$ remplissent les conditions suivantes :

- vitesse de déformation infinie (ou très grande) lorsque la densité est proche de 0 :

$$\lim_{d_{oc} \to 0} (f(d_{oc})) = +\infty \text{ ou vers k grand} \qquad (1)$$

- vitesse de déformation estimée nulle lorsque la densité des blocs devient infinie (ou au moins égale à celle du polymère qui le constitue):

$$\lim_{d_{oc} \to \infty} (f(d_{oc})) = 0 \qquad (2)$$

La fonction choisie et répondant aux conditions ci dessus est :

$$f(x) = b \,.\exp(-c\, d_{oc})$$

où b, et c sont des constantes à déterminer.

Cette modélisation peut être valable sur le domaine étudié, à condition de prendre une valeur de b grande.

Par la méthode des moindres carrés, on trouve que :
$b = 200$
$c \approx 14{,}6$

Lorsque d_{oc} tend vers 0, la fonction tend vers 200, ce qui est une valeur suffisamment grande pour être en accord avec (1)

Lorsque d_{oc} tend vers $+\infty$ $f(x) = 2{,}1\ 10^{-4}$ ce qui est suffisamment faible.

Le coefficient ρ^2 est égal à 0,87 et montre une approximation correcte.

5.2.Prevision des tassements

On peut donc prévoir les tassements d'un remblai sous une charge de circulation avec la fonction :

$\epsilon_{moy} = \epsilon_{inst\ moy} + 200 \exp(-14{,}6\ d_{oc}) \ln N.$

La comparaison entre la variation théorique, et les résultats expérimentaux de $a_1 = f(d_{oc})$ est donnée par la courbe de la figure 5.28

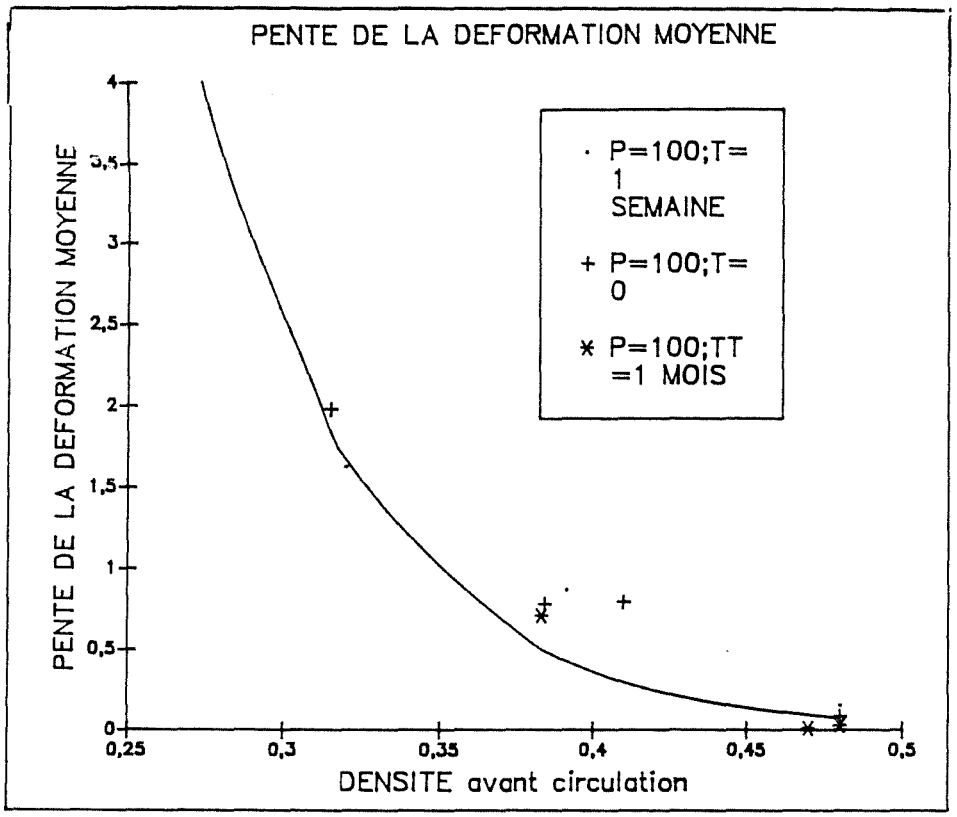


figure 5.28 : courbe théorique de la pente (déformation moyenne) en fonction dela densité avant circulation.

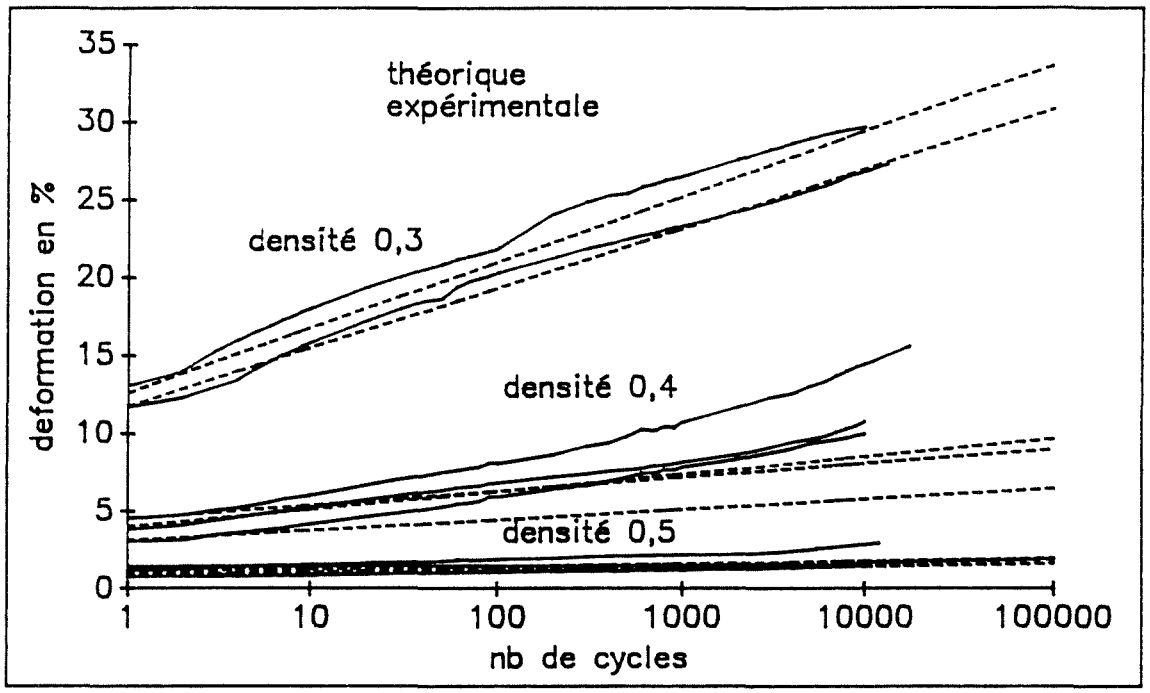


figure 5.29 : déformations moyennes théoriques et expérimentales.

On constate que :
- la modélisation est correcte pour la densité 0,3.
- elle sous-estime les valeurs de a_1 pour la densité 0,4
- elle surestime les valeurs en densité 0,5.

L'application du modèle pour les déformations moyennes mesurées au cours des différents essais est donné à la figure 5.29. On confirme ainsi les remarques faites précédemment.

On constate une bonne corrélation pour les densités 0,4 et 0,5.

Il est possible de prévoir les déformations moyennes d'un remblai pendant sa durée de service. Les classes de trafic sont fonction du nombre de véhicules lourds circulant par jour ; elles sont données au tableau 5.17 avec le nombre de passages correspondant en 20 ans. (JEUFFROY,SAUTERET 84)

La prévision des tassements suivant les différentes classes de trafic possibles de la route est donnée au tableau 5.18. Les estimations pour des routes très fréquentées ne sont pas données, car elles ne sont pas du domaine du réalisable. Les déformations expérimentales sont obtenues par extrapolation des courbes obtenues en laboratoire.

classe de trafic	T1	T2	T3	T4	T5
nombre de passages en millions	5,96	2,2	1,9	0,36	0
période de passage	105s	286s	340s	1752s	-

tableau 5.17 : classes de trafic.

Classe Trafic	T2	T3	T4	do
ε théorique (%)	35	34,3	32,4	0,3
ε expérimental	25,45	24,7	23	
ε théorique (%)	8,25	8,1	7,5	0,4
ε expérimental	11	10,6	10	
ε théorique (%)	1,92	1,87	1,76	0,5
ε expérimental	1,17	1,14	1	

tableau 5.18 : prévision des déformations suivant la classe de trafic de la route.

On constate que les déformations obtenues pour un remblai en densité 0,3 sont beaucoup trop importantes pour permettre une telle construction, qu'elle que soit la classe de trafic. Celles de la densité 0,4 encore importantes, d'autant plus que notre modélisation les sous estime fortement. Par contre les blocs de densité 0,5 se comportent suffisamment bien pour être utilisés sous les trois classes de trafic moyen. Remarquons que la période de nos sollicitations est de l'ordre de 5 à 6 secondes. Elle est beaucoup plus faible que celle de n'importe quelle sollicitation de chaussée à fort trafic.

La déformation de fluage sous charge statique avant la mise en circulation, qui s'ajoute à celles du tableau 5.18, est assez faible, et n'affecte pas de façon sensible les

résultats du tableau 5.18. Pour une densité d=0,4, il faudrait ajouter 2.8 % de déformation statique pour un vieillissement de 1 mois (2,6 % pour une semaine).

Notons que nos essais n'ont été effectués que jusqu'à 10 000 cycles (100 000 pour un des échantillons de densité 0,5) aussi faut-il prendre avec beaucoup de précautions les estimations faites pour des classes de trafic dense. Par mesure de sécurité, en attendant que des essais sur un plus grand nombre de cycles soit effectués, il vaut mieux réserver l'usage du Plastbloc pour les classes T5 (pas de véhicules lourds) ou T4 pour la densité 0,4, et éventuellement T3 pour la densité 0,5.

Conclusion

Les prévisions de déformations ci-dessus laissent penser que l'utilisation de Plastbloc est parfaitement possible pour une densité de 0,5. En effet les plus faibles densités présentent à notre avis un comportement insuffisamment rigide. Néanmoins des études complémentaires concernant l'influence de la fréquence de trafic sont nécessaires. Le matériau étant viscoélastique, nos estimations sont effectuées à partir d'un profil de circulation très défavorable (même un trafic de classe T0 n'a pas une fréquence de sollicitation aussi forte). Seule l'instrumentation d'un remblai réel et un suivi sur une longue période peut offrir une modélisation correcte. Des compléments d'essais de laboratoire doivent être faits pour des temps de repos différents entre chaque chargement, pour montrer l'influence de la fréquence de sollicitation.

CONCLUSION GENERALE

Le travail mené sur le procédé Plastbloc a permis de confirmer les premières études de laboratoire concernant la faisabilité du procédé Plastbloc.

La construction du remblai expérimental a permis de montrer que les tassements différés d'un tel ouvrage, bien que supérieurs à ceux d'un ouvrage classique, peuvent être diminués de façon importante en optimisant le choix de la densité des blocs en apportant quelques soins à leur fabrication. Il est en effet impératif d'obtenir une fabrication plus homogène, tant en densité qu'en dimension, des blocs.

Nous avons également confirmé la possibilité d'une utilisation de Plastbloc à l'arrière de mur de soutènement. L'action du remblai sur un écran est du même ordre de grandeur que celle de la action des terres. Mais dès lors qu'un espace d'une vingtaine de millimètres est laissé entre l'écran et le bloc, cette action peut être pratiquement annulée.

Les essais de laboratoire ont permis d'étudier la validité en service du procédé.

Les essais de frottement effectués ont montré que le coefficient de frottement apparent μ^* était dépendant de la contrainte appliquée ; lorsque celle-ci augmente μ^* tend vers une valeur minimale .

Ces essais ont également permis d'apprécier la stabilité au glissement d'un ouvrage . Les risques de glissements se situent essentiellement entre :

- le remblai et le sol support ($\mu^* = 0{,}55$).
- les différentes couches de blocs ($\mu^* = 0{,}62$).

Les risques de cisaillement d'un bloc sont peu plausibles ($\mu_c^* = 0{,}9$).

L'étude de la stabilité au glissement nous a également permis de proposer une méthode simple de prédimensionnement. Obtenue dans un cas très défavorable, elle entraine une surestimation et mériterait d'être affinée.

Les essais de comportement sous charges cycliques ont été menés dans le but de connaître l'évolution du matériau sous une circulation de trafic lourd. Elles ont été faites dans un cas de fréquence de trafic très défavorable, et il résulte que :

- la présence d'une charge de chaussée statique sur les blocs est indispensable pour obtenir une stabilisation des déformations des blocs en fonction du nombre de cycles.

- l'influence du temps de vieillissement sous charge statique est difficile à discerner devant celle du paramètre densité initiale : une très faible variation de densité entraine un changement important du comportement.

- il est possible de faire des prévisions en considérant simplement un gain de densité du matériau, dû soit au vieillissement, soit au préchargement.

Ces prévisions de déformations ont montré que le matériau de densité 0,5 est le plus apte à être utilisé en ouvrage réel jusqu'à un trafic de type T_3. Il convient en effet d'éliminer le matériau de densité 0,3 d'une utilisation en remblais circulés. La densité 0,4 peut être utilisée moyennant quelques précautions : trafic faible, chaussée rigide...

Pour compléter cette étude il serait intéressant de construire un ouvrage réel que l'on pourrait instrumenter. Il permettrait tout d'abord de confronter les résultats obtenus en laboratoire avec des résultats réels. De plus notre étude n'a pas concerné le comportement d'un sol support compressible sous un remblai Plastbloc. Un telle construction permettrait de combler cette lacune, et serait l'aboutissement du travail de recherche effectué. Bien des domaines n'ont pu être abordés comme la perméabilité du matériau Plastbloc, ou encore son comportement au choc, ce qui permettrait de valider d'autres utilisations comme la protection contre les chutes de blocs, ou l'absorption des vibrations

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

AABφE R. - Norvegian experience with expanded polystyrene as a light weight fill material in road embankments, Norvegian road research laboratory,1986.

AMAR S., BAGUELIN F., CANEPA Y. - Comportement des fondations superficielles sous charges cycliques.Bulletin de liaison du L.C.P.C. n°149, mai- juin 1987 p23- 29.

ANRED. - Déchets en france les chiffres clefs janvier 91 27p

ASHBY M.F., JONES D.R.H. - Materiaux, tome 1: propriétés et application , Dunod, 1991, 278p.

ASHBY M.F, JONES D.R.H. - Materiaux, tome 2:Microstructure, Dunod, 1991, 384p.

BARKSDALE R.D. - Compressive stress pulse time in flexible pavement for use in dynamic testing., Highway research record n°345, p32- 44.

BAUCHARD M. Perspectives d'utilisation des machefers d'incinération d'ordures ménagères en techniques routières. Bulletin de liaison du L.C.P.C. n°90, juillet- août 1977 p21- 28

BENSE p. - Pneumatiques usagés. Journées bilan de l'action de recherche n°36 Laboratoire Régional du Bourget 4- 5 mai 1983, p 375- 385

BESSINEAU D. - La récupération des plastiques en France- Conférence Européenne " le recyclage des déchets de matières plastiques" Paris, 9- 11 mars 1988 ,p 55- 57.

BOISDON V. - Les écopoubelles débarquent à Dunkerque. Le transformeur, n°3, mars 1990, p 6- 11.

BOUCHER J.C. - Le recyclage de plastiques usagés par CEP ADOUR industries.Conférence Européenne " le recyclage des déchets de matières plastiques" Paris, 9- 11 mars 1988 ,p 202- 207.

BRUYNSEES G. - Collecte selective et recyclage des matériaux. Conférence Européenne sur les emballages plastiques. Bruxelles, 2- 3juin 1986, compte rendu intégral ,p67- 69.

BUEKENS A.G. PATFOORT G. VANDERNEERSCHEN A. - Les systèmes de collecte et de tri de déchets de matières plastiques et les problèmes à résoudre pour optimiser les technologies. Conférence Européenne " le recyclage des déchets de matières plastiques" Paris, 9- 11 mars 1988 ,p 96- 121.

