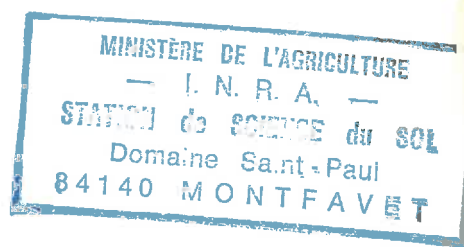


N° d'ordre :



TH  
M-21  
GC6

# THÈSE

présentée à la  
**FACULTÉ DES SCIENCES**  
**DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE**

Pour obtenir le Grade de Docteur de Spécialités  
(Troisième Cycle de Mécanique des Solides)

par

Maurice VIRIEUX  
Ingénieur des Arts et Manufactures

-----

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA STABILISATION RAPIDE DES SOLS EN PLACE  
A L'AIDE DE STRATIFIES DE POLYESTERS ET FIBRES DE VERRE

-----

Soutenue le 14 Septembre 1968, devant la Commission d'Examen

MM.	J. KRAVTCHENKO	Président
	L. SANTON	Examineurs
	J. BIAREZ	

-----

Grenoble

12 DEC. 1975

AVANT - PROPOS

-----

Le travail de recherche qui m 'a amené à la rédaction de ce mémoire a été effectué aux Laboratoires de Mécanique des Fluides de l'Université de GRENOBLE, Section Mécanique des Sols.

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur J. KRAVTCHENKO, Directeur des Laboratoires, pour son accueil et son enseignement. Ma gratitude va également à Monsieur le Professeur L. SANTON, Directeur Technique des Laboratoires, Messieurs les Professeurs P. ANGLES d'AURIAC et P.M. SIRIEYS, dont les cours m'ont initié à la mécanique des sols théorique.

C'est Monsieur le Professeur J. BIAREZ qui, après m'avoir dispensé les rudiments de la mécanique des sols appliquée à l'Ecole Centrale, m'en a donné le goût, a assuré dans ce domaine ma formation et m'a guidé dans mes recherches. Je le prie d'accepter ici ma sincère reconnaissance.

Que Madame BACHHEIMER, Messieurs BIGUENET, ADRIEN, BLANG-BRUDE, ELBERG, FELIX et SALOMON soient remerciés pour leur aide amicale et efficace qui m'a permis de surmonter de nombreuses difficultés.

## I N T R O D U C T I O N

---

Depuis plusieurs années se poursuivent aux Laboratoires de Mécanique des Fluides de l'Université de GRENOBLE, Section Mécanique des Sols, des recherches sur la stabilisation rapide des sols en place en vue de la locomotion tous terrains.

Après un résumé des résultats acquis antérieurement avec des résines synthétiques, le présent mémoire rapporte ceux qui concernent l'étude d'une nouvelle résine, la résine 12-95.

On trouvera ensuite le compte-rendu des recherches effectuées dans une voie totalement nouvelle : la stabilisation des sols en place à l'aide de tapis de surface en résine de polyester armée de fibres de verre.

-----

S O M M A I R E

-----

CHAPITRE I : STABILISATION CHIMIQUE DES TERRAINS EN PLACE EN VUE DE LA LOCOMOTION TOUS TERRAINS

I.1 - Généralités ..... 1

I.2 - La stabilisation à des fins militaires ..... 2

I.3 - Sols à stabiliser ..... 2

I.4 - Principaux résultats acquis au Laboratoire :

    I.4.1. - Stabilisation à l'AM9 ..... 6

    I.4.2. - Stabilisation avec une résine "urée-formol" ..... 8

    I.4.3. - Stabilisation du sable à l'aide d'une résine "Résorcinol-Formol" ..... 8

    I.4.4. - Stabilisation du sable avec une résine polyester ..... 9

I.5 - Stabilisation à la résine 12-95 ..... 16

    I.5.1. - La résine 12-95 ..... 16

    I.5.2. - Essais réalisés ..... 18

    I.5.3. - Remarques ..... 23

    I.5.4. - Conclusions et essais à effectuer ..... 23

I.6 - Difficultés de mise en oeuvre sur le terrain de la stabilisation par voie chimique

    I.6.1. - Problèmes à résoudre ..... 28

    I.6.2. - Cas pratiques ..... 29

    I.6.3. - Conclusions ..... 30

CHAPITRE II : STABILISATION PAR TAPIS DE SURFACE

II.1 - Introduction	
II.1.1. - Moyens existants .....	32
II.1.2. - Inconvénients .....	33
II.1.3. - Principe des tapis de surface .....	33
II.1.4. - Réalisation .....	34
II.2 - Notions élémentaires sur la formation et la structure des matières plastiques	
II.2.1. - Mécanisme de formation des réseaux macromoléculaires .....	35
II.2.2. - Comportement rhéologique .....	42
II.2.3. - Principaux thermodurcissables .....	47
II.3 - Les polyesters	
II.3.1. - Généralités .....	50
II.3.2. - Principaux constituants des polyesters commerciaux .....	54
II.3.3. - Rôle des catalyseurs .....	57
II.3.4. - Catalyseurs et accélérateurs .....	60
II.3.5. - Précautions à prendre dans la manipulation des accélérateurs et catalyseurs .....	62
II.4 - Les polyesters renforcés aux fibres de verre	
II.4.1. - Nécessité d'un renforcement .....	63
II.4.2. - Renforcement aux fibres de verre .....	65
II.4.3. - Roving utilisé .....	69
II.4.4. - Propriétés comparées des stratifiés polyester-verre avec d'autres matériaux .....	69

	<u>Pages</u>
II.5 - Propriétés particulières recherchées pour l'application des polyesters renforcés aux fibres de verre à la stabilisation ....	71
II.6 - Recherche de résines polyesters utilisables dans les conditions particulières d 'application à la stabilisation .....	72
II.6.1. - Ervapon D.26 .....	73
II.6.2. - Rhodester 3016 BL .....	77
II.7 - Matériel d'expérimentation	
II.7.1. - Appareil de projection .....	89
II.7.2. - Appareillages annexes .....	91
II.7.3. - Mise en oeuvre. Technologie d'emploi .....	92
II.8 - Recherche d'une méthode d'expérimentation. Essais réalisés et conclusions .....	96
II.9 - Conclusions	
II.9.1. - Résumé des principaux résultats acquis .....	109
II.9.2. - Rappel des précautions à prendre .....	110
II.9.3. - Essais à réaliser .....	111

#### PHOTOGRAPHIES

1 à 15 : Pages hors texte à la fin du mémoire.

## CHAPITRE I

### STABILISATION CHIMIQUE DES TERRAINS EN PLACE

#### EN VUE DE LA LOCOMOTION TOUTS TERRAINS

-----

I-1. La stabilisation chimique des sols en place a été très étudiée en technique routière. Jusqu'à présent, les ciments, la chaux et le bitume ont constitué les matériaux les plus couramment utilisés.

Les buts recherchés alors sont :

- une extrême solidité du sol traité,
- des propriétés mécaniques permanentes.

Par contre, on ne demande pas au stabilisant un effet immédiat, et la mise en oeuvre peut nécessiter un matériel important et complexe.

.../...

I-2. La stabilisation à des fins militaires est radicalement différente de la stabilisation routière habituelle :

- Elle doit être rapide (stabilisation efficace au bout d'un temps maximum de 2 heures, moins si possible),
- La mise en oeuvre doit être simplifiée,
- L'apport de matériaux extérieurs doit être faible,
- Le traitement du sol se fera sur une superficie relativement restreinte,
- La stabilisation devra permettre au sol d'acquiescer les qualités suffisantes pour permettre le passage d'un nombre de véhicules limité,
- Elle devra être possible quelles que soient les conditions atmosphériques.

I-3. Sols à stabiliser.

Les sols qui posent le plus de problèmes au passage des véhicules sont de deux types :

- sols argileux ou silteux saturés et de faible densité,
- sols sableux de granulométrie assez fine et ne contenant pas d'éléments argileux.

C'est ainsi qu'au Laboratoire, nous avons choisi pour les essais trois sols-types :

..!..

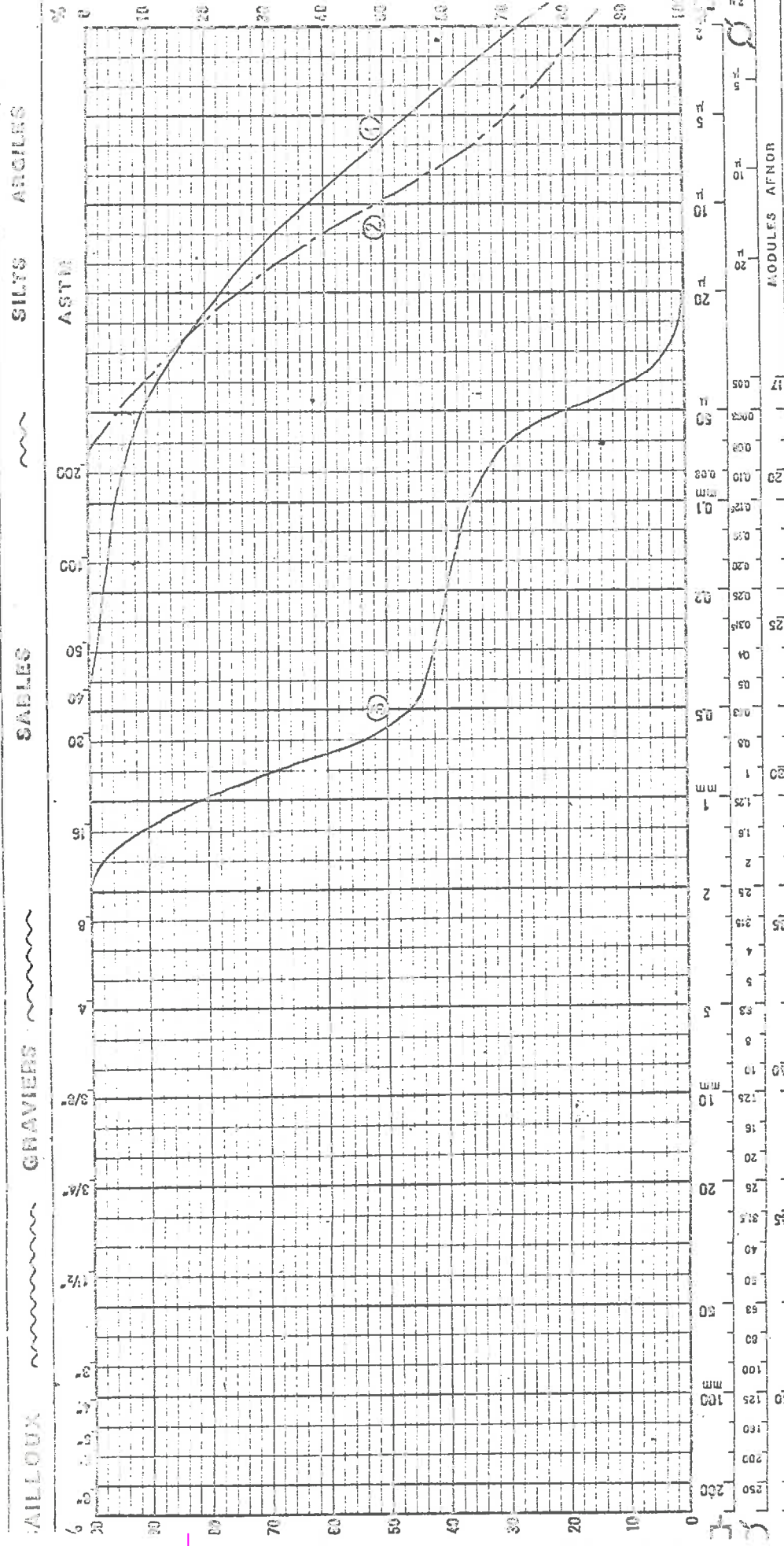


A/- Argile de la Croix-Rouge :

- . Limites d'Atterberg ..... :  $w_L = 58$     $w_p = 29$     $I_p = 29$
- . Poids volumique sec ..... :  $\gamma_d = 1,32 \text{ g/cm}^3$
- . Teneur en eau ..... :  $w = 40 \%$
- . Degré de saturation ..... :  $s = 100 \%$
- . Granulométrie ..... :  $50 \%$   $< 5\mu$  (cf. Fig. I-1)
- . Cohésion ..... :  $c = 0,25 \text{ bar}$
- . Optimum Proctor ..... :  $w_{opt} = 24,5 \%$   
 $\gamma_d \text{ opt} = 1,58 \text{ g/cm}^3$

B/- Silt du Mont-Cenis :

- . Limites d'Atterberg ..... :  $w_L = 27 \%$     $w_p = 16$     $I_p=11$
- . Poids volumique sec ..... :  $\gamma_d = 1,43 \text{ g/cm}^3$
- . Teneur en eau ..... :  $w = 33 \%$
- . Granulométrie ..... :  $30 \%$   $< 5\mu$  (cf. Fig. I-1)
- . Cohésion ..... :  $c = 0,1 \text{ bar}$
- . Optimum Proctor ..... :  $w_{opt} = 16 \%$   
 $\gamma_d \text{ opt} = 1,80 \text{ g/cm}^3$



- (1) Argile de la Croix-Rouge
- (2) Silt du Mont-Cenis
- (3) Sable

Désignation No	CLASSE	W	LL	PI	NATURE - REMARQUES	
					Fig. 1-1	

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

C/ - Sable :

- . sable siliceux
- .  $\phi = 37^\circ$
- . éléments compris entre  $20 \mu$  et 2 mm (cf. Fig. I-1).

I-4. Principaux résultats acquis jusqu'à présent au laboratoire.