CAQUOT A. KERISEL J. ABSI E. - Tables de Action et de Butée Gauthier Villard, 1935,177 p

CARTIER L. LONG N.T. - Déchets urbains et pneumatiques usagés en génie civil. XIC SMFE session 12 , Stockholm 1981, p 62- 65.

CASTAGNY G. Principes et méthode de l'hydrogéologie.Dunod Université ,1982 , 236p.

CHAZAL p. - Les techniques de remblais : innovation dans les techniques de la route - Paris 28- 30 oct. 1985. Revue Générale des Routes et Aérodromes n°628, mars 1986.

CLAERBOUT L. SOLVAY G. - Le recyclage physique des bouteilles usagés en p.V.C. , revue RIA, decembre 1988, p 34- 36.

COULET C., DAUDON D., EL GHOCHE H., RAKOTONDRAMANITRA J.D. - Valorization of waste plastic material by insertion into Civil Engineering Earthworks the 7th international conference on solid waste management and secondary materials, Philadelphia, USA, 10- 13 december 1991.

COULET C., DALI-BRAHAM M., PERRIN J. - Un procédé de renforcement de sols : Plasterre- Conférence Européenne " le recyclage des déchets de matières plastiques" Paris, 9- 11 mars 1988 ,p 208-225.

CRHETIEN C. - Les actions du GECOM dans la valorisation des emballages et dans le recyclages des déchets de matières plastiques - Conférence Européenne " le recyclage des déchets de matières plastiques" Paris, 9- 11 mars 1988 ,p 208-225.

DALI-BRAHAM M. - Renforcement des sols par des nappes d'éléments souples et discontinus : étude du procédé Plasterre. Thèse de Doctorat. Université Lyon 1. juillet 1989.

DAUDON D. - Etude expérimentale en vraie grandeur d'un remblai allégé en blocs de déchets de matières plastiques". "Concours jeunes chercheurs 90" organisé par l'AUGC 11 mai 90 Cergy Pontoise.

DAUDON D., COULET C., EL GHOCHE H., - Low weight plastic waste embankments. GEO COAST 91 , 3- 6 sept 1991. Yokohama Japon.

DELAVELLE C. - Bilan sur la valorisation des Plastiques usagés dans la CEE -. Conférence Européenne " le recyclage des déchets de matières plastiques" Paris, 9- 11 mars 1988 ,p 14- 25.

DEQUEANT J. - Déchets subir ou maîtriser " Le moniteur des travaux publics , 22 février 1991, p 52- 53.

DESAGE J.P., JEANCENELLE R., LECLERC G., PERRIER H. - Utilisation de blocs de polypropylène pour la refections d'un remblai d'accès : Pont de Larivot en Guyanne. Revue générale des routes et aérodromes, n°646, novembre 1987, p 32-40

DORLOT J.M., BAILON J.P., MASOUNAVE J. - Des Materiaux, 1986, 467 p.

EL GHOCHE H. -Rapport de DEA sept 1988.

EL GHOCHE H. -thèse de Doctorat à paraître en sept 1992.

EL GHOCHE H., COULET C., DAUDON D. - Plastic waste for low- weight embankments. Specialty Conference on Grouting Soil Improvement and Geosynthetics, New Orlans, USA, 25- 28 fevier 1992.

EL GHOCHE H., DAUDON D., COULET C. - Study of the Plastbloc process : search for a law of behavior for low- weight embankment. 9ème Conference nationale de geotechnique 11-13 octobre 1990 Cracovie, Pologne .

FAMECHON R. - Recyclage des bouteilles p.V.C. par voie humide. Conférence Européenne " le recyclage des déchets de matières plastiques" Paris, 9- 11 mars 1988 ,p 173- 176.

FORGES S. ,GRANGER V. - Déchets :la prochaine révolution industrielle ? Presences (magazine de la chambre de commerce et d'indudtrie de Grenoble) n°40 septembre 1991 p 47- 49.

GIDLEY J.S., SACK W.A. - Environemental aspects of waste utilization in construction. Journal of Environemental Engeneering, vol 110, n°6, december 1984 p 1117- 1133.

GOBRON p.L. - ART- ET/1, un procédé de recyclage des thermoplastiques mélangés. Caoutchouc et Plastiques ,n°685, mars 1989, p 63- 65.

HAMADA E.,YAMANOUCHI T., - Mechanical properties of expanded polystyrene as a lightweight fill material. 9ème southeast asian geotechnical conference, Bangkok, Thailand, 7- 11 december 1987, p9.35- 9.48

GOURC J.P., - Quelques aspects du comportement des Géotextiles en Mécanique des Sols. Thèse d'état U.S.M.Grenoble. 1982.

HAMEAU G. DRUON M. - Préparation de liants hydrocarbonnés à partir de p.V.C. de récupération. Bulletin de liaison du laboratoire central des ponts et chaussée.n°80, nov.dec. 75, p 35- 37.

HERTZBERG R.W., MANSON J.A. Fatigue of Engineering Plastics. Academic Press, 1988, 300 p.

HILYARD N.C. - Mechanics of cellular plastics. Macmillan ed. 1982, 401 p.

HIRT R. - Emploi des scories d'incinérations des ordures ménagères comme matériau routier.Strass und Verkehr. 10- 14 oct 19754. p421- 427.

JEUFFEY G. SAUTERET R. cours de routes, dimensionnement des chaussées. Presses de l'ENPC. 1984.

LEFAUCHEUX p., Les monstres et les déchetteries, Le transformeur , Anred 1985, 15 p.

LEMAITRE J. CHABOCHE J.L. - Mécanique des matériaux solides. Dunod., 1988, 544 p.

LONG N.T. - Le Pneusol. Rapport de laboratoire ,serie Géotechnique juillet 1985, 36 p.

LUCAS J., REQUIRAND R., SOUPLET.R - Un carrousel pour l'étude des dégradations provoquées par les pneux à crampons. Bulletin de Liaison du L.C.P.C. n°77, mai- juin 1975 p23- 28.

MAES M. - 1990, l'apanage du recyclage - L'eau , l'industrie, les nuisances - n°134, fevrier 1990 ,p 23- 26.

MAGNAN J.P. - Recommendations pour l'utilisation du polystyrène expansé en remblai routier. LCPC. SETRA. 1990.

MAGNAN J.P. SOYEZ B. - Principes des remblais allégés. Contraintes d'emplois du polystyrène. Bulletin de Liaison du L.C.P.C. n°136, mars avril 1985 p9- 13.

MAGNAN J.P., SERRATRICE J.F. - Propriétés mécaniques du polystyrène expansé pour ses applications en remblai routier. Bulletin de liaison du L.C.P.C. n°164, nov- déc 1989, p25- 31.

MAIRE A.M. - La Savoie roule plus vert. Lyon liberation 31 janvier 1991 p5.

MARCHAL J. BARGILLAT R. CHARLET p. - Utilisation des pneumatiques dans les ouvrages en terre, étude du procédé breveté Pneurésil. Rapport du CETE Lyon FAER n °1- 36- 10- 6, sept.1989, 27 p.

NAVARRO A., - De la création des produits à la gestion des Déchets" 1er séminaire Rhône Alpes de la Recherche en Génie Urbain.Lyon 2- 3 juillet 1991 16p.

O.C.D.E. - Construction de routes sur sols compressibles. Publication du programme de recherche routière de l'OCDE. 1979.

PLASTBLOC Brevet européen déposé sous le n°enregistrement 89 420 476-7

PLASTERRE Brevet français "Déchets Plastique sd" publié sous le n° de publication n°2610960

PUIATTI D. - Traitement du phosphogypse au ciment pour réutilisation en couche de forme. Bulletin de Liaison du L.C.P.C. n°spécial VII, novembre 1978, p123- 131

RAKOTONDRAMANITRA J.D., COULET C., DALI BRAHAM M. - Renforcement de sol par nappes de déchets plastiques. 1er seminaire international sur la valorisation des déchets industriels.1988 Annaba Algérie.

RIBOULET J.N. - Comportement hydrodynamique et mécanique des sols supports de chaussée, Thèse de Docteur- Ingénieur. INSA Lyon, 1977, 180 p.

RIONDY G. - Geotextiles et comportement à la fatigue des chaussées non revêtues, thèse de Docteur Ingénieur , INPG Grenoble, 1985 250 p

RONCIN B. - Contribution à l'étude du comportement des enduits superficiels. Le "manège total", simulateur de trafic lourd. Bulletin de laison du L.C.P.C.n°114,juillet- aout 1981 p61- 68.

SAMONO J. - Procédés d'utilisation des déchets plastiques en technique routière. Conférence Européenne " le recyclage des déchets de matières plastiques" Paris, 9- 11 mars 1988 ,p 137- 144.

THANOPOULOS I. - Contribution à l'étude du comportement cyclique des milieux pulvérulents.thèse de Docteur- Ingénieur, INPG, Grenoble, 1981 205 p.

VAUTRIN J.C. - Utilisation des déchets et sous-produits en technique routière en France. Premier séminaire international sur la valorisation des déchets industriels. Université d'Annaba. Algérie, 20- 23 octobre 1986.

VERT M. - Biodégradables : réalité et perspectives. Caoutchouc et Plastiques n °706,juin juillet 1991, p71.

VIVIER M. - Les remblais en cendres volantes dans la Région du Nord. Bulletin de liaison du L.C.P.C.. n°54,août- sept 1971, p61- 67.

ANNEXE 1

A partir des essais de fluage décrits en partie au paragraphe 5, EL GHOCHE a montré que les déformations peuvent être mises sous la forme :

$$\varepsilon = \varepsilon_{inst} + a \ln t$$

où

$$\varepsilon_{inst} = 1 - d_o / d_i.$$

d_o = densité initiale de l'échantillon .
d_i = densité instantannée.

$$d_i = \frac{A}{\sigma + B} + d_p$$

$$A = B^2 \, tg\left(\frac{d_p - d_o}{d_o^n + \frac{2d_p}{\pi}} \right)$$

$$B = \frac{d_p - d_o}{tg\left(\frac{d_p - d_o}{d_o^n + 2 d_p / \pi} \right)}$$

$n = -19{,}2849\, d_o + 4{,}7251.$
d_p = densité du polyéthylène pur (0,94).

$$a = \frac{d_p - d_o}{d_o} \left((\sigma + 1)^k - 1 \right)$$

σ = contrainte normale appliquée.

k tel que :

si $d_o <= 0{,}5$ $k = -0{,}04825\, d_o + 0{,}02462.$
si $d_o > 0{,}5$ $k = -0{,}001136\, d_o + 0{,}001068$

ANNEXE 2

glissement sur le sol support					ß=ϕ				
H (m) =	1	Poids sol (kN/m3) =			20	So(m²)=	0.84		
h (m) =	1.2	Poids bloc (kn/m3) =			4	μ=	0.62		
		Poids chaussée (kn/m3) =			20				
ϕ =	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Kay =	1.044	1.021	0.979	0.922	0.85	0.767	0.676	0.58	0.482
p									
1	6	6	6	6	5	5	4	4	3
2	12	12	12	11	10	9	8	7	6
3	19	19	18	17	16	14	12	11	9
4	26	26	25	23	22	19	17	15	12
5	34	33	32	30	28	25	22	19	16
6	42	41	39	37	34	31	27	24	20
7	50	49	47	44	41	37	33	28	23

glissement sur bloc					ß=ϕ				
H (m) =	1	Poids sol (kN/m3) =			20	So(m²)=	0.84		
h (m) =	1.2	Poids bloc (kn/m3) =			5	μ=	0.55		
		Poids chaussée (kn/m3) =			20				
ϕ =	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Kay =	1.044	1.021	0.979	0.922	0.85	0.767	0.676	0.58	0.482
p									
1	7	7	6	6	6	5	5	4	3
2	13	12	12	11	10	9	8	7	6
3	19	19	18	17	16	14	13	11	9
4	26	26	25	23	22	20	17	15	12
5	34	33	32	30	28	25	22	19	16
6	41	40	39	36	34	30	27	23	19
7	49	48	46	43	40	36	32	27	23

glissement sur bloc					ß=-ϕ				
H (m) =	1	Poids sol (kN/m3) =			20	So(m²)=	0.84		
h (m) =	1.2	Poids bloc (kn/m3) =			5	μ=	0.55		
		Poids chaussée (kn/m3) =			20				
ϕ =	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Kay =	0.639	0.513	0.413	0.333	0.267	0.213	0.168	0.131	0.1
p									
1	4	4	3	3	2	2	2	1	1
2	8	7	5	4	4	3	2	2	2
3	12	10	8	7	5	4	4	3	2
4	16	13	11	9	7	6	5	4	3
5	21	17	14	11	9	7	6	5	4
6	25	20	17	13	11	9	7	6	4
7	30	24	20	16	13	10	8	7	5

glissement sur le sol support					ß=-ϕ				
H (m) =	1	Poids sol (kN/m3) =			20	So(m²)=	0.84		
h (m) =	1.2	Poids bloc (kn/m3) =			5	μ=	0.62		
		Poids chaussée (kn/m3) =			20				
ϕ =	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Kay =	0.639	0.513	0.413	0.333	0.267	0.213	0.168	0.131	0.1
p									
1	4	3	3	2	2	2	1	1	1
2	7	6	5	4	3	3	2	2	2
3	11	9	7	6	5	4	3	3	2
4	15	12	10	8	6	5	4	3	3
5	19	15	12	10	8	7	5	4	3
6	23	18	15	12	10	8	6	5	4
7	27	22	17	14	11	9	7	6	5

ANNEXE 3

ANNEXE 3 : GENERALITE SUR LES ESSAIS CYCLIQUES

La répétition de sollicitations mécaniques sur un matériau peut conduire à sa rupture. Les phénomènes liés à ce comportement ne sont pas identiques à ceux observés lors de sollicitations statiques. Leur compréhension fait appel à des études spécifiques en chargements répétés : la fatigue .

On va définir succinctement les termes généralement employés , ainsi que les phénomènes observes les plus courant.

Un essai de fatigue est caractérisé par un sollicitation moyenne constante et une sollicitation périodique ou aléatoire. (figure A3.1)

En laboratoire, on utilise des sollicitations idéales qui varient sinusoidalement ou triangulairement en fonction du temps (figure A3.2 et figure A3.3).

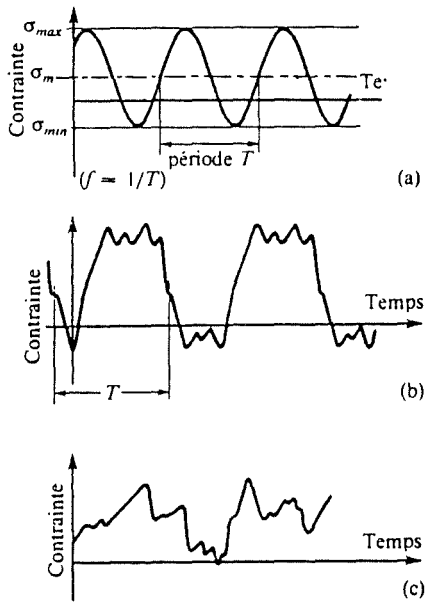


figure A3.1

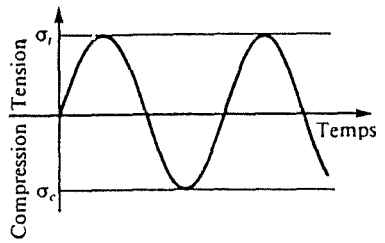


figure A3.2

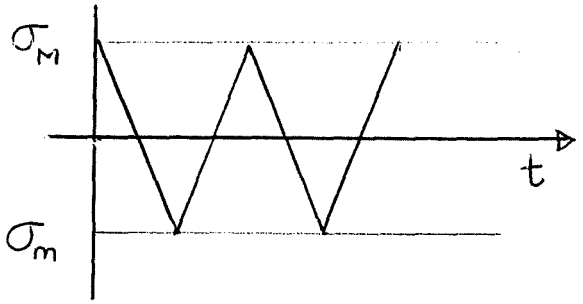


figure A3.3

Dans ce cas, les variables qui caractérisent l'essai sont:

σ_{max}, σ_{min}, σ_{moy}, σ, ϵ_{max}, ϵ_{min}, ϵ_{moy} , ϵ (figure A31.4)

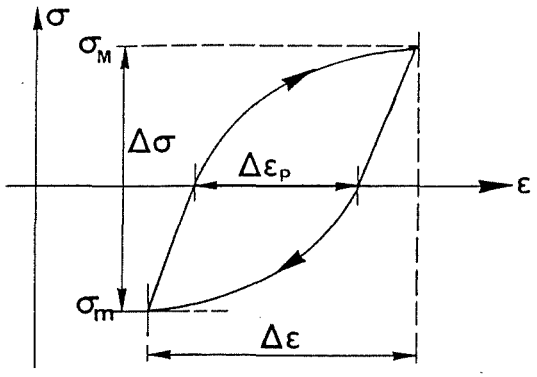


figure A3.4

σ_{max} , σ_{min} (resp. ϵ_{max} , ϵ_{min}) sont les contraintes (resp. déformations) maximales et minimales atteintes .

L'amplitude de contrainte (resp.deformation)

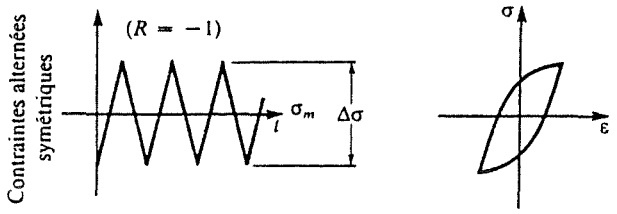
$$\sigma = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$$
$$\epsilon = (\epsilon_{max} - \epsilon_{min})/2$$

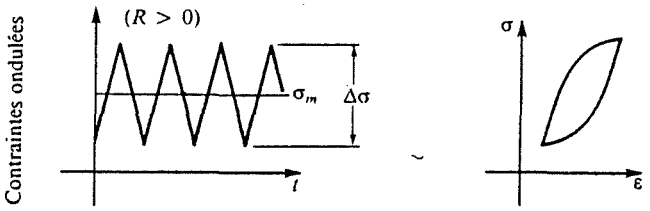
la contrainte moyenne (resp. déformation moyenne)

$$\sigma_{moy} = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$$
$$\epsilon_{moy} = (\epsilon_{max} + \epsilon_{min})/2$$

Les sollicitations généralement utilisées dans les études expérimentales peuvent être:

- symétriques (figure A3.5)
- alternées (figure A3.5)
- répétées(figure A3.5)
- ondulées (figure A3.5)





(a) (b)

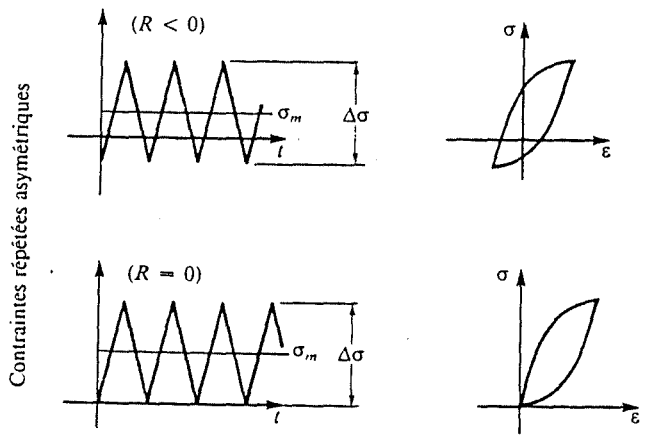


figure A3.5

Sous l'effet de sollicitations cycliques alternées les propriétés du matériaux se modifient et les principaux phénomènes observables sont les suivants:

- durcissement cyclique: (figure A3.6)

C'est la diminution de l'amplitude de déformation au cours des cycles lorsque la contrainte est imposée, ou l'augmentation de la contrainte lorsque la déformation est imposée

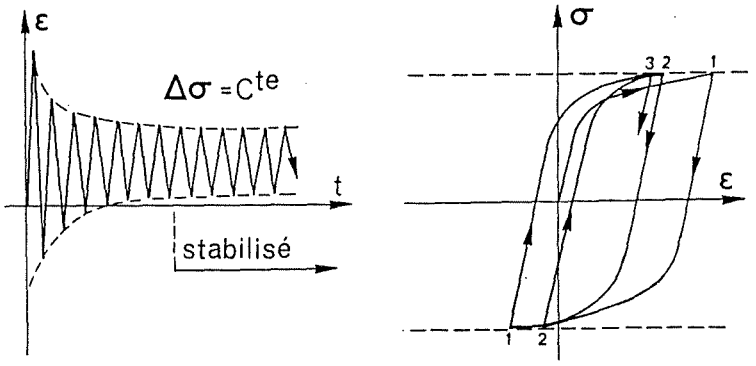


figure A3.6: durcissement cyclique(contrainte imposée).

- adoucissement cyclique ,phénomène inverse du durcissement (figure A3.7):

C'est l'augmentation de la déformation au cours des cycles , lorsque la contrainte est imposée, ou la diminution de la contrainte lorsque la déformation est imposée

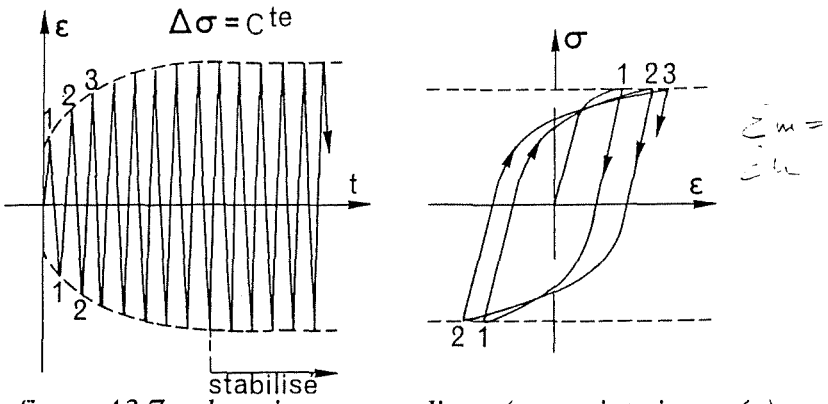


figure A3.7: adoussicement cyclique (contrainte imposée).

Lorsque le chargement n'est pas purement alterné, ce qui est notre cas, d'autres phénomènes peuvent se superposer:.

* sous contrainte imposée non symétrique:

- accommodation (figure A3.8)

c'est l'augmentation de la déformation moyenne jusqu'à stabilisation.

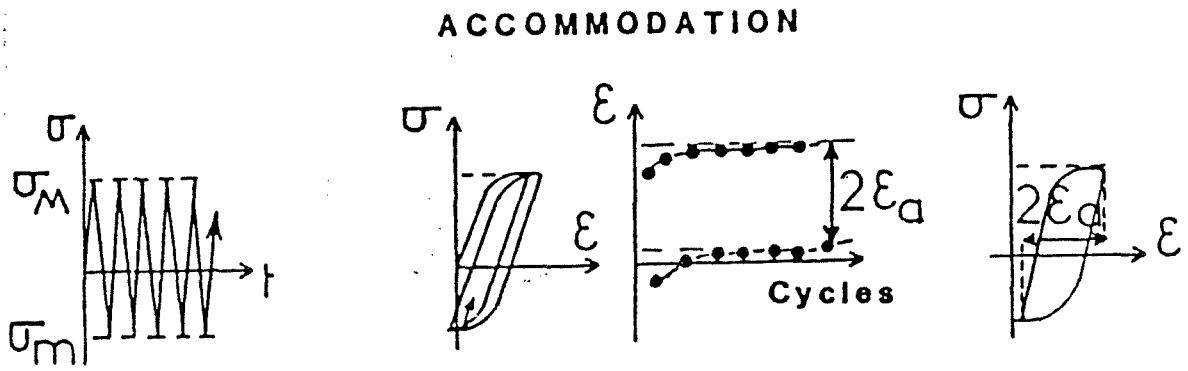


figure A3.8: accomodation de la déformation.

- Phénomène de Rochet (figure A3.9)

C'est l'augmentation progressive de la déformation moyenne, d'une valeur constante à chaque cycle, sans stabilisation

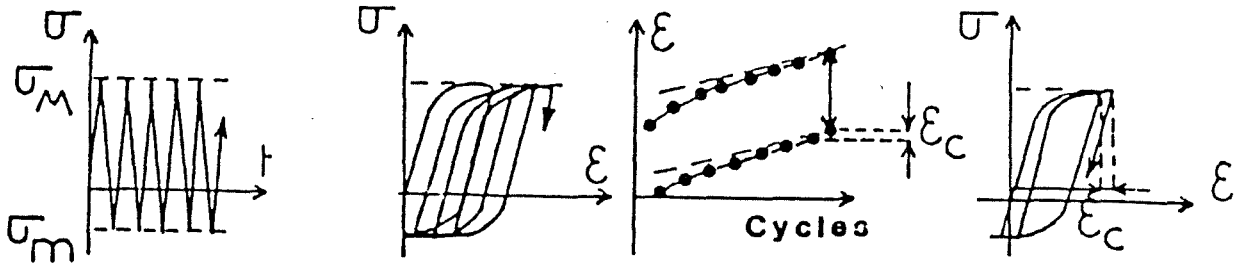
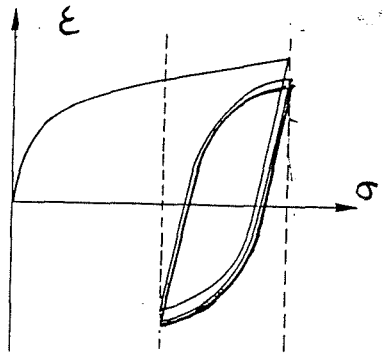


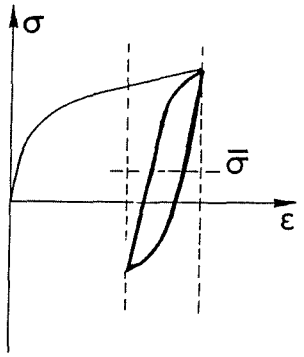
figure A3.9: phénomène de Rochet.

* sous déformation imposée non symétrique:

- Relaxation de la contrainte moyenne (figure A3.10):C'est la diminution de σ_{moy} au cours des cycles
- Non relaxation de la contrainte moyenne (figure A3.11)



Relaxation de la contrainte moyenne

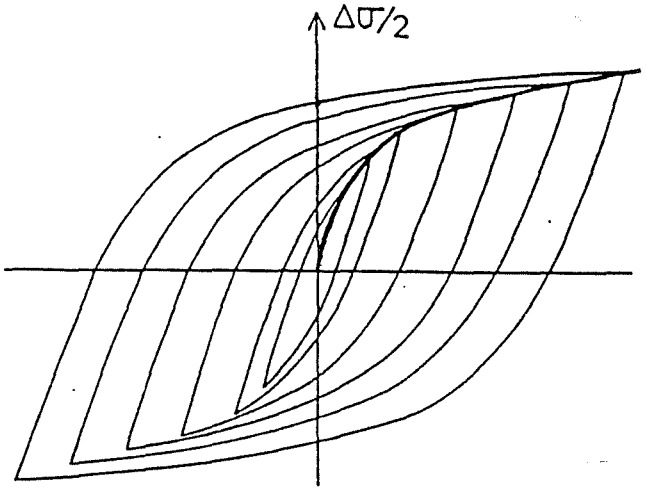


Non relaxation de la contrainte moyenne

figure A3.10: Relaxation de contrainte

figure A3.11: Non relaxation de contrainte

Enfin l'expérimentation sous chargement cyclique permet de déterminer l'écrouissage du matériau (figure A3.12): à contrainte imposée à différent niveaux on trace la courbe $\sigma_{max} = f(\epsilon_{max})$ et comparée avec la courbe $\sigma = f(\epsilon)$ obtenu en chargement monotone.



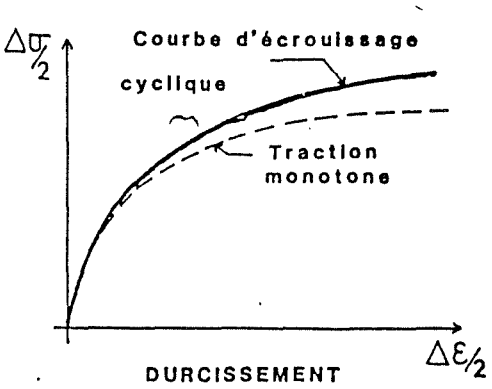


figure A3.12: écrouissage cyclique

Les essais de fatigue sont des essais destructifs: ils concernent la détermination du nombre cycle à effectuer sous un niveau de contrainte (ou de déformation donnée) pour obtenir la fissuration puis la ruine du matériau. Deux types d'expérimentation peuvent être menées:

- la fatigue endurance : le matériau est sollicité sous un contrainte (déformation) faible , généralement inférieure à la limite élastique ; il faut alors au moins 10^5 cycles pour observer la rupture.(DORLOT 1988).

- la fatigue oligocyclique : la contrainte appliquée est importante (entraînant généralement une déformation plastique) et la durée de vie est inférieure à 10^4 cycles.(LIEURADE 1982)