Un certain nombre de produits, en particulier des résines synthétiques, permettent d'obtenir au laboratoire des éprouvettes de sol traité présentant de bonnes propriétés mécaniques au bout de deux heures de prise.

Jusqu'à présent, les essais de stabilisation ont été essentiellement testés à partir de la résistance à la compression simple de ces éprouvettes, la limite inférieure à obtenir étant  $R_c = 2 \text{ Kg/cm}^2$ .

Les tableaux et graphiques ci-joints donnent les principales résines dont l'essai au laboratoire a été satisfaisant. Certaines courbes donnant en particulier les résistances obtenues après des temps de prise plus longs, sont mentionnées pour l'intérêt qu'elles peuvent présenter dans d'autres domaines que celui de la stabilisation exclusivement à des fins militaires.

Ces résultats rendent compte d'essais effectués au laboratoire :

- sur l'argile et le silt, avec la résine AK 9 que la "CYANAMID COMPANY" commercialise pour les injections de sol ;

- sur le sable, avec :

- 1) une résine urée-formol (résine 620-927 + durcisseur 621-015 de la "SOCIETE FRANCAISE DES MATIERES COLORANTES") ;
- 2) une résine résorcinol-formol (résorcine de la "SOCIETE RHONE-POULENC") ;
- 3) un polyester (Le Rhodester 3016 BL de la "SOCIETE RHONE-POULENC").

Les mélanges ont été effectués en faisant varier les pourcentages de résine (poids d'extrait sec de résine par rapport au poids sec du sol traité). Les échantillons sont ensuite conservés en atmosphère humide et écrasés en compression simple après un temps plus ou moins long de conservation, éventuellement dans l'eau.

#### I-4.1. Stabilisation à l'AM 9.

L'AM 9 est utilisé habituellement sous forme de solution aqueuse très fluide contenant 10 % de résine pure. Ces solutions ont la propriété de donner des gels élastiques sous l'action de catalyseurs appropriés.

Cette résine a été utilisée en solution très concentrée de façon que ce soit l'eau présente dans le sol qui soit utilisée dans la formation du gel.

.../...

Composition des solutions de résine :

- . 100 parties AM 9
- . 30 parties d'eau
- . 3 à 6 parties de  $\beta$  Diméthyl-Aminopropionitrile
- . 3 à 5 parties de persulfate d'ammonium
- . 0,15 à 0,015 partie de ferricyanure de potassium.

Les résultats obtenus sont résumés dans les figures I-2, I-3 et I-4.

On obtient des valeurs croissantes des résistances avec le pourcentage d'AM 9.

Pour 5 % d'AM 9 par exemple, on obtient des valeurs de l'ordre de 8 bars pour l'argile qui a une résistance de 0,5 bar avant traitement, et de l'ordre de 7 bars pour le silt qui a une résistance inférieure à 0,2 bar avant traitement.

La résistance en compression simple varie peu, une fois la prise faite, pour les échantillons conservés en atmosphère humide saturée.

Le sol traité a une bonne tenue à l'eau.

Lors des essais d'écrasement, on constate de grandes déformations avant d'atteindre la rupture : celle-ci se produit généralement à plus de 30 % de déformation, suivant un plan de cisaillement.

.../...

I-4.2. Stabilisation à l'aide d'une résine  
"urée-formol".

Formule d'emploi utilisée :

-Liant 820-927 .....	100 parties
-Eau .....	60 parties
-Durcisseur 821-015 .....	10 parties

(voir figure I-5),

Remarques :

La prise n'est pas très rapide. Elle ne se fait qu'en milieu acide et on est limité à une catégorie de sables qui ne contiennent pas trop d'éléments calcaires.

Il y a une perte de résistance appréciable à l'immersion. Les déformations à la rupture sont de 3 à 5 % et on a des ruptures fragiles.

I-4.3. Stabilisation du sable à l'aide d'une résine  
"Résorcinol-formol".

La figure I-6 donne les résultats obtenus avec la résine LB2 produite par la Société RHONE-POULENC. On mélange une partie du composant LB avec deux parties du composant 2.

..!..

En atmosphère humide, avec 5 % de résine, on obtient 7 Kg/cm<sup>2</sup> à 2 heures et 33,5 Kg/cm<sup>2</sup> à 7 jours de prise.

Les déformations à la rupture sont encore de l'ordre de 3 à 5 %, avec des ruptures fragiles dans tous les cas.

#### I-4.4. Stabilisation du sable à l'aide d'une résine polyester.

La résine polyester utilisée est le Rhodester 3016 BL (produit par la Société RHONE-POULENC).

Le système catalytique est composé de Butanox (catalyseur) et d'Octoate de Cobalt (accélérateur).

On obtient des résultats remarquables pour un pourcentage voisin de 10 %, mais on se heurte à des difficultés lorsqu'on descend en-dessous de ce pourcentage.

(cf. Figure I-7).

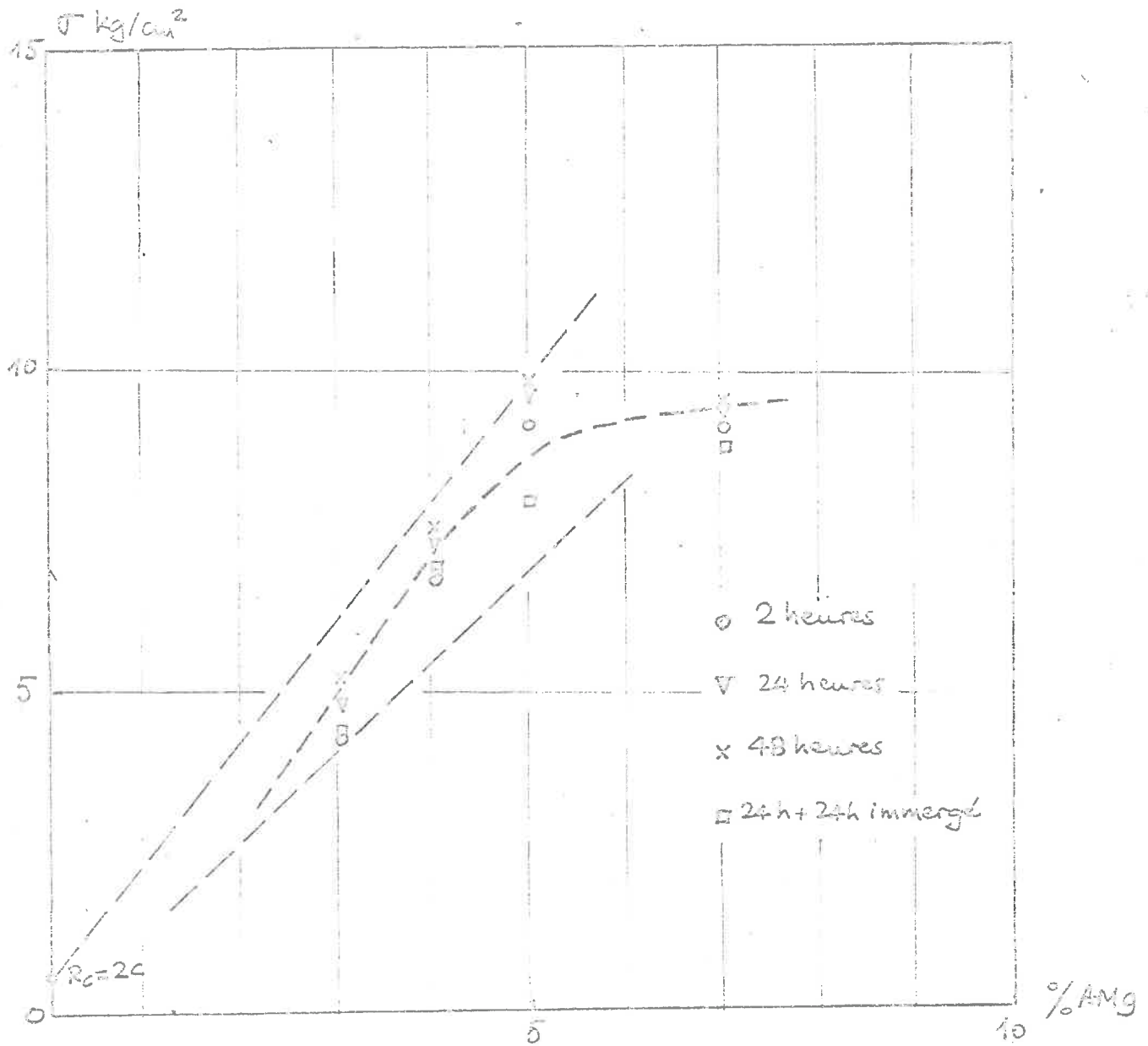
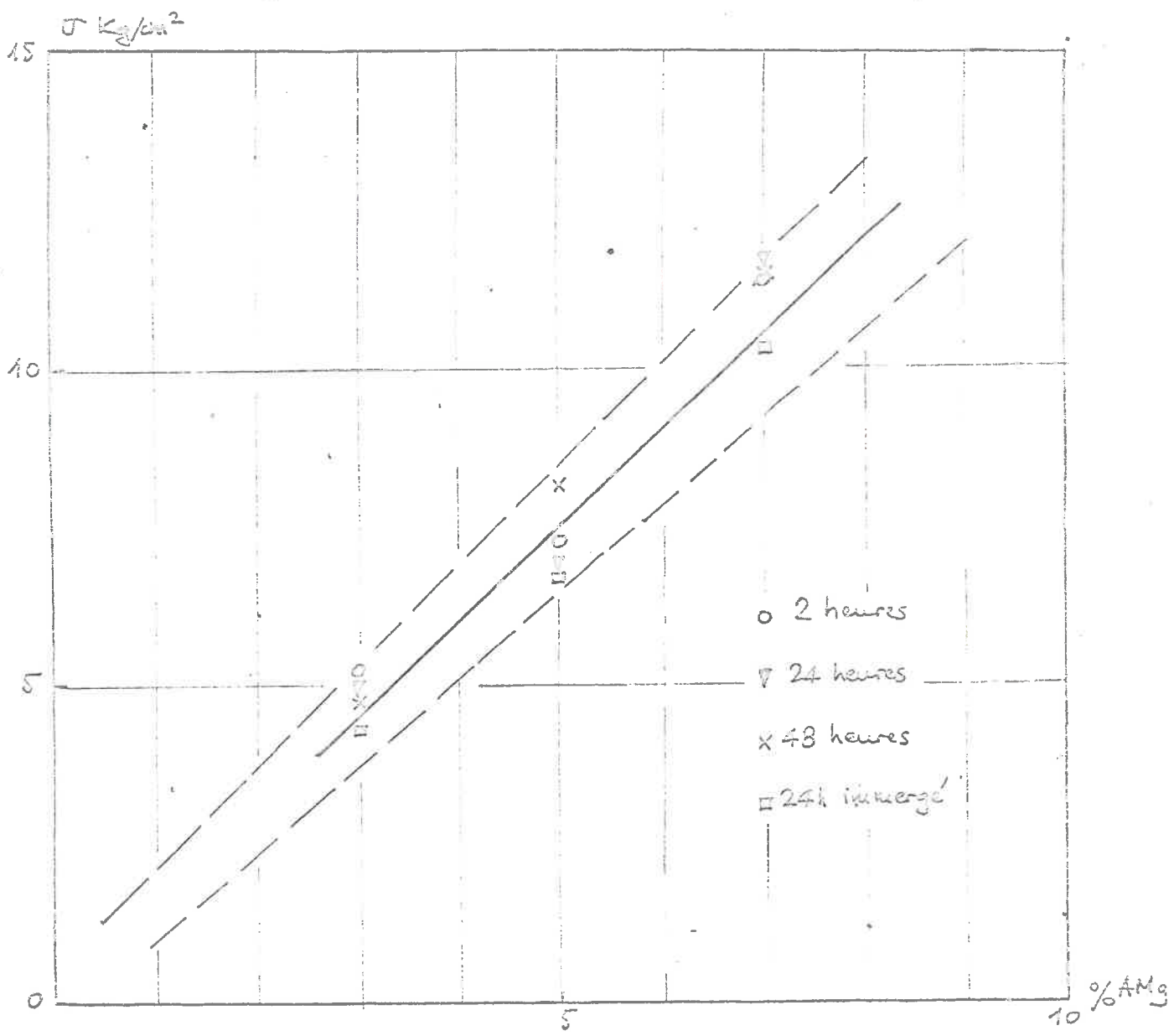


Fig I-2

ESSAI DE STABILISATION DE L'ARGILE DE LA CROIX-ROUGE

RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE  
EN FONCTION DU POURCENTAGE D'AMG





ESSAI DE STABILISATION DU SILT -  
RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE  
EN FONCTION DU POURCENTAGE D'AMg