ANNEXE 4

DENSITE: 0,3 –SANS PRECHARGEMENT

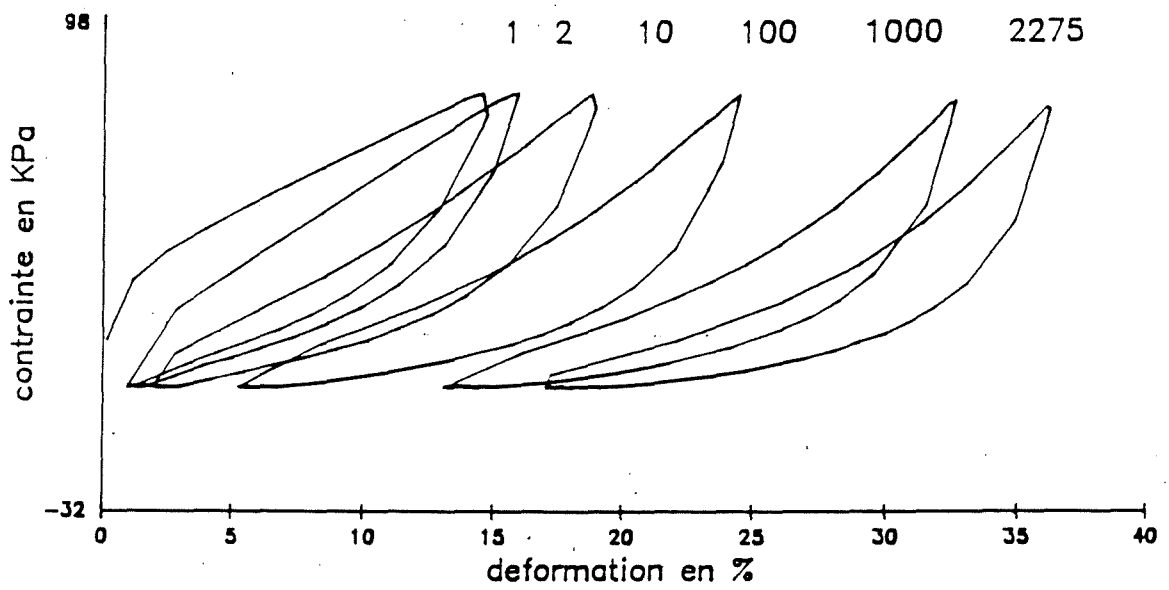


fig a: cycle contrainte–deformation

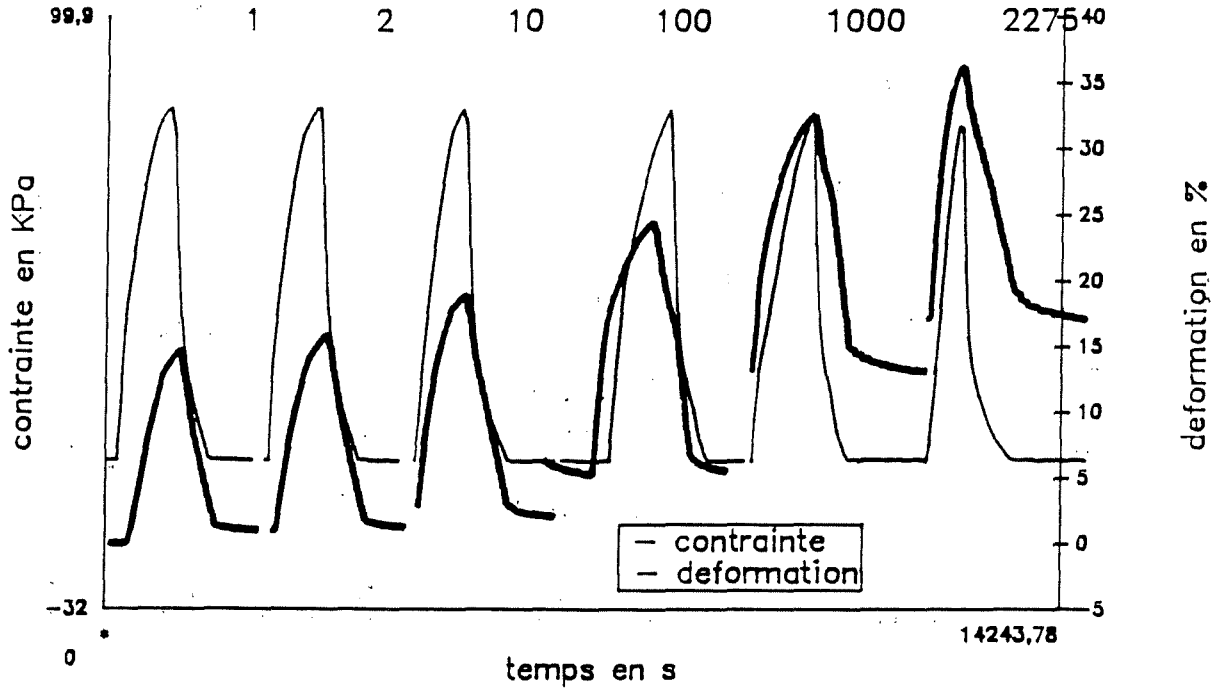


fig b: evolution en fonction du temps

DENSITE 0,3 –SANS PRECHARGEMENT

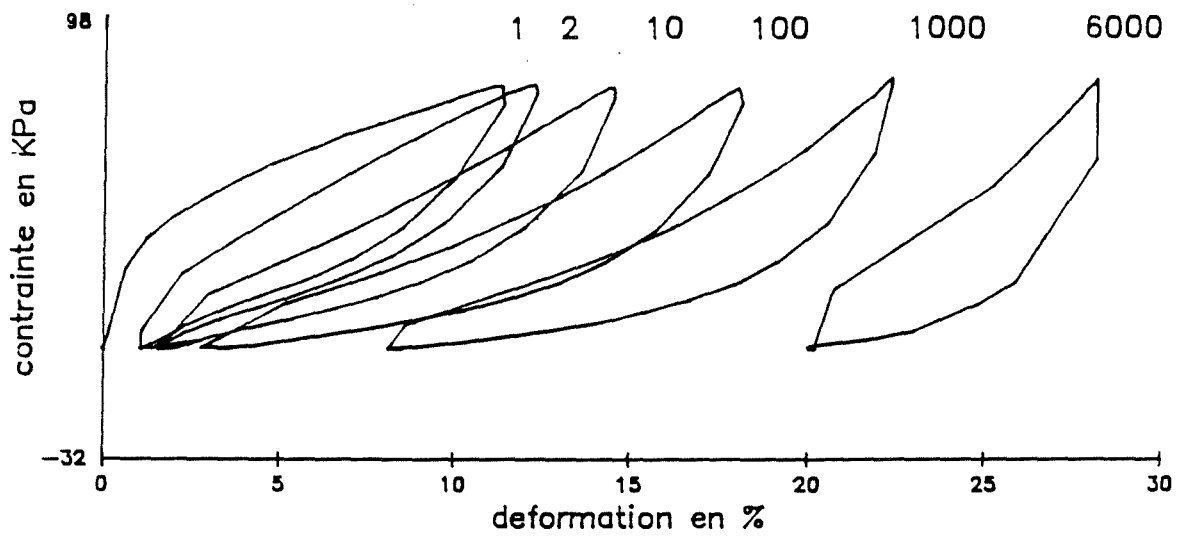


fig a: cycle contrainte–deformation

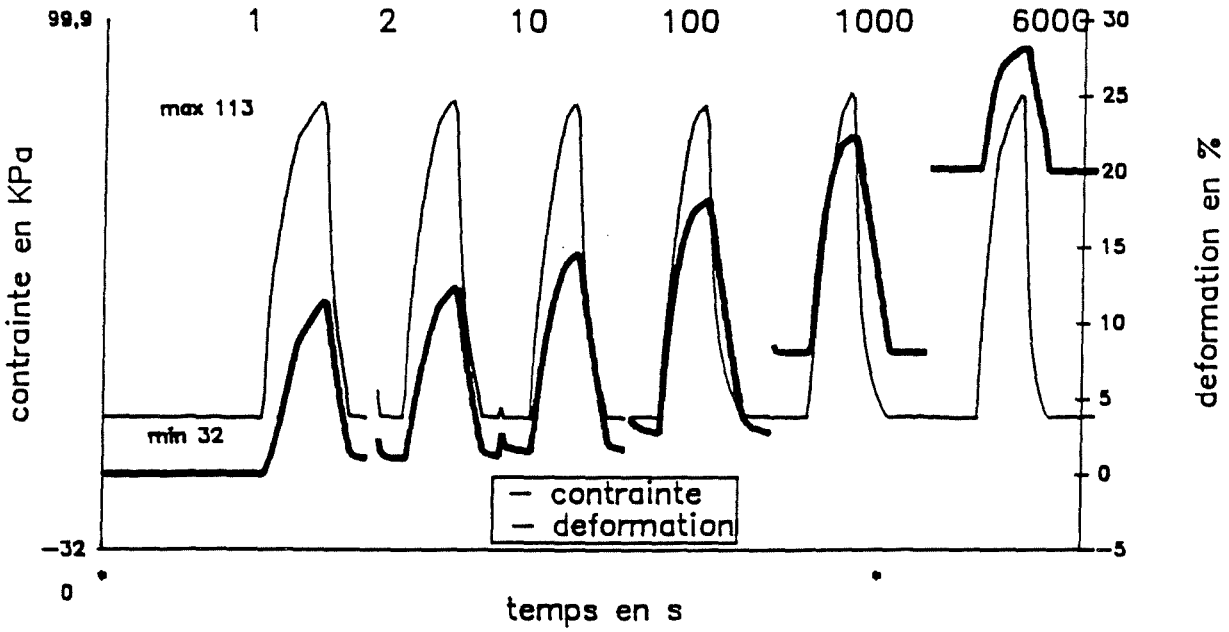


fig b: evolution en fonction du temps

DENSITE 0,4 –SANS PRECHARGEMENT

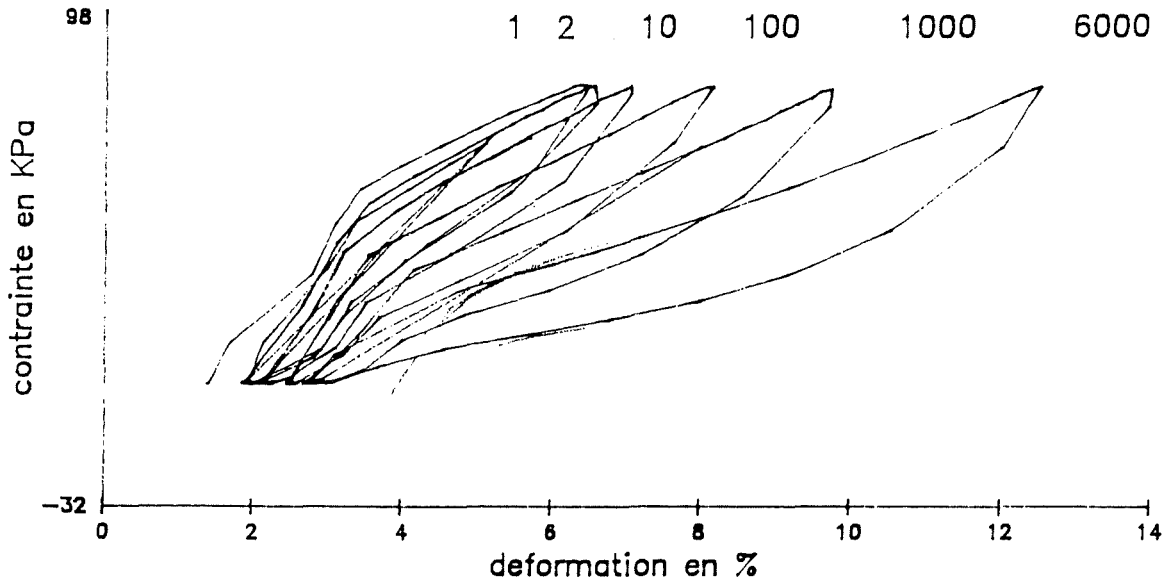


fig a: cycle contrainte–deformation

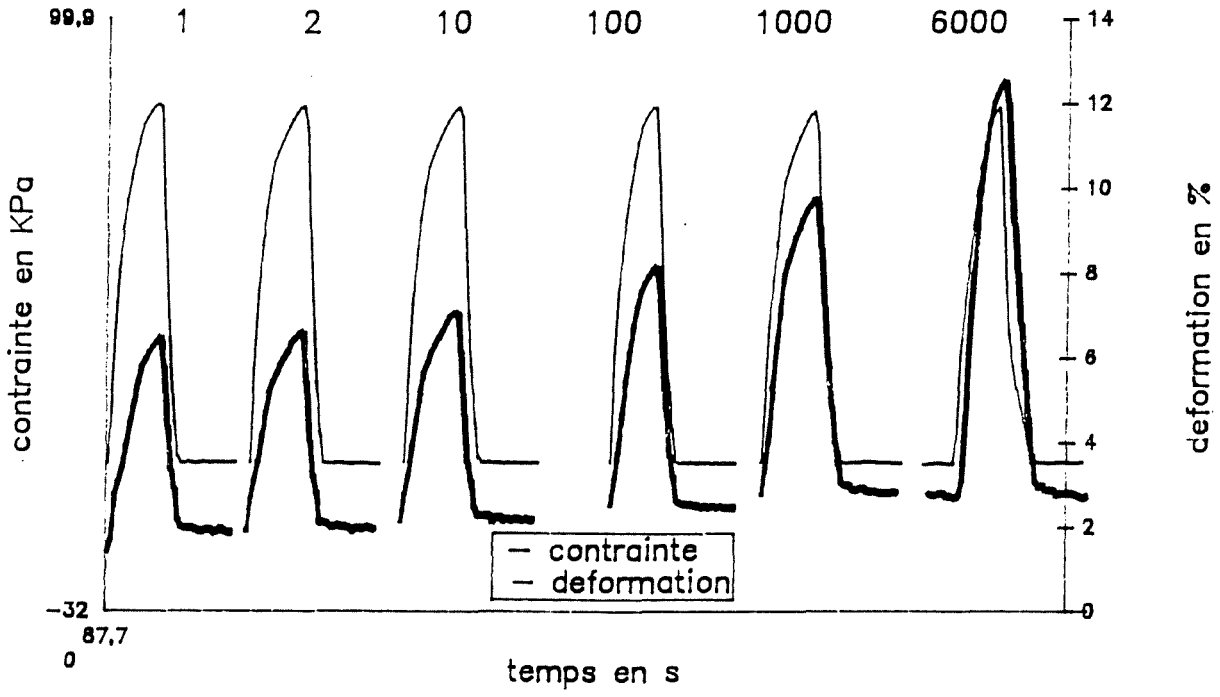


fig b: evolution en fonction du temps

DENSITE 0,5 – SANS PRECHARGEMENT

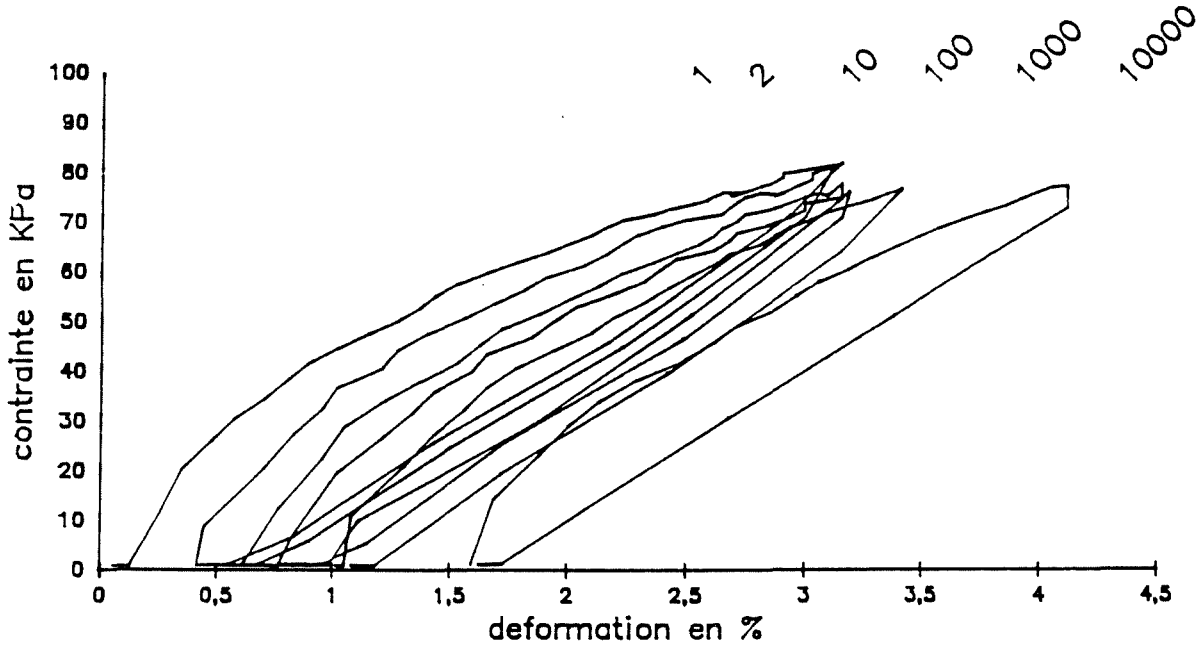


fig a: cycle contrainte–deformation

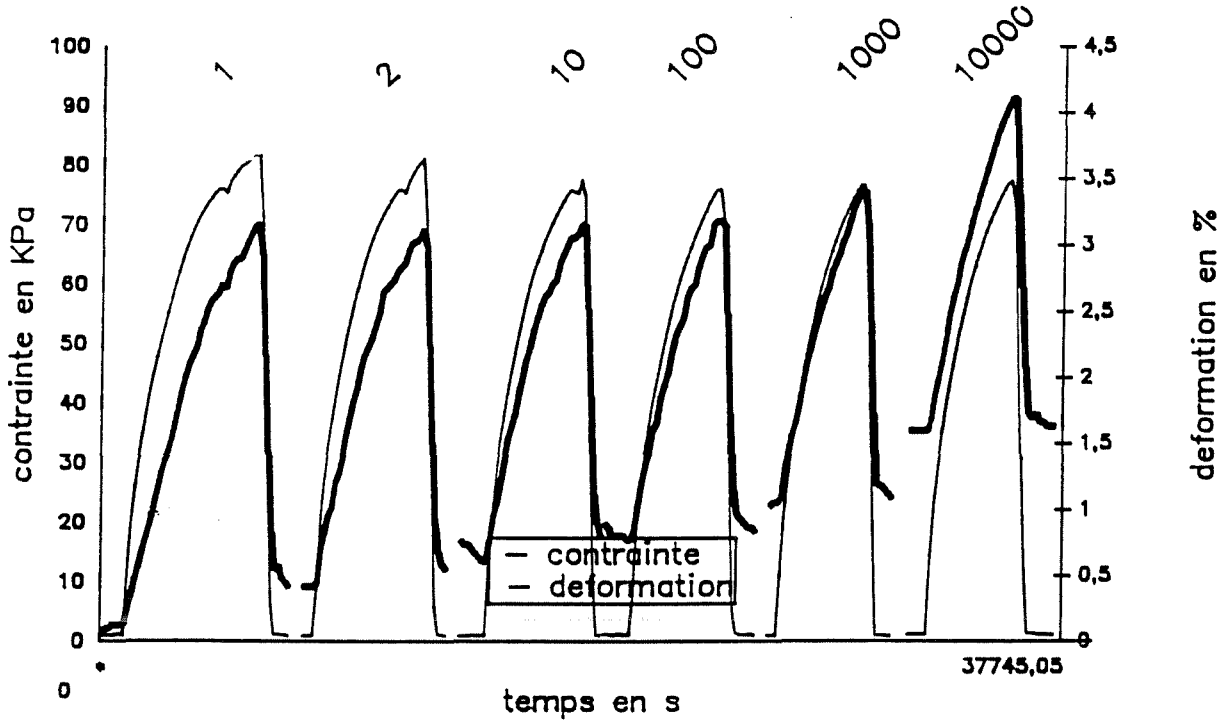


fig b: evolution en fonction du temps

DENSITE 0,3 – PRECHARGEMENT instantané

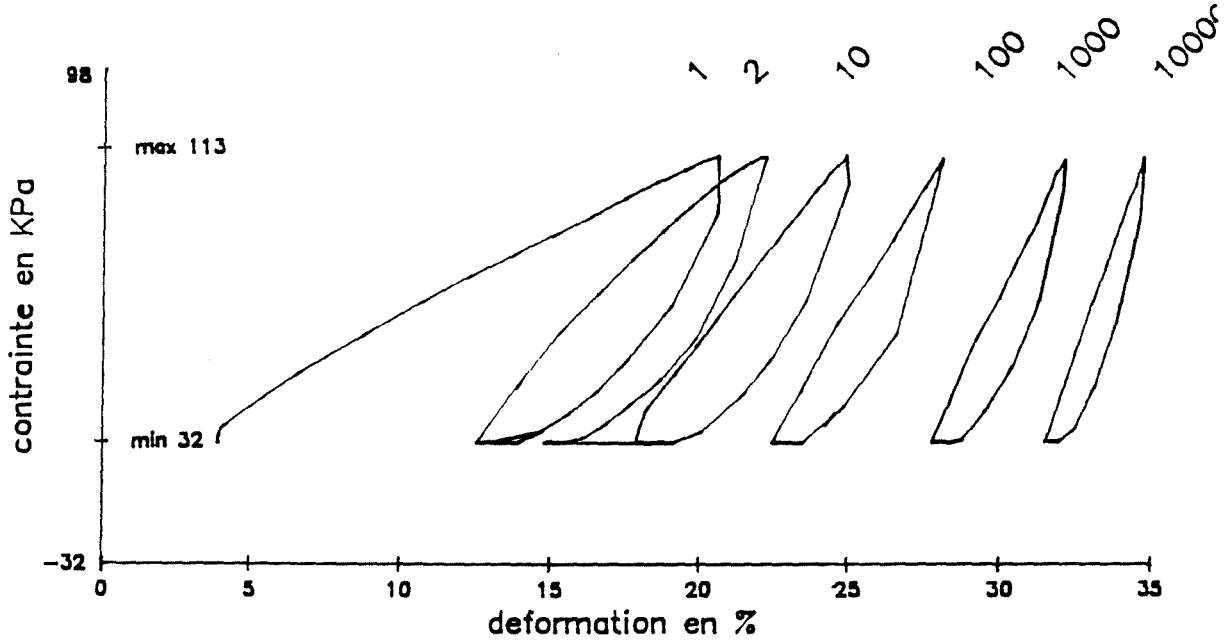
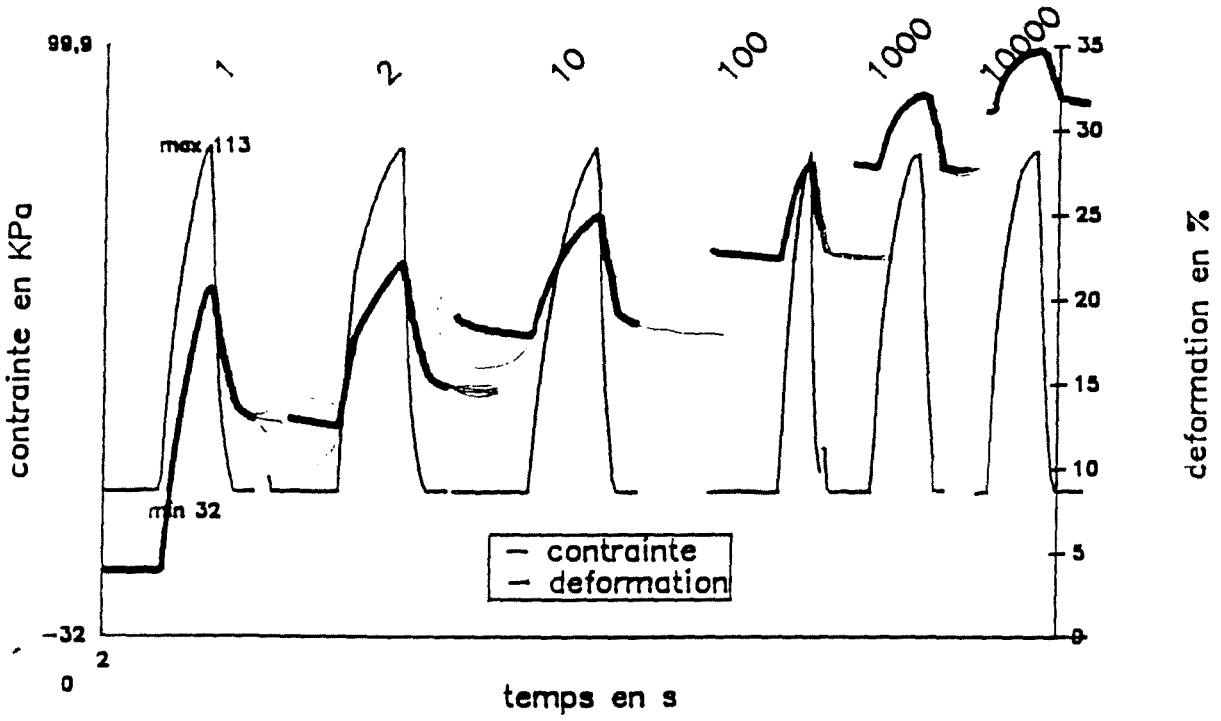