Fig I-3

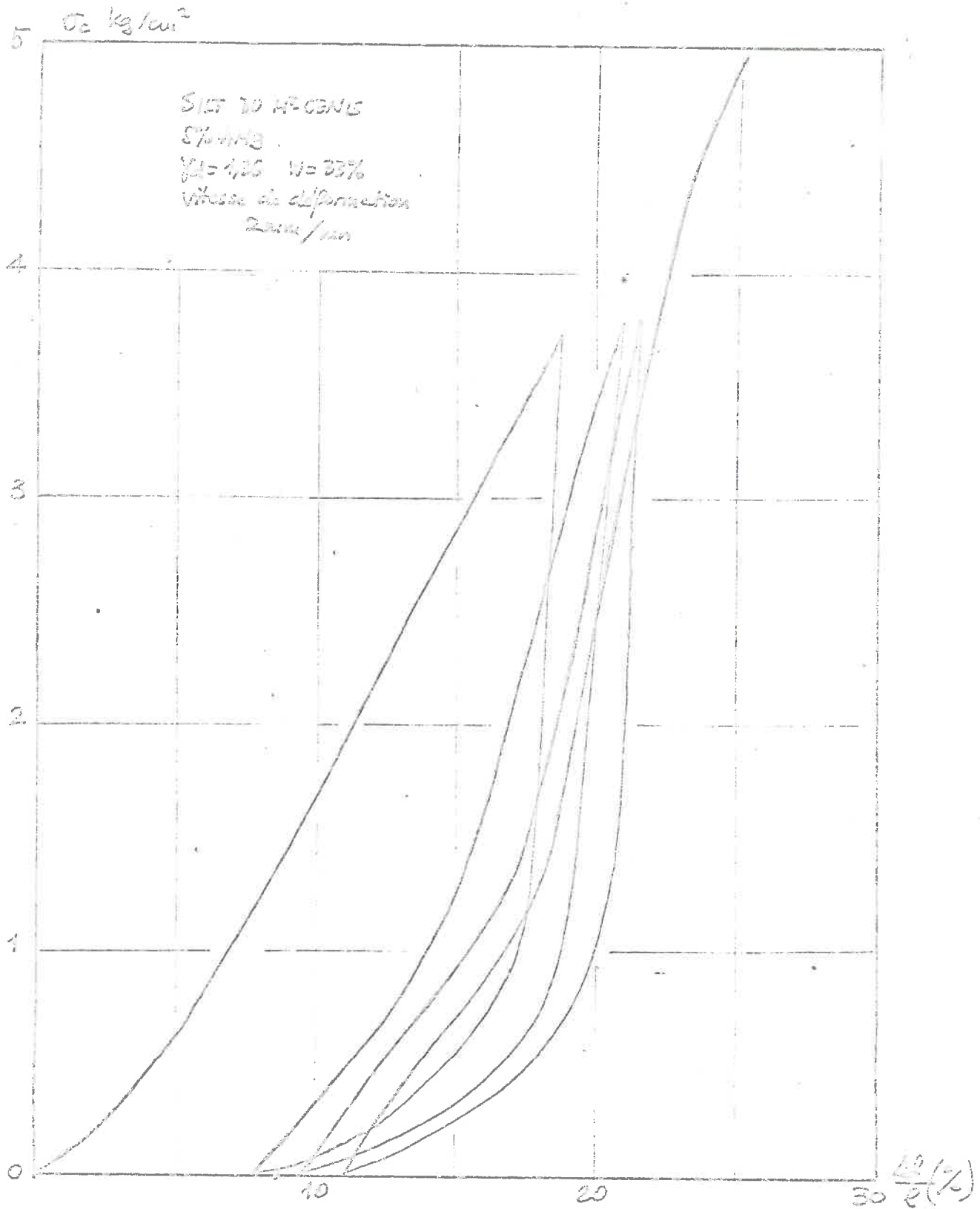


Fig I-4

CYCLES DE DEFORMATIONS SUR UN ECHANTILLON  
 DE SILT 70 NT-GENIS STABILISÉ A L'AMG

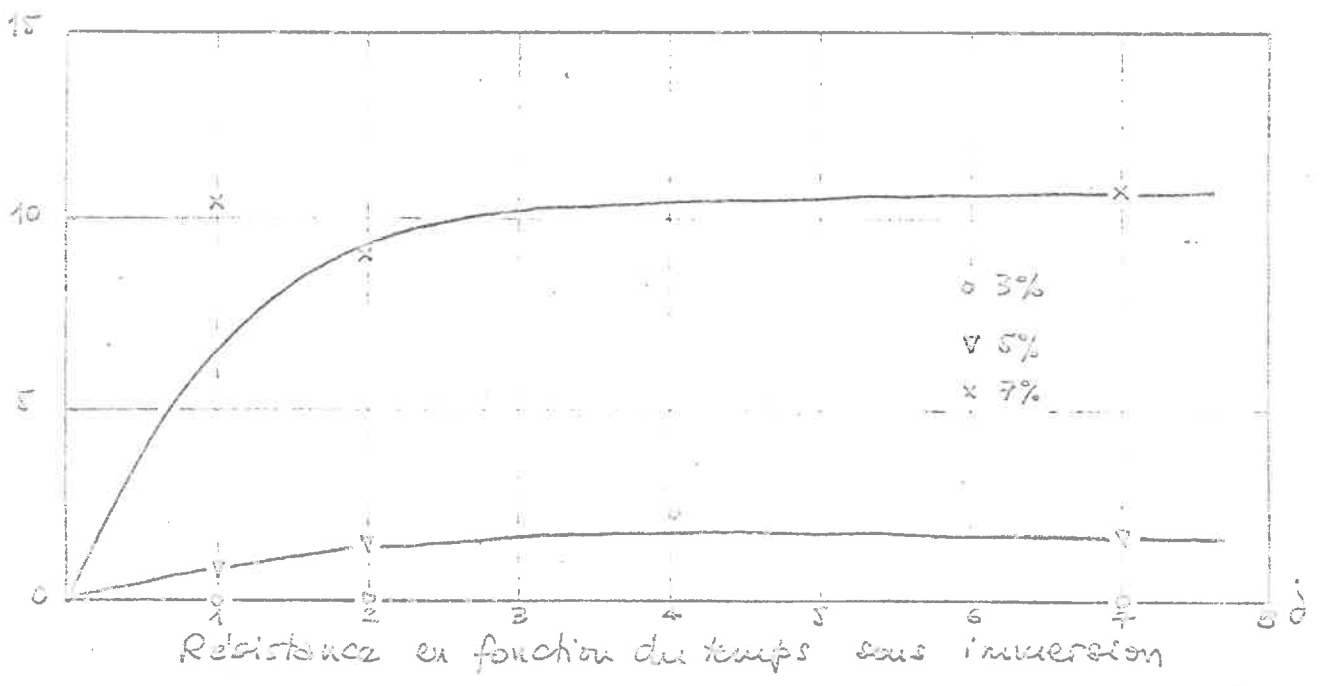
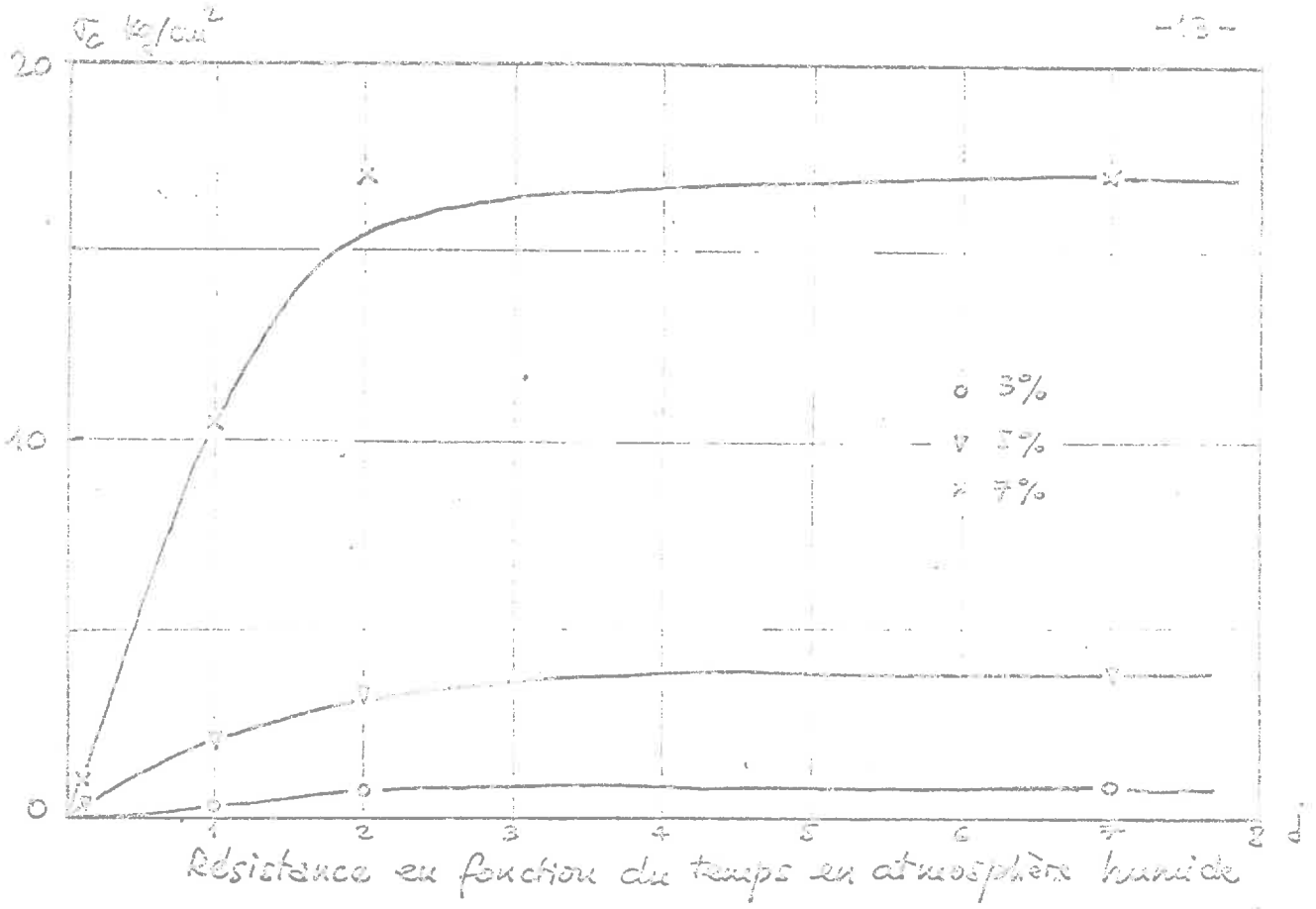


Fig. I-5

SABLE STABILISÉ AVEC UNE RESINE URÉE-FORMAL

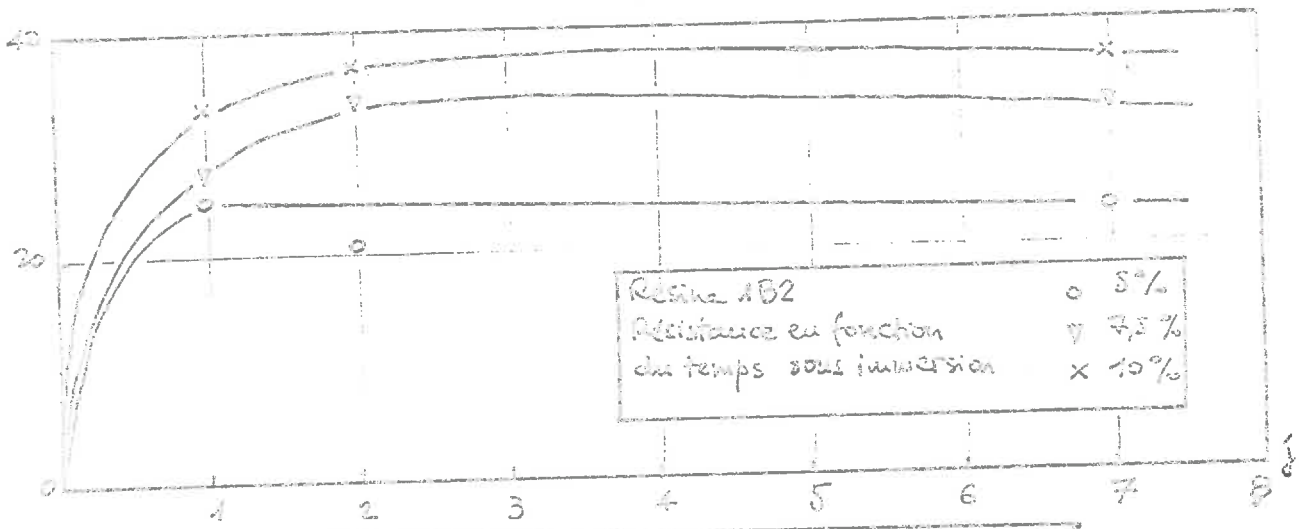
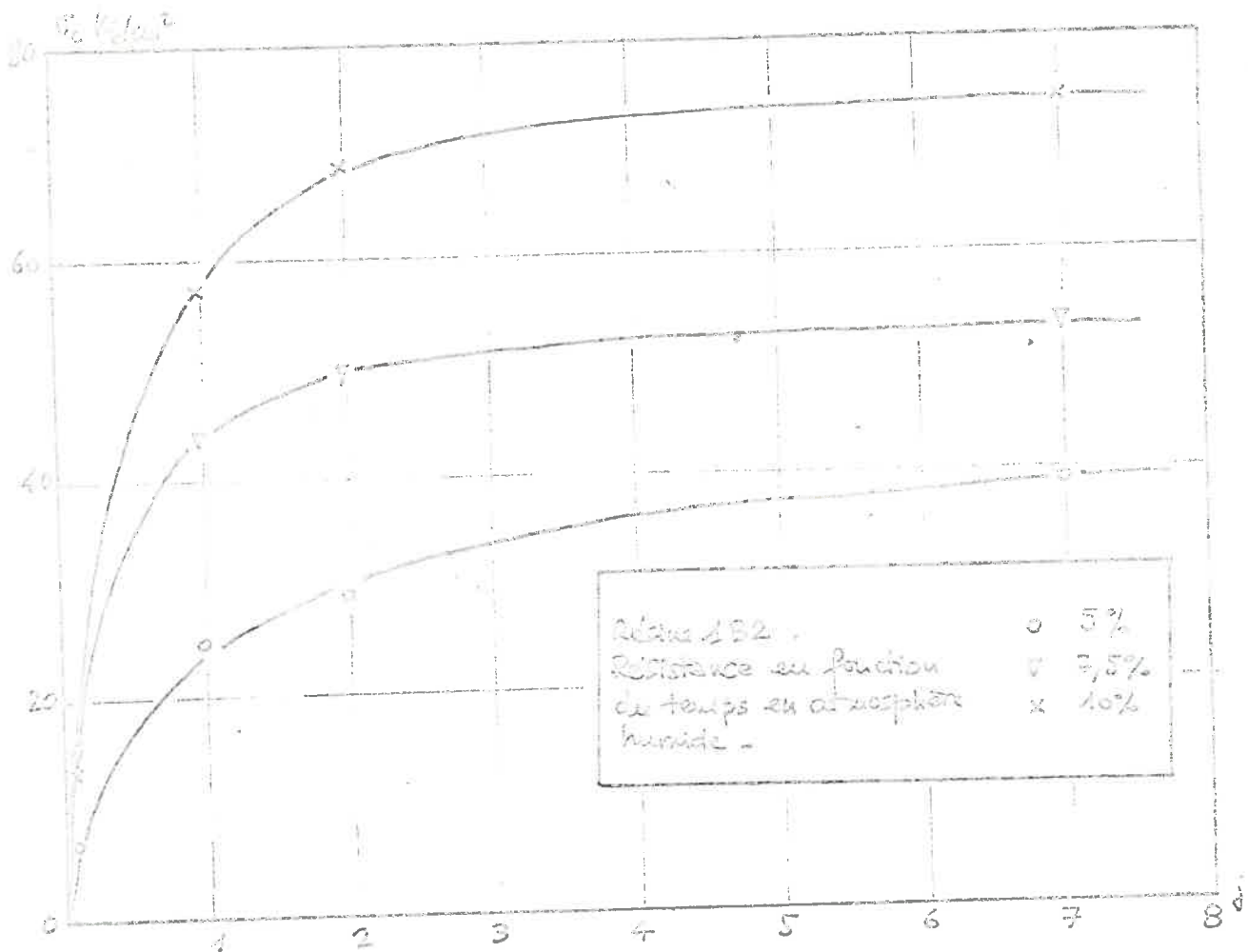