fig a: cycle contrainte–deformation



fonction du temps

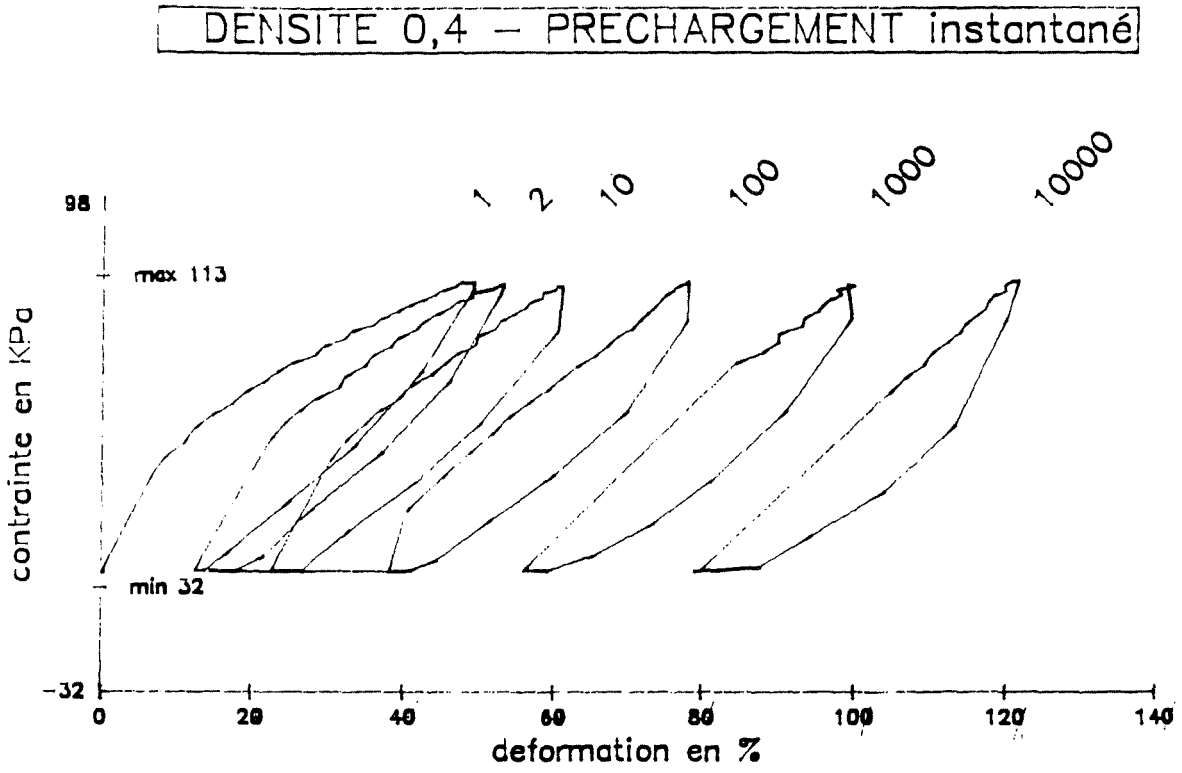


fig a: cycle contrainte–deformation

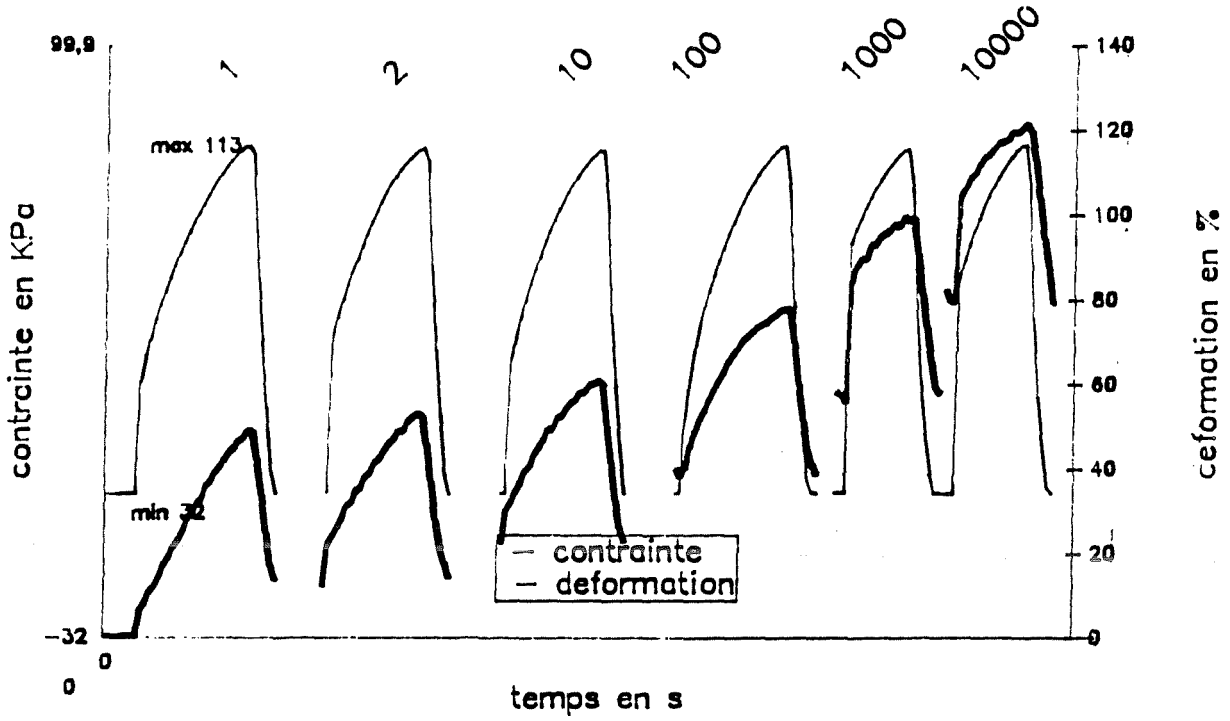


fig b: evolution en fonction du temps

DENSITE 0,4 PRECHARGEMENT INSTANTANNE

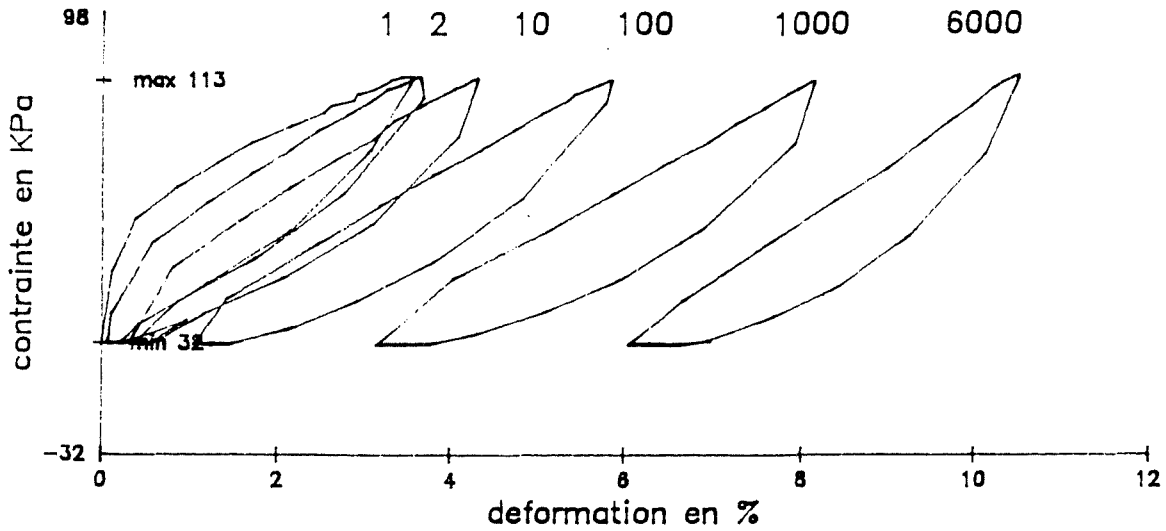


fig a: cycle contrainte—deformation

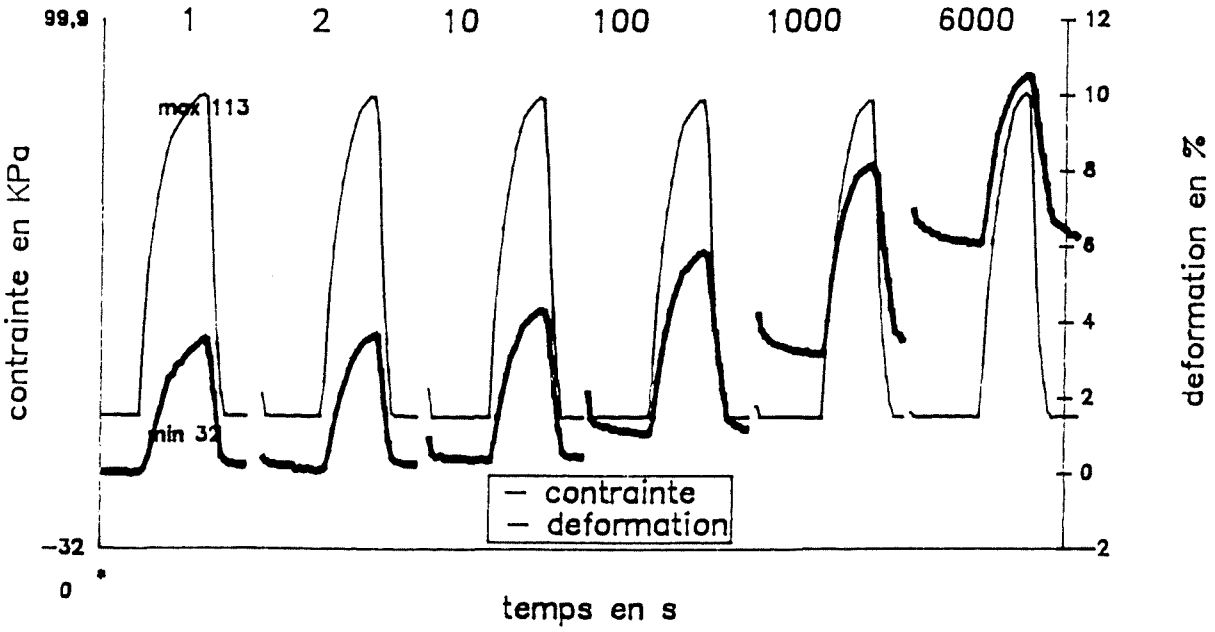


fig b: evolution en fonction du temps

DENSITE 0,43 – PRECHARGEMENT instantané

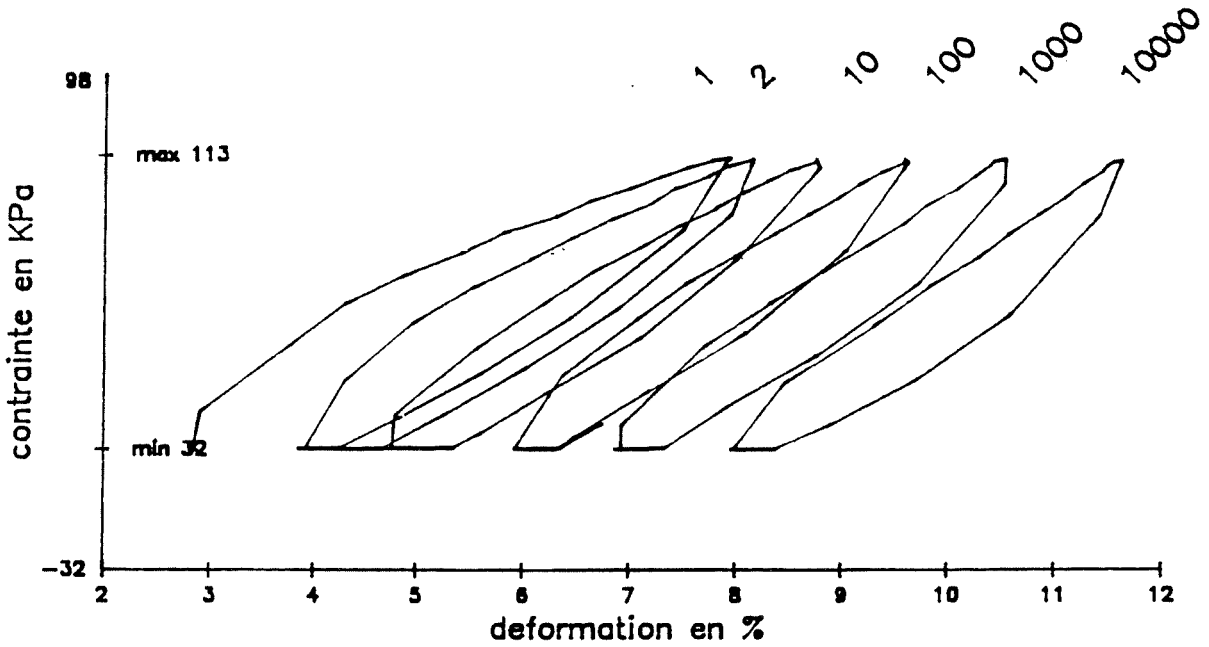


fig a: cycle contrainte–deformation