Fig I-6

JABUS STABILISÉ AVEC UNE RESORCINE-FORMAL

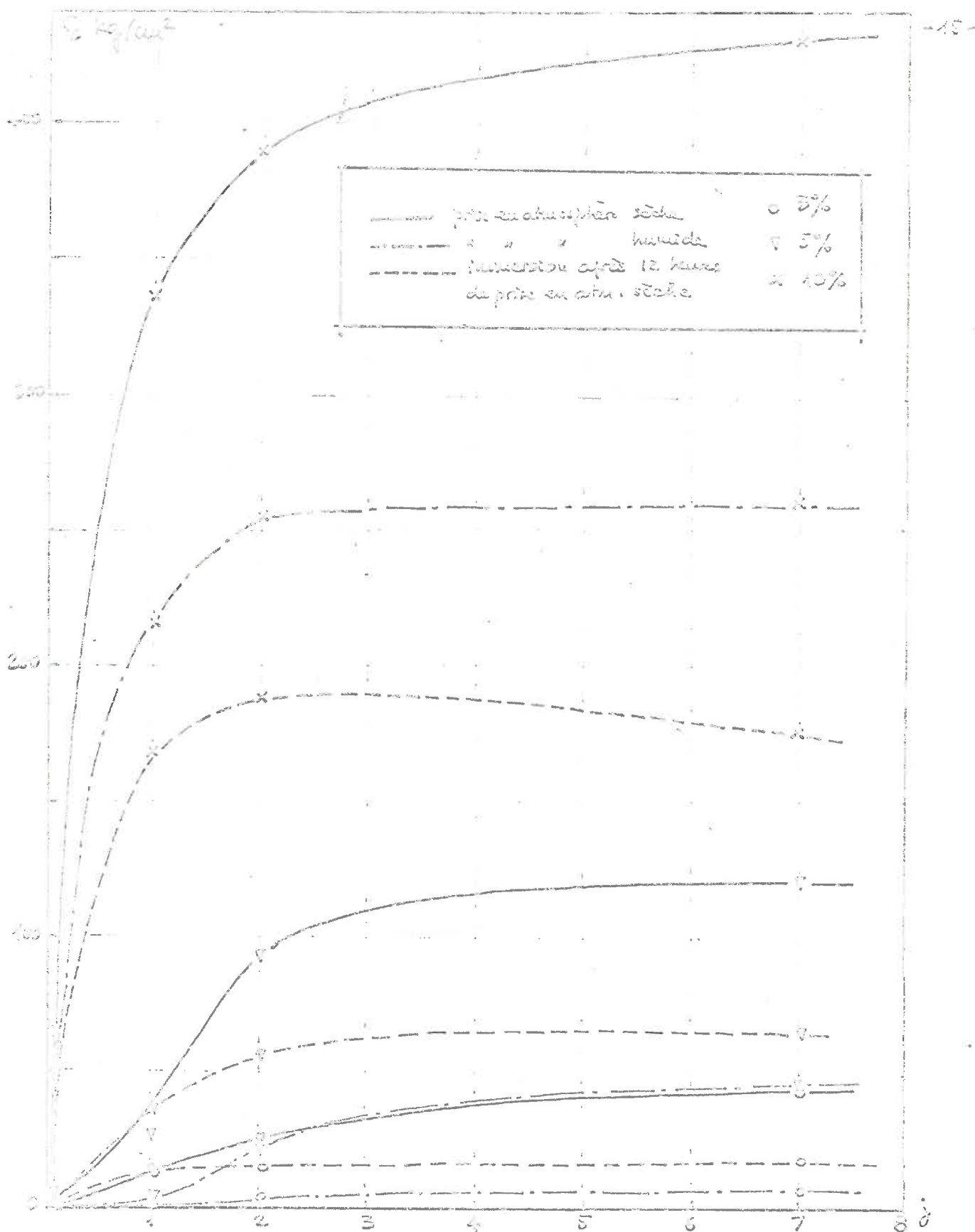


Fig. I-7

RESISTANCE EN FONCTION DU TEMPS D'UN SABLE STRAUCISE AVEC UNE RESINE POLYDETER. RHOODETER 2016 DL

### 2-5. Stabilisation à la Résine 12-33.

Une première étude a été faite cette année au laboratoire avec la résine 12-33. Les résultats en sont encourageants : en effet, cette résine, analogue à l'AM 9, donne des sols moins fragiles, et son temps de prise peut être réglé avec beaucoup de précision jusqu'à des valeurs extrêmement faibles.

D'autres études sont en cours, et un compte-rendu détaillé sera donné par la suite (cf. Thèse Claude MINOUBENS).

#### 2-5.1. La Résine 12-33.

2-5.11. Cette résine est produite par la SOCIETE PROCEL (France). C'est une solution aqueuse renfermant environ 44 % de N-méthylolacrylamide, une faible quantité (de l'ordre de 1%) de méthylène bisacrylamide et environ 55% d'eau.

#### 2-5.12. Caractéristiques Physiques.

. masse volumique à 20° C .....	1,08 à 1,09
. viscosité à 20° C .....	5 à 6 cp
. valeur du pH à 20° C .....	6 à 7,5

#### 2-5.13. Polymérisation.

La polymérisation est obtenue par :

. un système Redox :

- persulfate d'ammonium (de Na ou de K),
- diéthylaminopropionitrile.

..../..

. Éventuellement un inhibiteur : ferricyanure de potassium.

La polymérisation de la Résine 12-88 est du type radicalaire. Elle donne naissance à un réseau tri-dimensionnel à mailles assez longues. Le polymère ainsi créé est insoluble mais enferme généralement l'eau de dilution dans son réseau. Cette eau est mobile : elle pourra quitter le réseau par dessiccation par exemple, ou y revenir par immersion.

#### I-5.14. Temps de prise.

Le temps de prise peut être réglé de quelques minutes à quelques heures. Il dépend essentiellement :

a) des concentrations en persulfate d'ammonium, en résine 12-88, en DEAPK.

b) de la température de départ de la solution gélifiante.

c) du pH.

La variation du pH depuis la neutralité (état de la solution aqueuse de 12-88 au départ) vers des pH franchement alcalins provoque une accélération prononcée de la prise du gel.

Dans ce cas, il y a formation de chaînes beaucoup plus courtes au cours de la polymérisation, d'où une cohésion plus faible du gel.

On a alors intérêt à diminuer la teneur en persulfate d'ammonium.

De cette façon, chaque fois que le problème de l'emploi de 12-98 en milieu alcalin se pose, on procédera à un essai pratique préliminaire, l'influence de ce facteur ne pouvant être déterminée directement de façon quantitative avec précision.

### I-3.1. Essais réalisés.

#### I-3.11. Matériau utilisé.

Les essais ont porté sur l'argile de la Craie-Rouge (argile des dépôts de l'Isère), dont les caractéristiques ont été données plus haut (paragraphe I-3 A/).

#### I-3.12. Essais.

a) L'argile à 33,6% de teneur en eau initiale est passée à l'écrue, puis broyée finement. La solution 12-98 est ensuite ajoutée en même temps que l'eau et mélangée à l'argile sèche, à la spatule.

Cette méthode donne le meilleur mélange possible argile-séche, donc les meilleures performances qu'on est en droit d'attendre de ce procédé de stabilisation.

b) La teneur en eau de l'argile est d'abord ajustée à 40% (ceci afin d'aboutir à des essais qu'on puisse comparer à ceux obtenus avec les autres produits testés précédemment).

Puis la solution 12-98 est introduite de diverses façons :

- mélange à la spatule, solution et réactifs étant ajoutés séparément.

.../...



- mélange au malaxeur.

- l'argile, placée dans un moule, est secouée ; puis on introduit la solution I2-95 et les réactifs.

Ces trois processus se rapprochent plus ou moins des conditions d'emploi sur le terrain et montrent dans quelle mesure l'on peut tenir à des conditions optimales (mélange de la I2-95 à l'argile sèche broyée).

Les pourcentages indiqués dans les résultats des essais sont exprimés en poids sec de résine I2-95 par rapport au poids de sol sec.

#### I-5.23. Essais mécaniques.

Ce sont des essais de compression simple, la vitesse d'écrasement étant de 1 mm/mminute.

Dimensions de l'échantillon :

- diamètre  $\phi$  = 35 mm.
- longueur l = 70 mm.

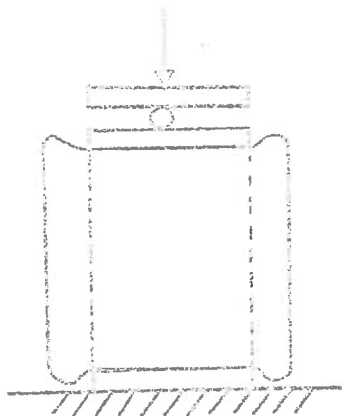


fig I-8

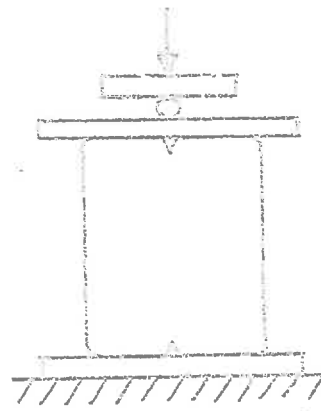


fig I-9

- le matériau étant très déformable, l'usage de plaques d'appui de 6 65 mm conduisait à un poinçonnement de l'échantillon [fig. I-6] qui ne serait plus en état de compression simple.

- c'est l'utilisation de plaques de diamètre supérieur à celui de l'échantillon, une pointe de 1 mm permettant de maintenir un bon centrage.

- les plaques étant graissées, on obtient ainsi, au cours d'essai, une déformation en cylindre [fig. I-6].

#### I-3.20. Mesures effectuées.

- . résistance après deux heures de prise (atmosphère humide).
- . résistance après 24 heures de prise (atmosphère humide).
- . résistance après 7 jours de prise (atmosphère humide).
- . eau absorbée à l'immersion.
- . variations de volume à l'immersion.

#### I-3.21. Résultats obtenus.

Les conditions sont les suivantes :

- solution de 12-95 à 40 g.
- Pourcentages variant de 0 à 8% (exprimés en pourcentage de poids de résine pure par rapport au poids de sol sec).
- DEAFN : 0,60.
- persulfate d'ammonium : 0,250
- (pourcentages exprimés par rapport au poids d'eau total contenu dans le sol et dans la solution de 12-95).

« malaxage suivant la méthode indiquée dans I-8.22 a) -  
(c'est-à-dire malaxage supposé idéal).

a) Les résistances après deux heures et 24 heures  
de prise en atmosphère humide sont reportées dans les  
figures I-10 et I-11 .

Elles sont voisines.

b) Résistances après deux heures de prise et  
7 jours d'immersion comparées aux résistances après 2 heures  
de prise :

12-66 4	Résistance 7 jours Kg/cm <sup>2</sup> -	Résistance 2 heures Kg/cm <sup>2</sup> -	$\Delta$ (Résistance) Kg/cm <sup>2</sup>
3	1,8	1,9	0,9
4	1,8	2,8	0,8
5	7	2,55	0,55

On observe une diminution de résistance assez  
considérable, de l'ordre de 30%.

c) Eau absorbée à l'immersion (7 jours).

12-35 g	v % initial -	v % final -	$\Delta W$ %
3	49,5	71,5	22
4	45	82	37
5	47,5	85	37,5

L'absorption d'eau est donc très importante.

d) variation de volume à l'immersion (7 jours).

Pour 3g de 12-35, on note un gonflement d'environ 50% en volume.

#### 1-3.26. Autres essais.

- mélange à la spatule du sol humide avec la solution 12-35 : on obtient des résultats très voisins de ceux obtenus précédemment (mélange du sol sec broyé avec eau et solution 12-35).
- l'introduction du produit directement dans le sol, au préalable scellé, ne donne aucun résultat valable.

.../...

### I-3.3. Résultats.

Les courbes donnant la contrainte  $\sigma$  de compression simple en fonction de  $\frac{\Delta l}{l_0}$  peuvent être confondues avec des droites jusqu'à des valeurs de  $\frac{\Delta l}{l_0}$  voisines de 40 à 50%. Le matériau obtenu semble donc suivre la loi de Hooke dans un grand domaine de déformations.

D'ailleurs, la résine 12-55 seule, lorsqu'elle vient d'être polymérisée, a un comportement analogue à celui du caoutchouc. Par la suite, elle se durcit et se craquelle, à cause de son dessèchement progressif à l'air.

Les essais effectués semblent montrer que l'argile stabilisée à la 12-55 a un coefficient de Poisson voisin de 0,5, le module d'Young variant de 3 à 6 Kg/cm<sup>2</sup> lorsque le pourcentage de 12-55 passe de 3 à 5%.

L'étude actuellement en cours devra préciser ce point, ainsi que l'étendue du domaine d'élasticité des matériaux obtenus.

### I-3.4. Conclusions et Essais à effectuer.

Ces premiers résultats sont très intéressants mais les essais décrits ci-dessus ne constituent qu'une approche de la connaissance des qualités réelles qu'on peut attendre de la stabilisation à l'aide de la résine 12-55.

Les résultats donnés ici pour les contraintes en fonction de la déformation ne semblent plus valables au-delà du domaine d'élasticité, c'est-à-dire au-delà de 30 à 40% de déformation, parce que les contraintes ont été calculées à partir de la section qu'on obtient dans une déformation en cylindre en supposant la non-variation de volume, ce qui doit être incorrect.

L'étude en cours devra également préciser ce point. On pourra étudier aussi les propriétés mécaniques de la solution 12-33 polymérisée seule, et leur évolution dans le temps en atmosphère sèche, en atmosphère humide et dans l'eau.

Avec une argile plastique et très humide, on obtient un matériau :

- très déformable (plus de 50% de déformation sans rupture),
- élastique dans un grand domaine de déformations,
- résistant à la traction.

Ceci est une estimation qualitative, et il faudrait entreprendre des essais de traction.

A l'immersion, l'absorption d'eau et la variation de volume sont très importantes, mais il faut noter que les essais réalisés étaient très sévères (7 jours d'immersion au lieu de 24 heures généralement).

Les valeurs obtenues pour la résistance à la compression simple peuvent sembler un peu faibles par rapport aux performances de résines telles que l'AM 9. Mais il faut remarquer que la teneur en eau est très élevée du fait que la résine 12-93 est en solution à 40 %. En principe, une solution plus concentrée devrait donner de meilleurs résultats.

Les essais en cours utilisent une nouvelle solution à 57 %. On pourra également envisager les essais suivants :

- essais de traction,
- essais de fatigue,
- étude du phénomène d'écrouissage,
- addition d'un absorbant d'eau, tel que silicate absorbant ou CaO ...

Le silicate avec réactifs donnant un matériau très dur mais fragile, et la résine 12-93 donnant un matériau très déformable, on peut penser que le mélange des deux produits est intéressant. Il est d'ailleurs étudié pour les injections par la Société PROCEL.

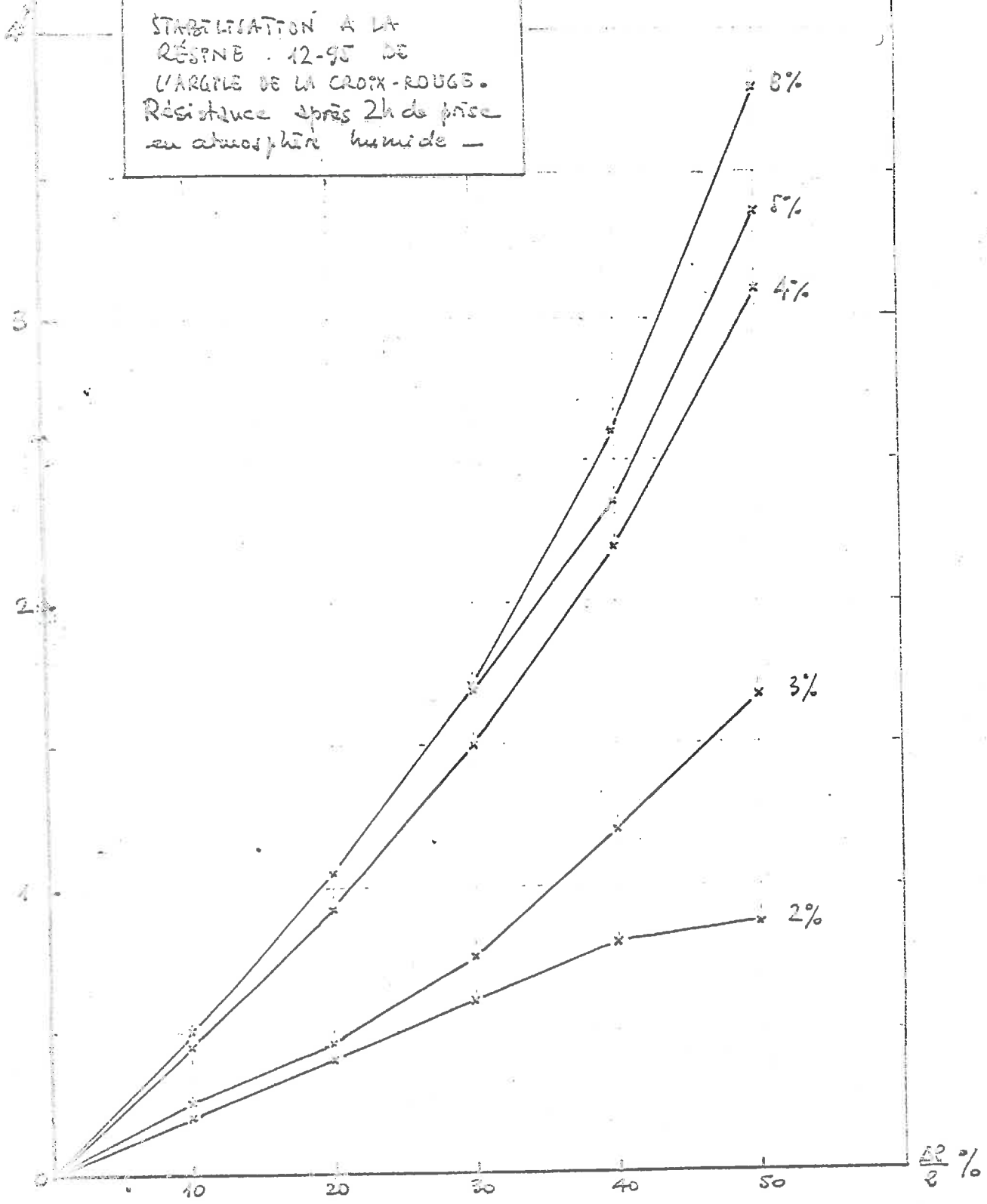
En fait les premiers essais réalisés avec le mélange 12-93 - silicate donnent de bons résultats du point de vue mécanique, et les essais sont à poursuivre.

L'inconvénient de ce procédé reste évidemment la mise en œuvre, puisqu'il y a alors deux groupes de produits additifs : les réactifs du silicate et le système catalytique de la résine.

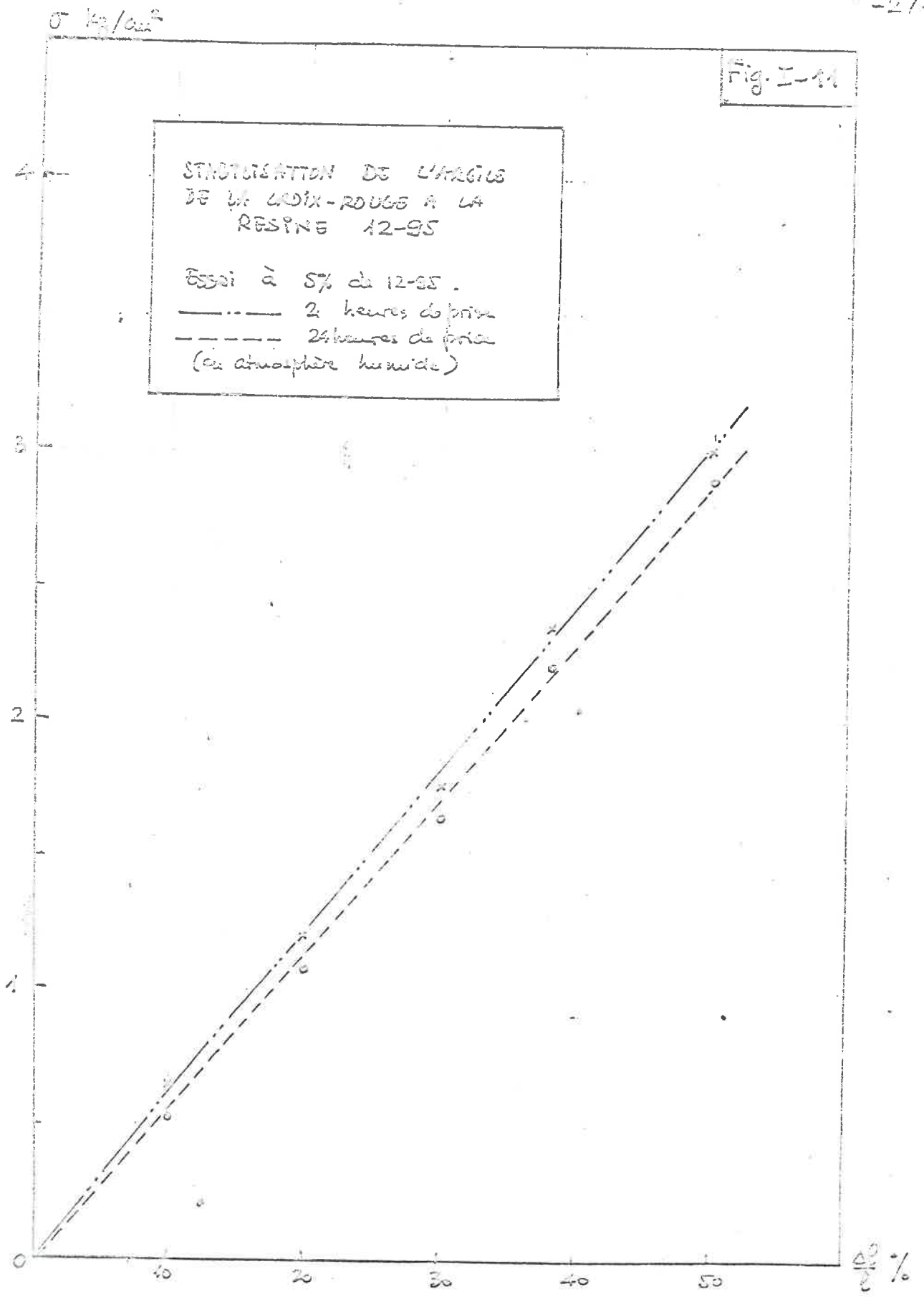
$\sigma$  kg/cm<sup>2</sup>

Fig I-10

STABILISATION A LA  
RESINE 12-95 DE  
L'ARGILE DE LA CROIX-ROUGE.  
Resistance apres 2h de prise  
en atmosphere humide -







### 1-8. Difficultés de mise en oeuvre sur le terrain de la stabilisation par voie chimique.

#### 1-8.1. Problèmes à résoudre.

Comme nous l'avons vu précédemment, on arrive parfaitement, au laboratoire, à stabiliser en moins de deux heures des sols aussi mauvais que des sables secs sans cohésion (type sable de dune), et des argiles de faible densité et saturées (type bouillier) en employant les divers produits : Résine AF 8, Résine 11-35, urée-formol, résorcine-formol ou polyester.

Alors qu'au laboratoire, la mise en oeuvre ne présente pas de difficultés en raison des faibles quantités de sol à stabiliser pour les essais de compression simple réalisés sur éprouvettes.

En revanche, la réalisation pratique de la stabilisation sur le terrain par addition et mélange au sol de produits chimiques présente de grosses difficultés de mise en oeuvre.

Les problèmes principaux à résoudre dans la pratique sont les suivants :

A/- Pour être efficaces, les produits doivent être mélangés intimement au sol, et de façon homogène.

B/- Le procédé de mise en oeuvre doit être simple, et applicable sur des types de terrains variés. Il ne faut pas qu'on soit obligé de changer, à quelques dizaines de mètres d'intervalle, les produits, les pourcentages de ces derniers ou des catalyseurs, le matériel employé, suivant

..!..

que le terrain est cohérent ou pulvérisant, très perméable ou imperméable, etc...

C/- Les quantités de produit employées ne doivent pas devenir exorbitantes.

On admet généralement que le sol doit être stabilisé sur une épaisseur de 10 à 20 cm. Les pourcentages minima des produits par rapport au poids de sol sec varient de 5 à 10%.  $\gamma$  varie de 1 à 1,5 g/cm<sup>3</sup>.

La quantité de produit à employer par mètre carré doit donc varier de 10 à 30 Kg.

I-6.2. Cas pratiques.

Voyons comment on peut résoudre ces problèmes dans les deux cas pratiques principaux : sables secs sans cohésion et argiles saturées de faible densité.

I-6.11. Sables secs pulvérisants.

Le procédé de mise en oeuvre le plus simple qu'on puisse imaginer est l'arrosage du sol par une solution d'un des produits passés en revue plus haut : AM 9, 12-96, urée-formol, résorcine-formol ou polyester.