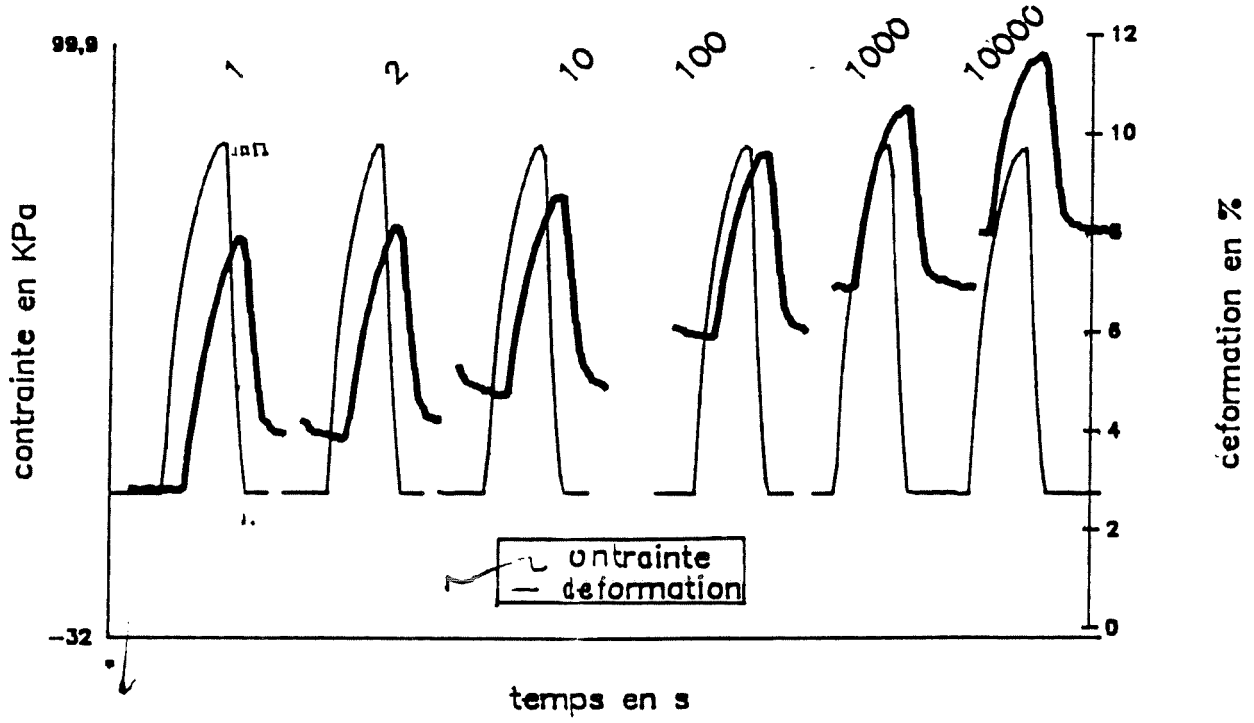


fig b: evolution en fonction du temps

DENSITE 0,5 – PRECHARGEMENT instantané

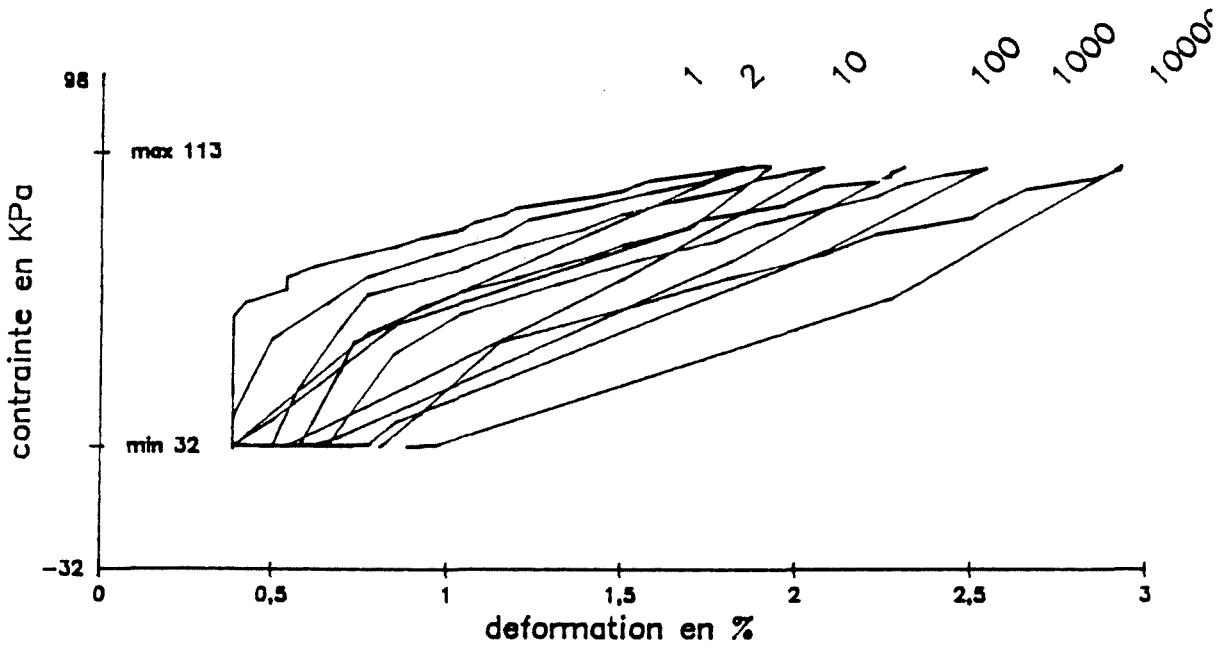


fig a: cycle contrainte–deformation

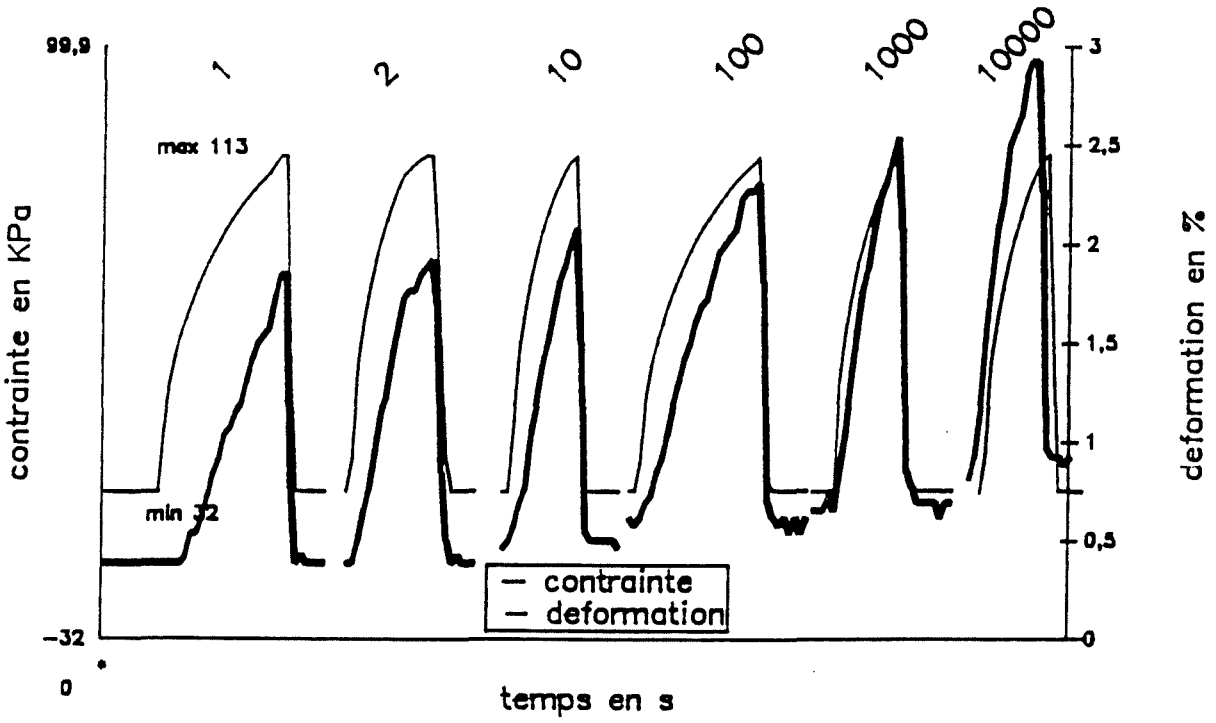


fig b: evolution en fonction du temps

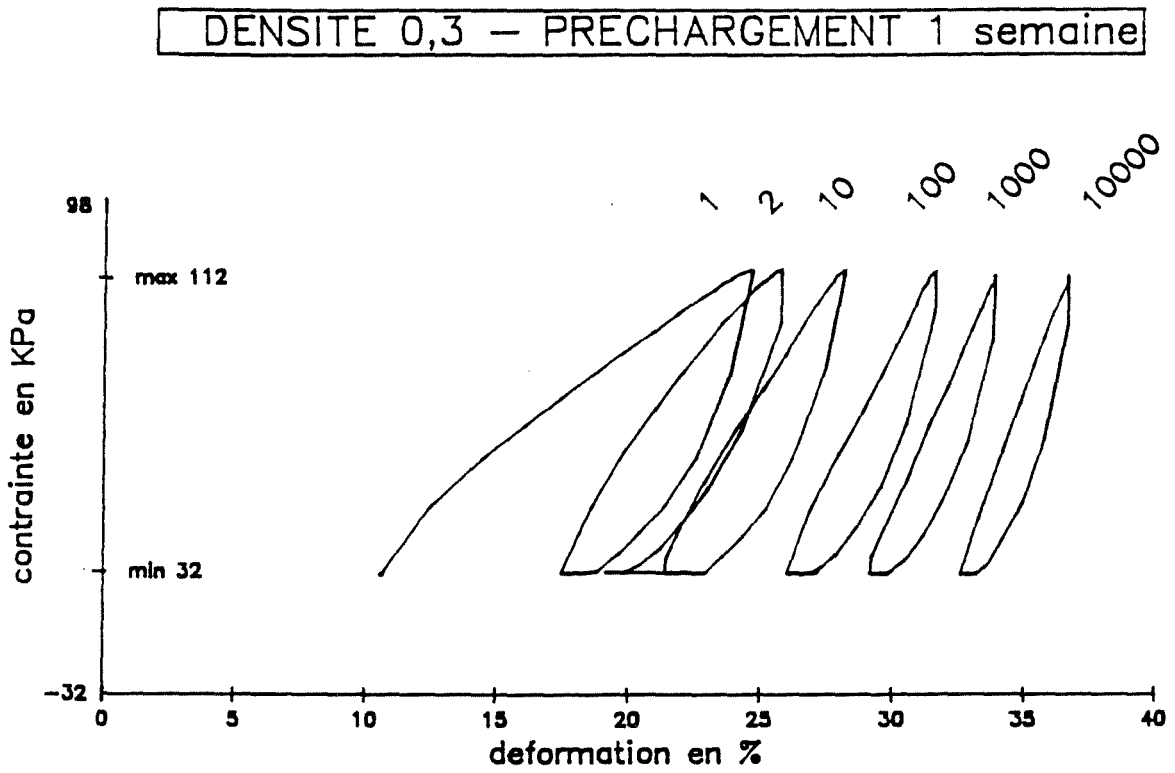


fig a:cycle contrainte–deformation

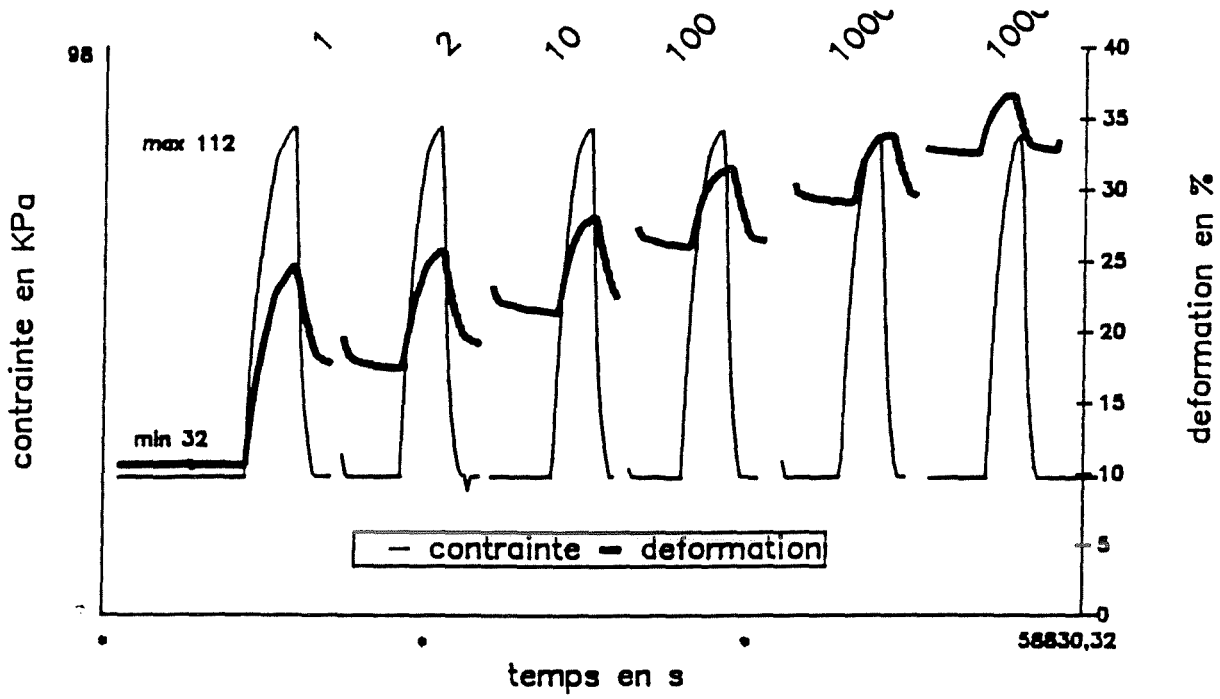


fig b:evolution en fonction du temps

DENSITE 0,3 – PRECHARGEMENT 1 semaine

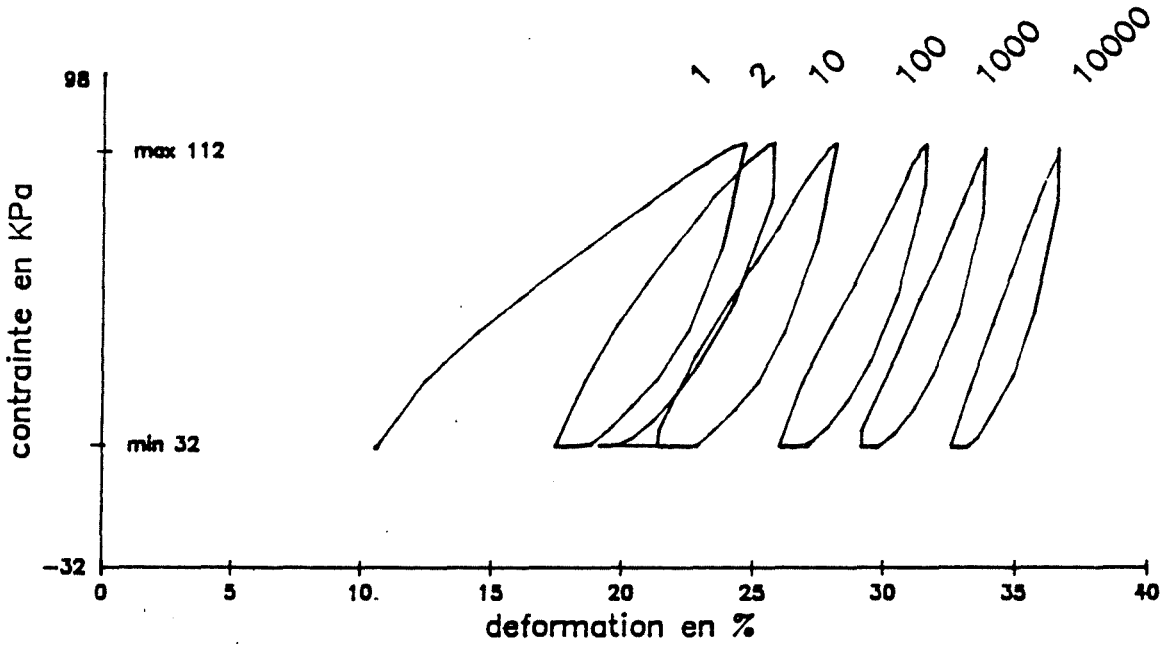
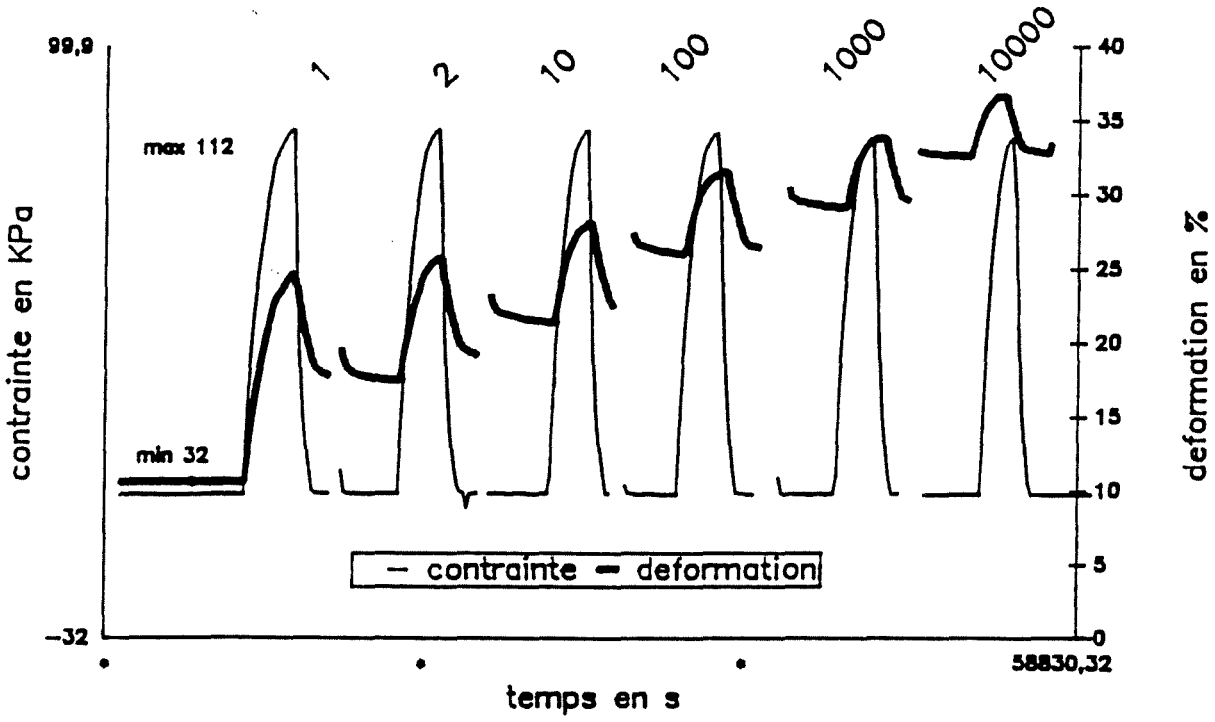