Les deux derniers de ces produits ayant une viscosité élevée, il faudrait accompagner l'arrosage d'un malaxage du terrain : si l'en veut s'en tenir au simple arrosage, il faut donc employer une solution très fluide, du type AM 9 ou 12-96.

En admettant que le sol soit très homogène, on se rend compte immédiatement qu'il faudrait pouvoir régler avec précision le temps de pose en fonction de la perméabilité du sol pour avoir une couche stabilisée respectant les conditions imposées concernant son épaisseur, le pourcentage minimum de produit dans cette couche et la quantité totale projetée par mètre carré.

De plus, si le sol n'est pas homogène, on ne pourra s'en tirer qu'en augmentant de façon notable cette quantité totale de produit par mètre carré.

#### 1-3.22. Argiles saturées de faible densité.

Il n'est plus question alors de simple arrosage du sol, le produit ne pouvant pénétrer suffisamment dans les délais imposés. Un malaxage est alors nécessaire.

Or, le malaxage efficace d'un sol argileux sur une certaine épaisseur avec les matériels classiques de Travaux Publics n'est pas possible.

#### 1-3.3. Conclusions.

A/-  
Devant ces difficultés très importantes d'ordre pratique, nous avons donc envisagé la réalisation et la mise en œuvre d'un autre procédé de stabilisation s'inspirant du principe des procédés classiques qui utilisent des plaques rigides ou des tapis préfabriqués.

B/- Le procédé de stabilisation par mélange de produits chimiques au sol, s'il n'est pas suffisant, n'est cependant pas à rejeter définitivement.

La résine 12-88 expérimentée cette année et avec laquelle des essais sont en cours, semble intéressante : l'on peut en effet régler avec une grande précision son temps de prise, de deux heures jusqu'à des valeurs très petites.

1) Des essais de stabilisation par arrosage in situ sont donc à entreprendre, du moins pour les sables, peut-être pour les limons, avec cette résine.

L'inconvénient est que le procédé n'est pas applicable à la fois aux sables et aux argiles saturées.

De plus, comme nous l'avons indiqué, il est probable qu'on sera amené à utiliser de grandes quantités de produit par mètre carré.

2) D'autre part, le procédé de stabilisation par mélange de produits chimiques au sol en place peut toujours être envisagé en même temps qu'un tapis de surface en polyester armé. Des essais seront également à entreprendre, dans ce sens.

## CHAPITRE II

### STABILISATION PAR TAPIS DE SURFACE

- - - - -

#### II-1. Introduction.

Devant les difficultés soulevées par la mise en oeuvre de la stabilisation par voie chimique, notamment la nécessité du malaxage des argiles saturées, nous avons orienté nos recherches vers un procédé de stabilisation totalement différent de tout ce que nous avons essayé auparavant.

##### II-1.1. Moyens existants.

Actuellement, quels sont, pour permettre le passage d'un nombre limité de véhicules en terrain intrajicible, les procédés à notre disposition ?

- soit la stabilisation par voie chimique,
- soit des tapis préfabriqués que l'on déroule,
- soit des plaques rigides que l'on pose sur le sol.

..../..

Ces dernières peuvent être des profils d'acier, des grillages, ou différentes sortes de plaques préfabriquées à base en bois, en aluminium, etc... (Type "Landing-mat").

### II-1.2. Inconvénients.

- On a vu dans le paragraphe I-8. quelles sont les difficultés rencontrées dans la mise en oeuvre sur le terrain de la stabilisation par voie chimique.

- Pour les autres procédés :

- . ou bien le poids du matériel à transporter par mètre carré de sol à stabiliser est prohibitif (c'est le cas des plaques d'acier ou des "Landing-mat") ;
- . ou bien, lorsqu'il s'agit des tapis préfabriqués ou des grillages, il y a rapidement formation d'ornières importantes.

### II-1.3. Principe des Tapis de Surface.

D'où l'idée de fabriquer "in situ" un tapis, comportant les avantages des divers types précédents, sans leurs inconvénients, c'est-à-dire un tapis qui soit suffisamment rigide et résistant à la fatigue (tout en ne nécessitant que le transport d'un poids réduit de matériaux), résistant à la traction et adhérant au sol de façon à mobiliser la résistance au cisaillement de celui-ci.

### II-1.4. Réalisation.

Il nous a semblé qu'une des meilleures façons de réaliser "in situ" un tapis de surface, était d'utiliser un styrifié formé de polyester renforcé avec de la fibre de verre.

Ceci est possible à l'aide d'appareils existant dans l'industrie où on les utilise pour la fabrication d'objets de résine armée, dont les applications prennent une importance considérable dans des domaines variés : plaques pour toitures ou cloisons, cuves et réservoirs, tuyauteries, carrosseries, bateaux, etc...

Nos recherches ont porté uniquement sur l'application des polyesters armés de fibre de verre, mais il n'est pas exclu qu'on puisse utiliser d'autres "plastiques" ou d'autres renforcements.

### II-2. Notions élémentaires sur la formation et la structure des matières plastiques.

Les matières plastiques ont pris depuis plusieurs années une importance croissante dans l'industrie et, dans de nombreuses applications, elles peuvent, grâce à leurs propriétés mécaniques, leur prix, leur poids, la facilité de leur mise en œuvre ..., remplacer avantageusement les matériaux traditionnels.

Avant d'étudier plus particulièrement celles que nous avons retenues pour la réalisation de tapis de surface, nous donnerons un aperçu des différentes matières plastiques

.../...



susceptibles d'être utilisées pour le problème qui nous intéresse, après avoir rappelé quelques données élémentaires sur leur formation et leur structure.

Il est nécessaire en effet d'expliquer de tels mécanismes d'élaboration structurale, car toutes les caractéristiques de la matière et son comportement dépendent étroitement de la structure et de la façon dont l'accrochage entre chaînons et entre chaînes s'est réalisé.

### II-2.1. Mécanisme de formation des réseaux macromoléculaires.

#### II-2.1.1. Éléments de chaînes.

##### 1. Principe des liaisons

Les chaînes macromoléculaires peuvent se former parce qu'il y a accrochage de chaînons, c'est-à-dire de motifs chimiques de molécules. Or, cet accrochage est fait par deux types de liaisons, les liaisons covalentes et les liaisons ioniques.

Les liaisons ioniques sont dues à l'assemblage d'atomes et de molécules de charges opposées - (électro-positives et électro-négatives) par attraction électrostatique.

Les liaisons covalentes sont des liaisons où il y a mise en commun d'électrons deux à deux.

C'est le type de liaison essentiel pour accrocher les carbonés les uns aux autres.

## 2. Les chaînes carbonées.

Cette possibilité d'assembler les carbonnes va conduire à un certain nombre d'assemblages possibles. On représente souvent le carbone (tétravalent) par un tétraèdre, chaque sommet représentant une valence.

Dans cette représentation, deux carbonnes peuvent être assemblés par un sommet, une arête ou une face.

a) Dans le cas des deux tétraèdres réunis par un sommet, on réalise la simple liaison. La distance entre les noyaux des deux carbonnes est alors de 1,54 angström.

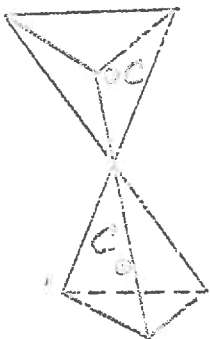


Fig. II-1

Deux carbonnes ainsi assemblés par simple liaison ont une force de liaison de 81 kilocalories par molécule, c'est-à-dire qu'il faut fournir cette énergie pour rompre la cohésion de ces deux carbonnes.

Il reste pour chaque carbone trois valences libres, où peuvent s'assembler des motifs chimiques divers.

b) L'assemblage par une arête du tétraèdre donnera par contre la double liaison. La distance entre les deux carbonnes est de 1,32 angström.

..!..

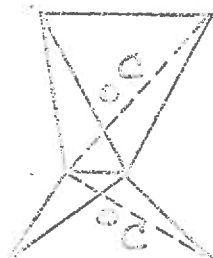


Fig. II-2

c) Enfin, la troisième façon dont peuvent s'assembler deux carbonnes ; par une base complète. A ce moment-là, les carbonnes deux à deux mettent trois sommets en commun.

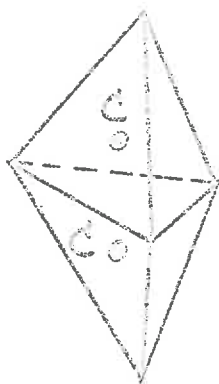


Fig. II-3

L'énergie qu'il faut pour dissocier ces deux carbonnes est de 148 kilocalories par molécule contre 81 kilocalories pour la simple liaison, c'est-à-dire presque deux fois plus.

Il n'y a plus pour chaque carbonne que deux sommets libres.

Il n'y aura plus pour chaque carbonne qu'un sommet libre.

Dans ce cas, la distance entre noyaux est réduite à 1,20 angström, mais par contre l'énergie qu'il faut fournir pour dissocier ces deux carbonnes est de 200 kilocalories par molécule.

Pratiquement, dans les chaînes macromoléculaires, la double liaison sera un élément essentiel du mécanisme de formation de nombreux réseaux des matières plastiques.

Quels sont les types de chaînes que peuvent donner ces assemblages de carbones ?

### 1. Les chaînes alkylées.

Elles comprennent :

- soit des composés saturés où les carbones sont unis par simple liaison,
- soit des composés insaturés comprenant des carbones liés par double liaison.

### 2. Les chaînes aryllées.

Leur motif structural part du noyau benzénique où les carbones forment un hexagone.

### 3. Les chaînes alkyl-aryllées.

On peut également avoir combinaison de motifs aryllés avec des motifs alkylés. Un exemple bien connu que nous retrouverons plus loin est celui du styrène, formé d'un noyau benzénique avec liaison sur un des six carbones du radical vinylic  $-CH=CH_2$  de type alkylé, celui-ci comprenant une double liaison.

Ce motif vinyl-benzène constitue le styrène. Un tel produit est appelé monomère : il contient le motif structural qui donnera le "mer" dont la répétition formera le polymère.

Le monomère est représenté par la formule chimique suivante :

II-2.12. Assemblage de ces motifs :

Formation des Polymères :

La polymérisation est l'assemblage de plusieurs "mers".

a) Mais en chimie traditionnelle, plus restreintement, polymérisation désigne le processus de formation de chaînes par ouverture de doubles liaisons sans formation de corps résiduels. Ce processus de polymérisation constitue plus spécifiquement la polyaddition.

L'ouverture des doubles liaisons se fait par apport d'une énergie d'activation, qui peut être fournie par de la chaleur, des rayonnements, ou, comme nous le verrons en particulier dans les polyesters, par catalyseurs.

b) L'autre processus que l'on rencontre pour l'assemblage des motifs est la polycondensation. Cette fois il y aura formation de corps résiduels.

La polymérisation au sens étendu est donc l'assemblage répété de motifs, qui peut se faire de deux façons : polyaddition ou polycondensation.

### II.2.13. Réseaux formés par ces macromolécules. Copolymérisation.

À partir des chaînes, on va pouvoir former des réseaux.

#### 1) Réseaux linéaires : thermoplastiques.

Les chaînes sont linéaires.

Ces chaînes ont une cohésion, comme on l'a vu, par liaison des "mers" entre eux qui sont très fortes. Mais entre chaînes, il y a des attractions latérales bien plus faibles qui expliquent que l'on puisse, et l'on apporte une certaine source d'énergie (par exemple de la chaleur), ou et l'on affaiblit les forces d'attraction entre chaînes (par action d'un solvant), décaler ces chaînes ; ce qui explique que les thermoplastiques soient solubles et fusibles.

## 2) Réseaux tridimensionnels : thermodurcissables.

Si on réalise au contraire un réseau dans l'espace où les chaînes sont liées entre elles, on aura des chaînes qu'on ne pourra plus séparer : on formera ainsi des réseaux tridimensionnels.

Contrairement aux réseaux linéaires, les réseaux tridimensionnels donneront des matériaux plastiques infusibles et insolubles.

On pourra les obtenir par exemple en partant d'un réseau linéaire comme précédemment, mais en le "pontant", c'est-à-dire que des motifs (tels que du styrène) créent des liaisons chimiques d'une chaîne à l'autre.

On aura obtenu un réseau linéaire ponté (ou réticulé).

Cette réaction est appelée habituellement, mais à tort, polymérisation. En réalité, il s'agit d'une condensation entre les radicaux des deux constituants, de nature différents.

On tiens en obtiendra directement dans l'espace un véritable réseau à mailles serrées par des actions polyfonctionnelles créant des liaisons chimiques simultanées dans plus de deux directions à la fois pour chaque unité structurale formée.

On obtiendra un réseau multifonctionnel maille.

Là où il y aura un réseau à mailles serrées on aura un corps thermodurci rigide et dur.

De nombreux thermodurcissables peuvent être durcis à froid, à l'aide de catalyseurs et d'accélérateurs de prise, comme nous le verrons à propos du durcissement des résines polyester insaturées.

III-2.13. Rôle des liaisons.

On a vu qu'il y avait forces de cohésion dans les chaînes, et entre chaînes.

Quelle est l'importance de ces forces de cohésion ?

1) Liaisons primaires.

Elles entraînent la cohésion intermoléculaire. Elles sont de type ionique ou covalent.

L'importance des liaisons ioniques est d'environ 150 kilocalories par molécule.

Pour les liaisons covalentes, les valeurs sont de 51 à 200 kilocalories par molécule pour les trois types de liaisons entre carbones, entre 55 et 200 pour le carbone avec d'autres corps, et de 75 à 110 pour des liaisons covalentes simples diverses sans carbone concentrées dans les matières plastiques.

2) Liaisons secondaires.

Elles entraînent les attractions intermoléculaires.

Ce sont les forces de Van der Waals (1 à 7 kilocalories par molécule) et les liaisons hydrogène (H) (de 4 à 10 kilocalories).

C'est d'elles que dépendent les possibilités de comportement élastoplastique des matières plastiques.

### II-2.11. Polymères fonctionnels dans les macromolécules.

Sans entrer dans le détail, signalons simplement que ces fonctions donnent souvent le nom même aux catégories de résines spécialement utilisées.

Par exemple, lorsqu'on parle de polyesters pour une résine, cela indique d'abord qu'on a la fonction ester dans le motif structural, donc que l'on a des chaînes avec le groupe  $-COO-$  caractéristique de la fonction ester, ce qui est le cas pour de très nombreuses résines. D'où la forme générale :  $R-COO-R'$  caractérisant cette fonction dans un polyester.

La désignation des principales résines connues caractérise souvent la fonction chimique sans désigner toujours une résine spécialement formulée. Ainsi, "polyester" définira tout produit macromoléculaire ayant cette fonction ester dans son unité structurale.

Il ne faut donc pas s'étonner d'avoir des polyesters de caractéristiques différentes. Et il en est de même pour les époxydes par exemple, ou d'autres résines.

### II-2.2. Comportement rhéologique.

#### II-2.21. Types de comportement.

De toutes ces données examinées rapidement, il résulte que le comportement des matières plastiques varie en fonction de la structure. Par conséquent, on pourra guider son choix parmi les matériaux existants, ou même donner de précieuses indications aux laboratoires des sociétés chimiques en précisant les qualités recherchées.



Nous n'étudierons pas le problème général de la Kinologie des Plastiques, qui engloberait largement le domaine qui nous intéresse.

D'autre part, le problème devient différent dès qu'on a, comme dans notre cas, un mélange élasto-résine.

Rappelons simplement qu'un matériau plastique pourra avoir trois types de comportements :

1) Matériau résilient sans rupture brutale.

Le type de courbe de traction contrainte-allongement est le suivant :

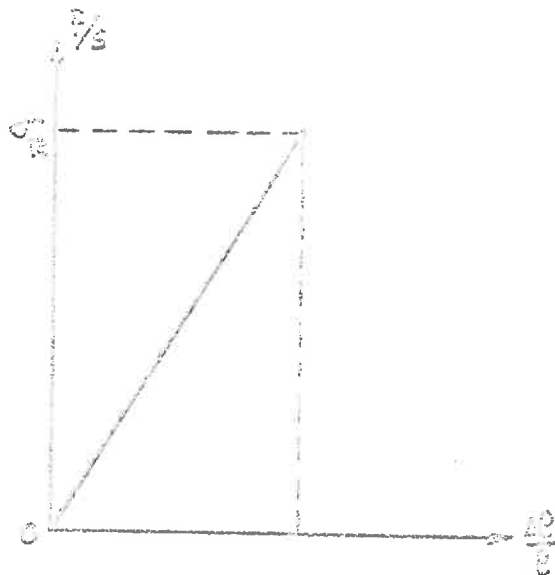


Fig. II-1

Ceci dans une zone de température et pour une vitesse de sollicitation données.

### 2) Zone d'extensibilité.

C'est le cas particulièrement pour les polymères thermoplastiques. À partir d'une certaine température et d'une certaine contrainte, il y aura écoulement des molécules.

On obtient une courbe de traction contrainte-allongement avec seul d'écoulement et palier de plasticité parfaite.

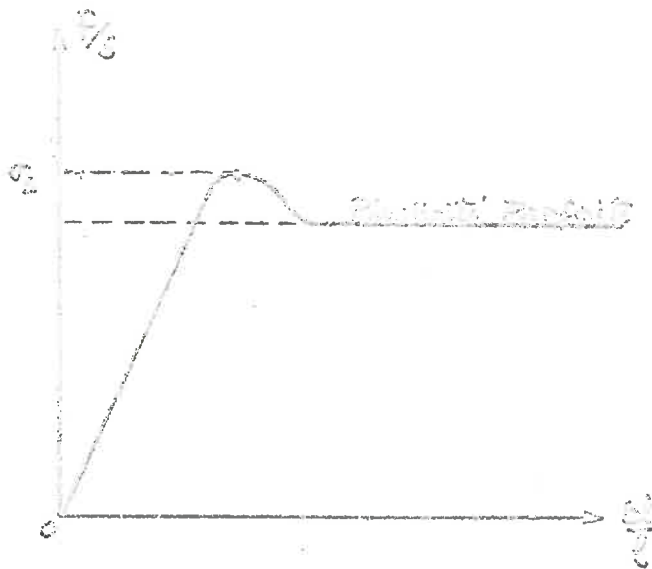


Fig. II-3

On obtient enfin l'état post-élastique, qui correspond au comportement-type des élastiques. Les courbes de traction accusent des valeurs de contraintes très faibles pour de très grands allongements, avec valeur élastique tant que la valeur de rupture n'est pas atteinte.

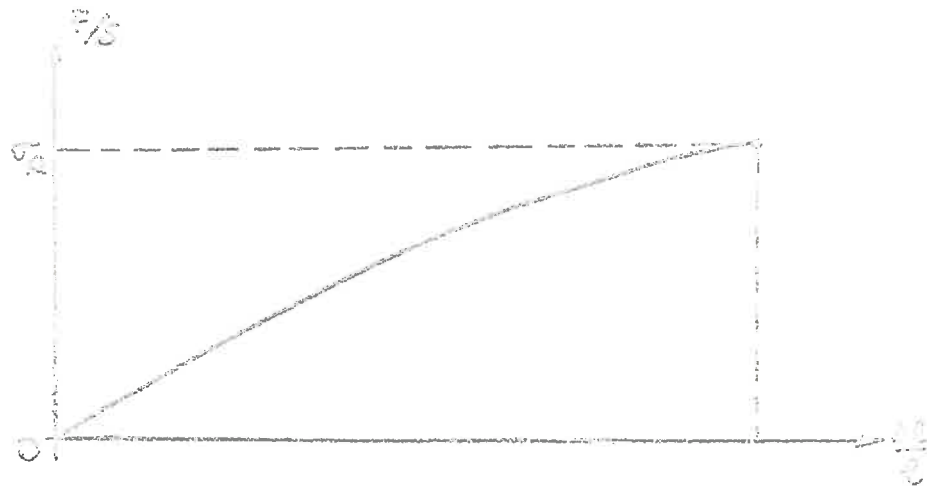


Fig. 22-5

Notons que non seulement un même plastique peut donner ces différentes courbes de déformation pour les zones de températures correspondant aux différents états ci-dessus, mais on peut avoir à passer d'une courbe de traction à l'autre quand la température change, ou de l'une à l'autre quand la durée de l'effort ou la vitesse de sollicitation croît ou décroît.

II-2.17. Caractéristiques des matières plastiques pour  
partir des propriétés en cisailant.

Les matières plastiques ont un module d'Young relativement faible. Le fig. II-7 donne les modules d'élasticité des sources moyennes de traction de divers matériaux.

II-2.18. Caractéristiques des matières plastiques pour  
partir du module de cisailant et des propriétés en  
cisailant relatives.

Pour la rigidité, nous prenons les modules de cisailant  $G$ . En élasticité,  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ . Le module de cisailant est donc voisin du tiers du module d'Young.

a) La plupart des résines thermoplastiques à réaction tridimensionnel se rangent dans la catégorie des rigidifiants. Le module de cisailant est supérieur à 10 kg/cm<sup>2</sup>, les allongements à la rupture ( $\epsilon_r$ ) sont faibles (de 1 à 3%), et en ce qui concerne l'allongement permanent ( $\epsilon_p$ ), on caractérise cette mesure par le valeur permanent une minute après la cession de traction à la moitié de la valeur de l'allongement correspondant à la rupture,  $\epsilon_p$ , avec généralement nul.

b) ensuite, on a les plastiques, soit rigides, soit flexibles.

c) enfin les élastomères. (cf. fig. II-8).

### II-2.2. Résines thermoplastiques.

Nous avons vu que c'était cette catégorie de matières plastiques qui pouvait nous intéresser, pour le problème particulier de la stabilisation des sols.

Citons-les simplement :

- les polyesters tridimensionnels,
- les résines phénoliques,
- les aminoplastes,
- les polyuréthanes,
- les polyépoxydes,
- les résines époxydiques,
- les résines silicones.

Les résines de polyester sont, sans aucun doute, les résines les mieux connues et les plus utilisées dans la préparation des stratifiés renforcés par les fibres de verre, probablement à cause de l'ensemble : prix, propriétés et aptitude au moulage au contact, c'est-à-dire sans pression.

Les autres résines sont en général utilisées pour leurs avantages sur les polyesters dans un domaine particulier, comme par exemple leur résistance chimique ou leur résistance à la chaleur.

Pour les tapis de surface destinés à la stabilisation du sol, il semble que les polyesters soient actuellement les mieux adaptés en raison de leur prix, leurs propriétés mécaniques excellentes, leur facilité d'emploi, et surtout de leur possibilité de prise rapide dans un grand domaine de températures, en particulier jusqu'au voisinage de 0° C, et en milieu humide.

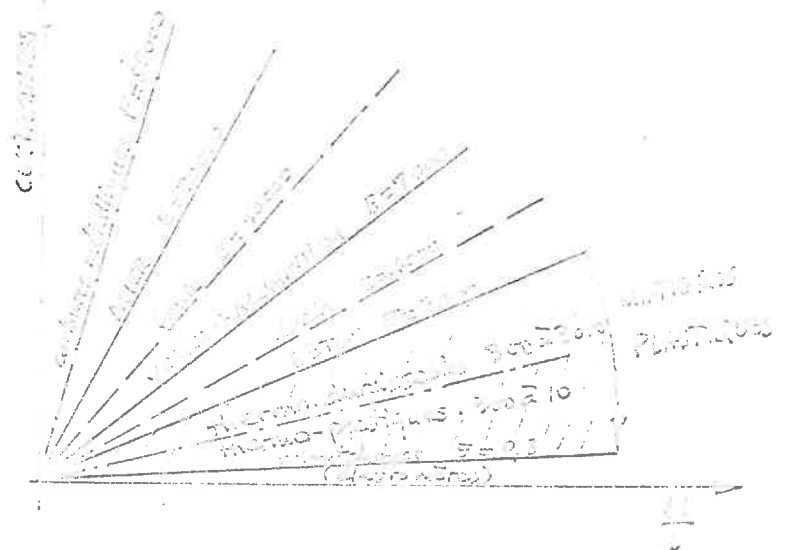


Fig. II-7

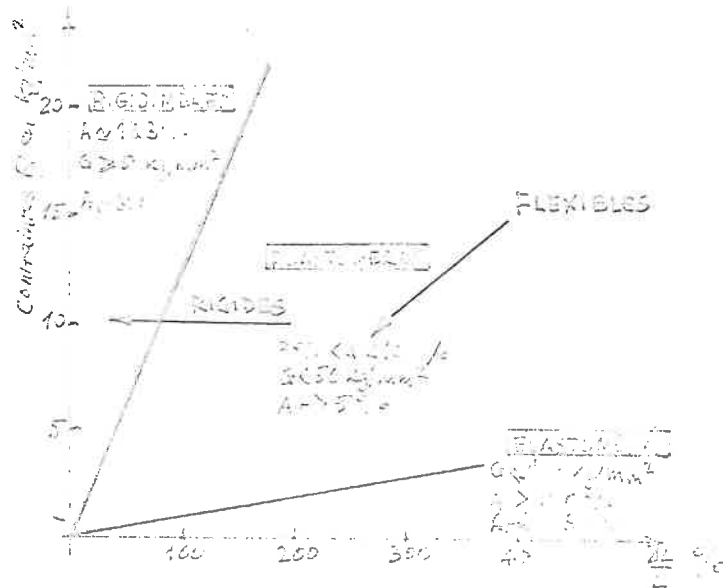


Fig. II-8

III-3. Les Esters.

III-3.1. Définition.

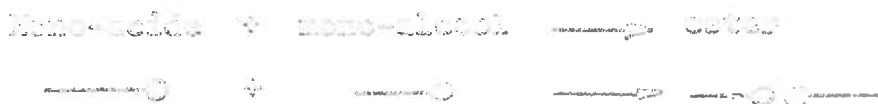
Appelons que l'estérification est la réaction d'un acide sur un alcool.



La réaction se complique dès que l'un des substituants est polyfonctionnel.

Différents schémas sont possibles :

- cas simple :



- cas de polymères linéaires thermoplastiques :



1) Les polyesters aliphatiques :

a) diacide + tri-alcool  $\rightarrow$  polyester aliphatique  
 (non réticulé)  $\rightarrow$  obtenu par polycondensation



b) acide (2 fonctions acide) + alcool (2 fonctions alcool)  
 2 fonctions (glycolique)

ou :

acide (2 fonctions acide + 1 fonction (glycolique)  
 + alcool (2 fonctions alcool) :

di-acide + di-alcool  $\rightarrow$  polyester aliphatique  
 linéaire



avant réticulation.



Après polymérisation, on obtient la chaîne :



qui est obtenu par polycondensation suivie d'une polymérisation (paragraphe II-1.21).

Les polyesters thermofusibles sont donc de deux sortes :

1) les polyesters saturés thermofusibles obtenus par polycondensation d'un di-acide saturé sur un tri-alcool saturé.

2) les polyesters insaturés thermofusibles.

Ce sont ceux qui constituent les polyesters commerciaux. Ils sont obtenus par action d'un di-acide saturé sur un di-alcool insaturé ou d'un di-acide insaturé sur un tri-alcool saturé.

Les systèmes ainsi obtenus sont des liquides essentiellement visqueux et transparents à polymère linéaire obtenu, grâce aux doubles liaisons qu'ils supportent aisément, par suite l'influence de certains cyclopropane et de la chaîne continue à des points tridimensionnelles, donc thermiquement stables.