fig a:cycle contrainte–deformation



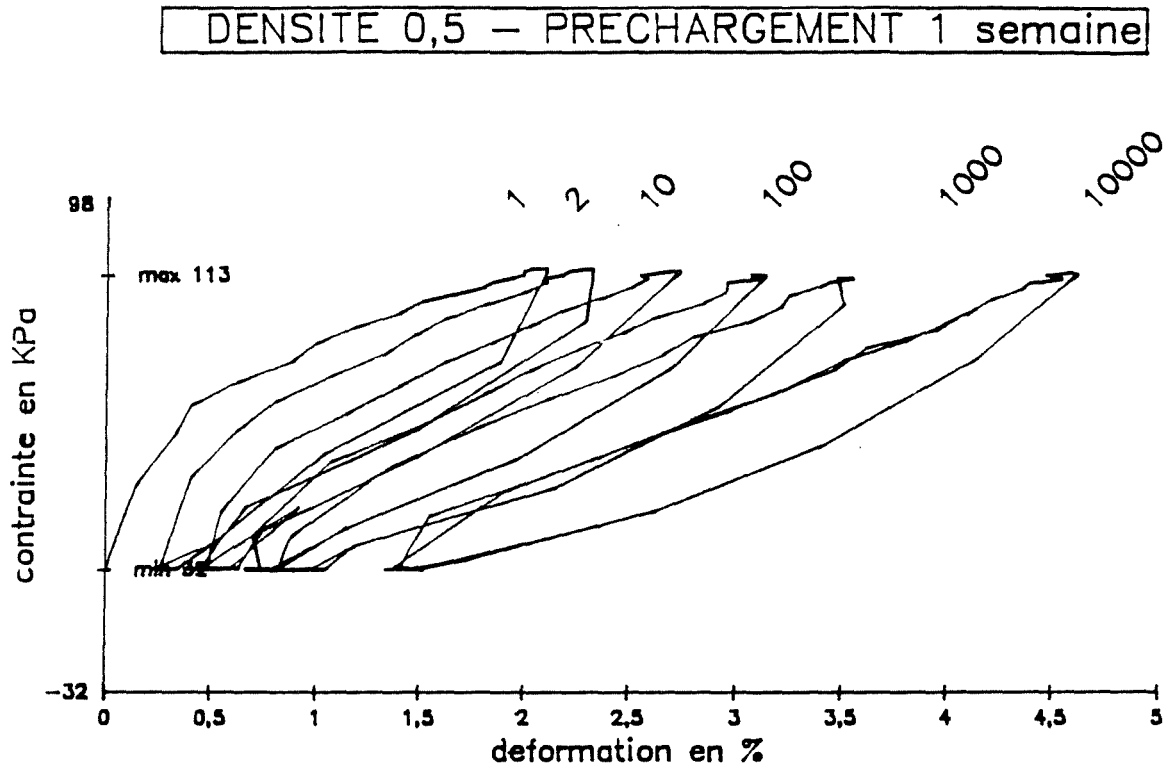


fig a: cycle contrainte–deformation

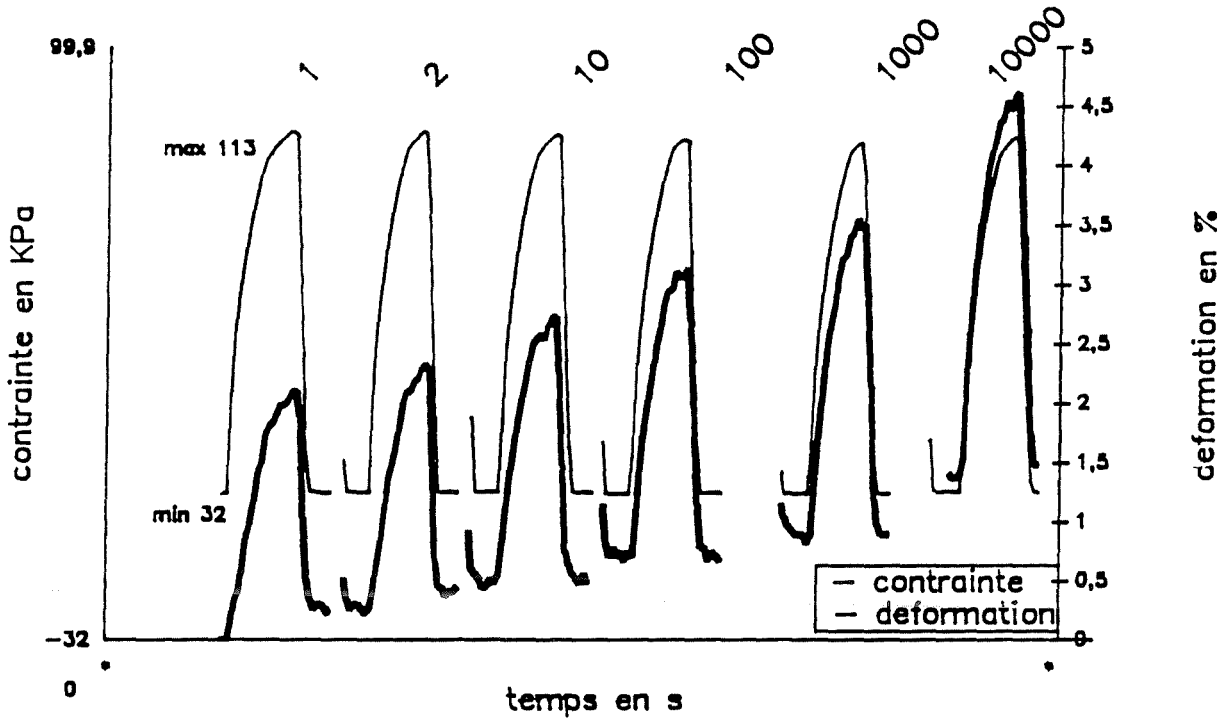


fig b: evolution en fonction du temps

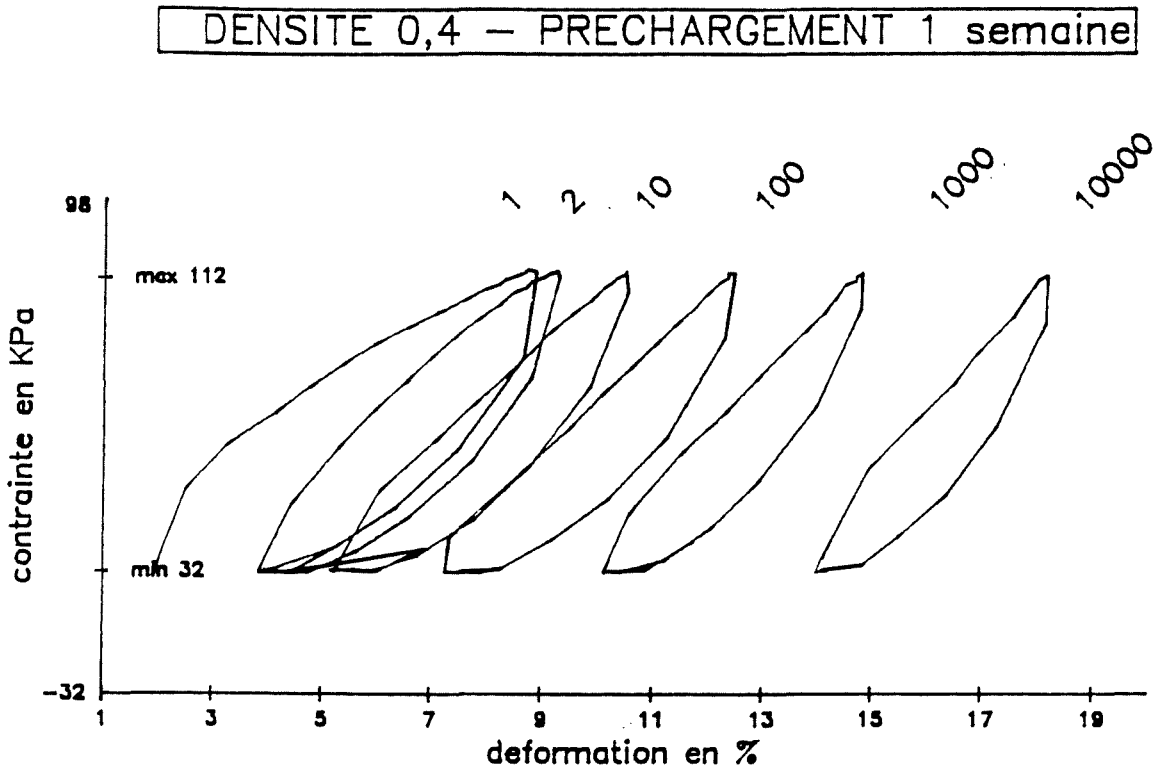


fig a: cycle contrainte–deformation

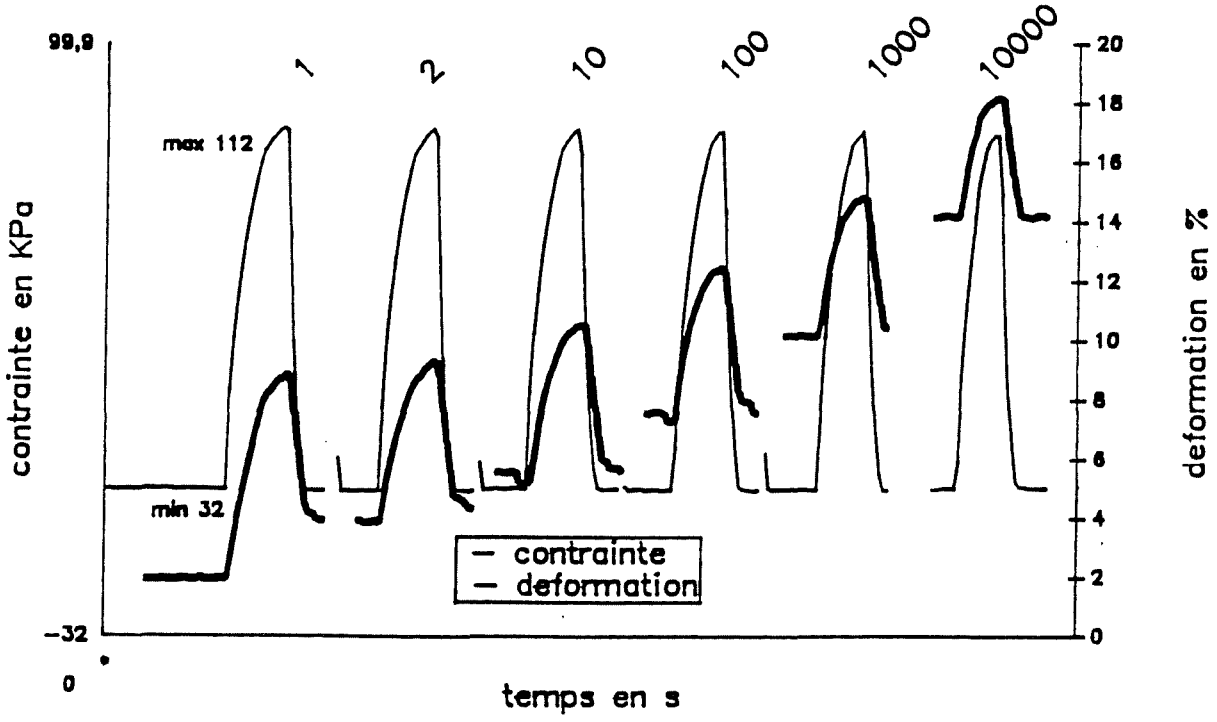


fig b: evolution en fonction du temps

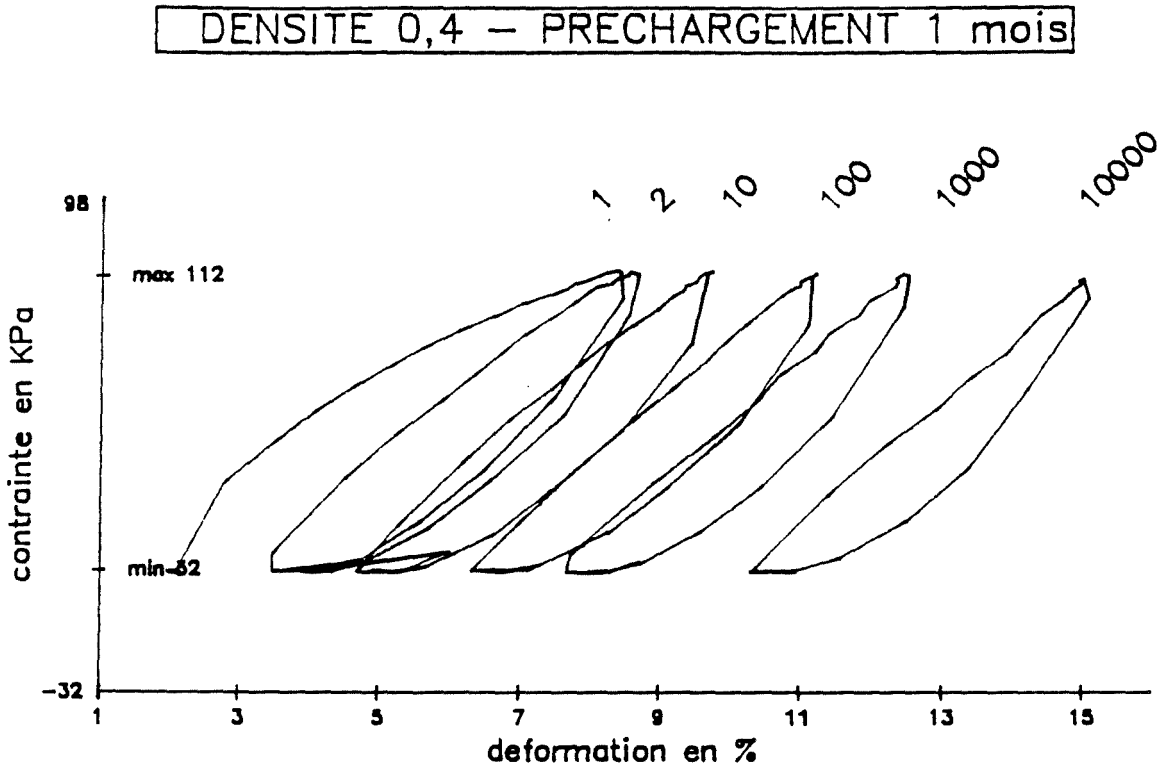


fig a: cycle contrainte–deformation

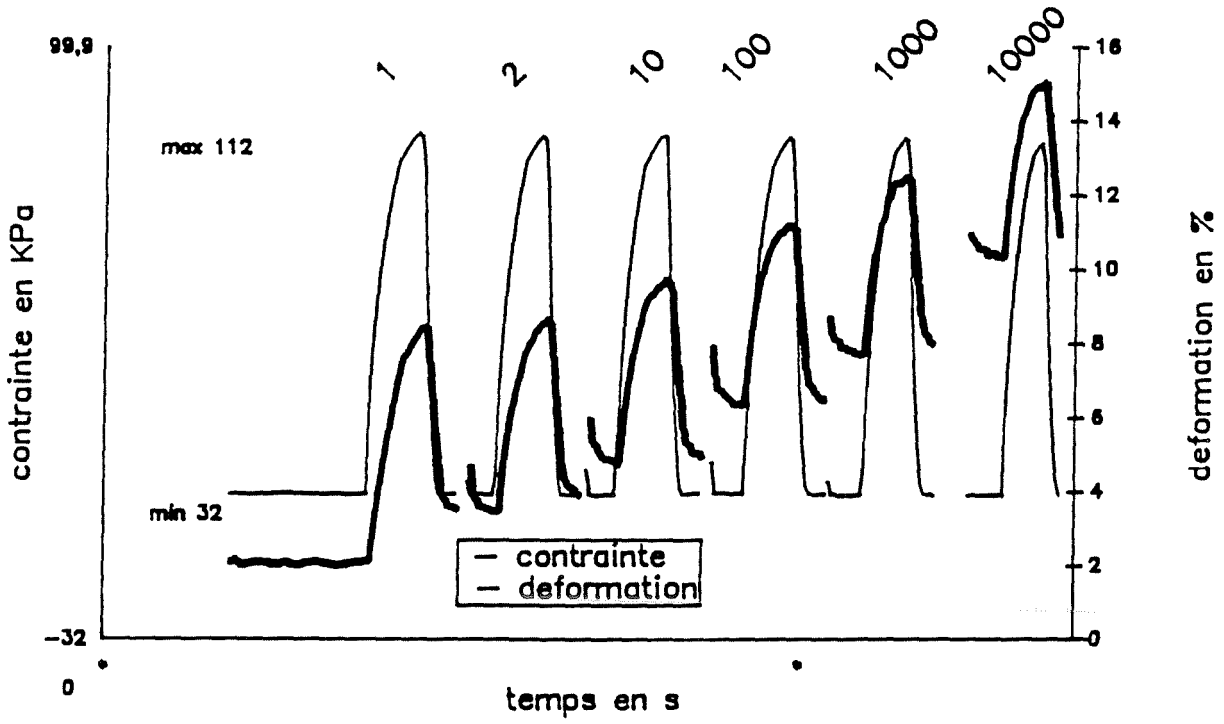


fig b: evolution en fonction du temps

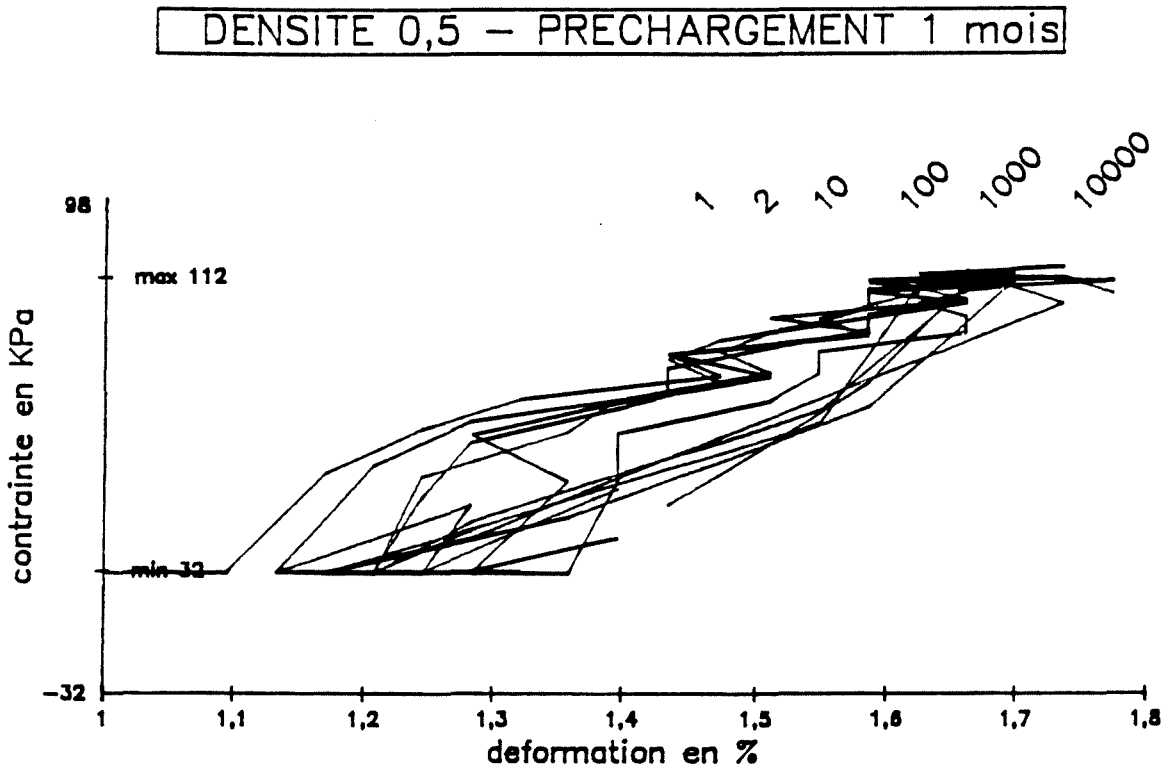


fig a:cycle contrainte–deformation

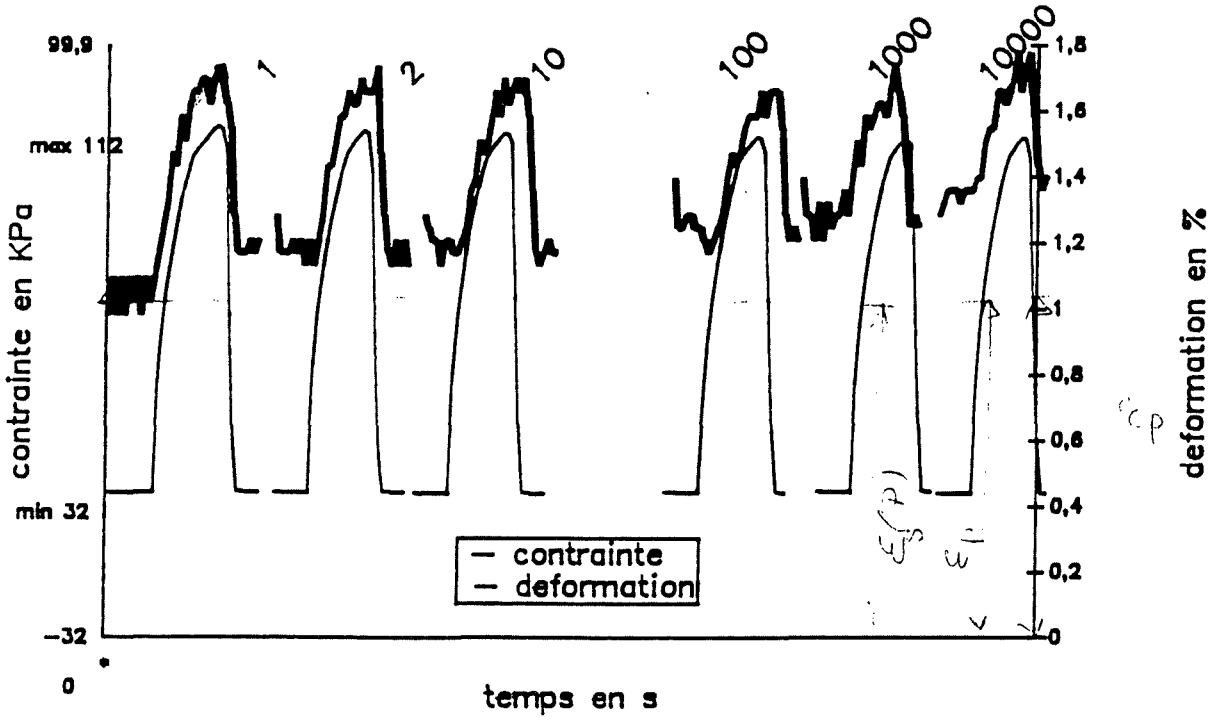


fig b:evolution en fonction du temps

NOM : **DAUDON** PRENOM : **DOMINIQUE**	DATE DE SOUTENANCE : 12 février 1992

TITRE : **REMBLAIS ALLEGES EN BLOCS DE DECHETS DE MATIERES PLASTIQUES : ETUDE DU PROCEDE PLASTBLOC**

NATURE:

DIPLOME DOCTORAT	DOCTEUR INGENIEUR	DOCTORAT D'ETAT	DOCTORAT 3EME CYCLE
[X]	[ ]	[ ]	[ ]

NUMERO D'ORDRE : **3592**

SPECIALITE: **GENIE CIVIL**

Cote B.I.U. - Lyon : T 50/210/19 / et bis	CLASSE :

RESUME:

Le problème de stockage des déchets de toutes sortes, et notamment des matières plastiques, devient de plus en plus préoccupant. Les méthodes de recyclage existantes sont souvent coûteuses, et nécessitent un traitement préalable des déchets.

De plus, l'urbanisation grandissante oblige les pouvoirs publics à construire sur des terrains de plus en plus difficiles.

Le procédé Plastbloc est un procédé de remblais allégés en déchets de matières plastiques compactées. Il permet de résoudre les problèmes d'allégement des terrains compressibles et constitue un recyclage efficace et peu coûteux de grandes quantités de déchets.

Nous présentons ici des études en laboratoire et en vraie grandeur. Les tassements et la "poussée"sur un écran ont été suivis sur un remblai expérimental instrumenté. Une étude en laboratoire du comportement des différentes interfaces en présences : bloc sur bloc, bloc sur sol, ainsi que le cisaillement d'un bloc est effectuée et conduit à une méthode de prédimensionnement. Une deuxième étude concernant le comportement du matériau sous des charges cycliques simulant un trafic lourd montre que le comportement est essentiellement liée à la densité initiale au démarrage des cycles de chargement.

MOTS-CLEFS:
Remblai allégé - déchets plastiques - valorisation - compression cyclique - frottement - étude expérimentale - essai vraie grandeur - geotechnique

LABORATOIRE DE RECHERCHE : Laboratoire Genie Civil Habitat Et Environnement, Iut A, Lyon I, 62622 Villeurbanne Cedex.

DIRECTEUR DE RECHERCHE : Monsieur le professeur J.GIELLY

PRESIDENT DU JURY : J. GIELLY

COMPOSITION DU JURY : J. GIELLY, J. BACOT, R.KASTNER, A. NAVARRO,

C. COULET, N.T. LONG, J.PERRIN