Cependant, les polyesters non saturés n'ont pas subi les mêmes modifications physiques (en raison de leur poids moléculaire plus faible, entre autres).

Mais l'introduction de certains hydrocarbures non saturés peuvent réagir, grâce à leurs doubles liaisons, avec le polymère linéaire, et permet de modifier profondément la structure moléculaire.

Une résine polyester non saturée est donc un mélange liquide de composant :

- d'un polymère non saturé en résine dans un monomère.
- d'inhibiteurs que l'on ajoute en très faible dose pour la bonne conservation du mélange et stockage.

Sous l'action d'un catalyseur, le polyester et le monomère associé copolymérisent par leurs groupes insaturés pour donner une chaîne tridimensionnelle, donc thermiquement stable, et ceci sans dégagement d'eau ou de produits secondaires.

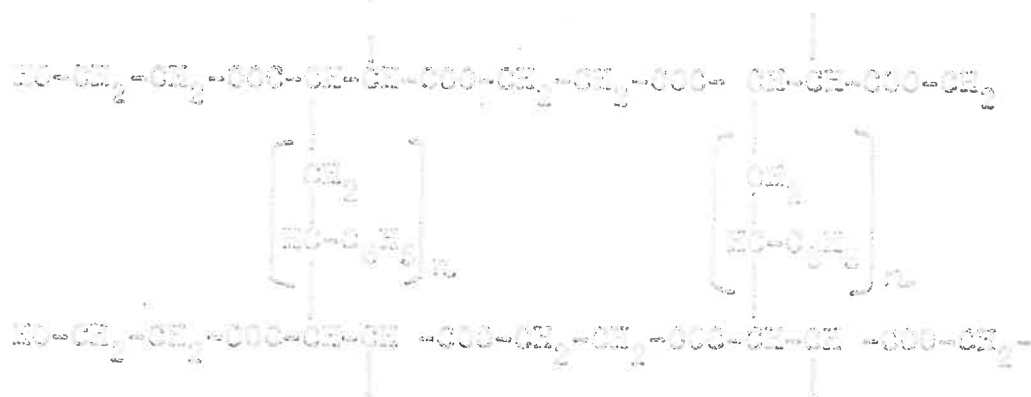
Il n'est donc pas nécessaire, pour les polyesters, d'éprouver sous pression ; on peut même éprouver par simple contact.

Prenez un exemple-type :

Avec l'éthylène-glycol et l'acide maléique, on peut constituer une chaîne linéaire de polyester comportant une double liaison chaque fois qu'il y a un motif acide maléique dans la chaîne et que l'on peut représenter :



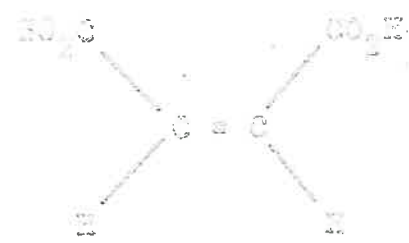
La réaction d'une telle chaîne avec un monomère type styrène conduit à des réactions d'addition sur la double liaison. Elle peut s'écrire :



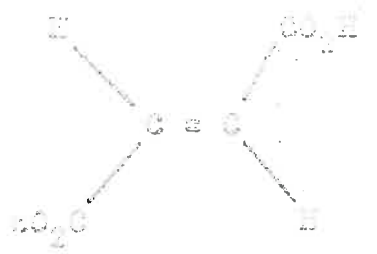
II-8.3. Certaines caractéristiques des polyesters commerciaux.

1) Acides insaturés.

La non-saturation est introduite d'ordinaire dans la chaîne en employant l'acide maléique, l'acide fumarique, ou l'anhydride maléique.



acide maléique  
(forme *cis*)



acide fumarique  
(forme *trans*)

### 2) Glycols.

De nombreux glycols peuvent être utilisés pour préparer les polyesters, mais ceux qui, pour des raisons commerciales et techniques, sont les plus utilisés, sont l'éthylène glycol, le diéthylène glycol, le propylène glycol, le dipropylène glycol et le butylène glycol.

Le choix du glycol influe sur les propriétés de la résine non polymérisée.

### 3) Acides modificateurs.

Signalons également qu'on modifie les propriétés de la résine par des acides modificateurs.

Ainsi, les anhydrides phthalique ou isophtalique sont utilisés pour donner à la résine une bonne solubilité dans le styrène.

D'autres propriétés de la résine polymérisée, comme la résistance à la chaleur, à la flamme, la stabilité, etc... peuvent être modifiées de la même manière.

b) Maleate de styrène.

Cette série de polymérisation, de nombreux exemples à toutes les fins peuvent servir.

Le plus couramment utilisé est le styrène.

$C_6H_5-CH=CH_2$ . C'est un liquide incolore, bouillant à 147°C, de viscosité 0,98 sp à 25°C. Il se polymérise facilement sous l'action de la lumière, de la chaleur ou de catalyseurs pour donner une résine thermoplastique.

En général, les copolymères contiennent de 10 à 35 % de styrène, la viscosité diminuant avec le pourcentage de styrène.

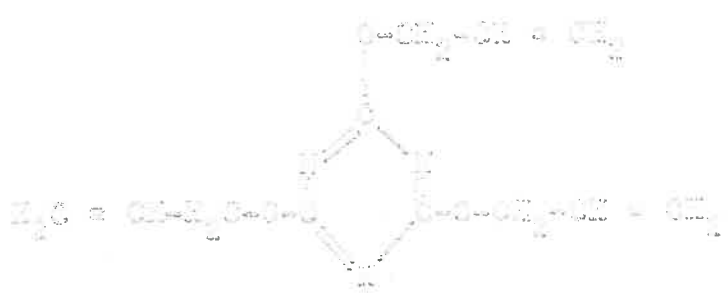
b) Maleate de diallyle.

Les copolymères ainsi obtenus tendent à être plus flexibles.

c) Méthacrylate de méthyle.

C'est un meilleur solvant que le styrène pour de nombreux polyester, et, à poids égal, il donne des résines de plus faible viscosité avec ces résines.

4) Structure de l'actine

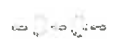


El permet d'obtenir une bonne résistance à la chaleur.

5) Rôle des catalyseurs

Le rôle des catalyseurs est de produire des radicaux libres qui provoquent l'amorçage de la réaction de polymérisation nécessaire au durcissement de la résine.

On fait apparaître dans la résine des radicaux libres par décomposition d'un peroxyde ou hydro-peroxyde organique, qui se caractérisent par la présence dans leur formule de deux atomes d'oxygène directement liés :



Par décomposition d'une molécule de peroxyde dans un polymère durcissant, on a apparition d'une paire de radicaux libres,  $\text{R}-\text{O}^{\cdot}$  et  $\text{R}'-\text{O}^{\cdot}$ , actifs polymériser pour former un écoulement libre.

Le radical  $\text{R}-\text{O}^{\cdot}$ , cherchant à se stabiliser est attiré par l'un ou l'autre électrons  $\text{R}'$  de la double liaison la plus proche et se fait ainsi cette double liaison.

l'electrolyse, surtout, résultant de la réaction, va de nous être offert par une double liaison voisine qui est censée de la même façon.

Et ainsi de suite etc.

Mais, dans la pratique, la polymérisation se fait en solution dans un solvant d'équilibre très réactif qui est le plus souvent du styrène. Le radical  $R-O^{\cdot}$  issu par la double liaison la plus réactive, polymère le styrène et se consomme la deuxième liaison et donne avec l'équilibre de l'équilibre une simple liaison double.

S'il y a aussi du styrène, l'electrolyse se réalisera sans plus tarder vers la double liaison d'une molécule de styrène que vers celle d'une molécule de polymère, à cause de la réactivité du styrène.

Le styrène, qui seulement apporte une autre série supplémentaire qui favorise et accélère la réaction, mais encore provoque un nouveau mécanisme de réaction.

D'après ce qui précède, nous avons vu que les catalyseurs participent à la réaction. Il ne répond donc pas à la définition classique du catalyseur en chimie.

D'autre part, la réaction de polymérisation est proprement chimique au temps de catalyseur.

Ainsi, la réaction de polymérisation a leur avantage, puisque leur rôle est d'initier la polymérisation des diènes de polyesters insaturés et du monomère réactif.

Tableau II-B

Catalyseurs tétrahydriques concubines cristallins pour la polymérisation à froid				
Catalyseur	Formule Chimique	Préparation ou méthode de production et source de matières premières de polyéthylène	Température (°C)	Remarques
Peroxyde de Benzoyle	$\text{C}_6\text{H}_5\text{C(O)OOC(C}_6\text{H}_5\text{)}$	<p>de Réduction ou par oxydation de benzoin, le phthalate d'éthyle, l'acétate d'éthyle, le phthalate de diméthyle, etc.</p> <p>de l'acide persulfurique et du benzoin.</p> <p>de l'acide persulfurique et du phthalate de diméthyle.</p> <p>de l'acide persulfurique et du phthalate de diméthyle.</p> <p>de l'acide persulfurique et du phthalate de diméthyle.</p>	90	Le plus généralement utilisé.
Peroxyde de Diéthyle	$\text{C}_2\text{H}_5\text{C(O)OOC(C}_2\text{H}_5\text{)}$	<p>Solution dans une phase aqueuse.</p>	80	<p>de 100 grammes de catalyseur avec une dose de 100 grammes de monomère.</p> <p>la réaction est terminée après 10 minutes.</p>
Peroxyde de Cyclohexanoxyde	$\text{C}_6\text{H}_{11}\text{C(O)OOC(C}_6\text{H}_{11}\text{)}$	<p>de l'acide persulfurique et du cyclohexane.</p>	80	<p>de 100 grammes de catalyseur avec une dose de 100 grammes de monomère.</p> <p>la réaction est terminée après 10 minutes.</p>

Tableau II-B



## III.3. Inhibiteurs de polymérisation.

### 3.1. Peroxydes.

Comme nous l'avons vu, la plupart des peroxydes employés dans les réactions de polymérisation sont des peroxydes linéaires n'agissant pas avec la même efficacité, et en général chaque chaîne a ses caractéristiques typiques.

Nous nous concentrerons évidemment au cas de la polymérisation à chaîne, et nous limiterons à température ambiante. Le tableau III-3 ne donne que les plus importants au point de vue pratique.

Il convient de mentionner autres peroxydes, mais les principaux :

- le peroxyde de cumole,
- le peroxyde de p-tercéthylbenzoyle,
- le peroxyde de lauroyle,
- le peroxyde de butyle n-tercéthyle,
- l'hydroperoxyde de cumole,
- l'hydroperoxyde de butyle tertiaire,
- l'hydroperoxyde de méthyl-éthyl-cétole,
- le perbenzoate de butyle tertiaire,
- le persulfate de butyle tertiaire,
- ...

Certains, comme pour leur emploi de catalyseurs à chaîne, peuvent être utilisés dans la polymérisation à chaîne avec un mécanisme approprié. Par exemple l'hydroperoxyde de cumole, comme nous le verrons plus loin, avec la polymérisation Stober à 18. (cf. paragraphe III-3.1.).

...

12) Les catalyseurs sont des composés chimiques qui augmentent la vitesse de décomposition des catalyseurs.

En pratique, on les classe en deux groupes :

a) Les catalyseurs organiques : diméthylamine, tétraméthylamine, tétrahydro-pyridine.

b) Les catalyseurs inorganiques : par exemple, magnésium et cobalt et sels de cobalt.

Les catalyseurs ont une action préférentielle pour un groupe de catalyseurs.

13) Avec les peroxydes, les peroxydes de décomposition sont généralement les amines tertiaires. Ces amines se présentent sous la forme de liquides entièrement réactifs qui sont livrés en général dilués.

Le principal avantage de l'acétylation à froid par les amines tertiaires est d'être peu influencé par l'humidité ou l'eau qui agit en général comme inhibiteur de la polymérisation.

Les deux peroxydes le plus fréquemment utilisés en association avec ces amines sont :

- le peroxyde de benzoyle,
- le peroxyde de lauroyle.

14) Avec les hydroperoxydes, on utilise plutôt les composés de cobalt.

III-1. Précautions à prendre lors de manipulation de  
des peroxydes et catalyseurs.

Les peroxydes ou hydroperoxydes sont des agents d'oxydation très puissants,

- Ils ne doivent être employés que sous une forme qui puisse être analysée sans danger.

- Ils ne doivent jamais être mélangés directement à l'hydrocarbure, sous peine de provoquer une explosion et une combustion violente.

- Ils doivent être conservés à froid, dans l'obscurité, dans les récipients dans lesquels ils sont livrés. Il faut faire attention en particulier au cours des transports les gas à lacer une boîte de peroxyde ou telcél dans une voiture soulevée, par exemple.

La température critique indiquée dans le tableau III-1, peut être doublée, au sur et à mesure que le peroxyde vieillit, à cause des impuretés introduites par la lente décomposition à températures ordinaires.

- Les peroxydes ne doivent jamais être mis en contact direct avec des substances organiques facilement défilées ou de métaux métalliques.

- Les peroxydes sont dangereux pour les yeux.

- Les fonds de boîtes ou les chiffons contenant des peroxydes doivent être brûlés, à l'air libre, sous surveillance, et ne doivent jamais être jetés à cause du danger de combustion spontanée.

On peut également les mettre dans un récipient plein de bicarbonate pour les faire décomposer sans danger.

1104. Les fibres de verre dans les câbles de torsion.

1104.1. Fibres de verre renforcement.

Malgré leurs excellentes propriétés mécaniques, les polyesters présentent des insuffisances, notamment leur résistance à la rupture se situe relativement aux chocs. Ce n'est qu'au cours de ces dernières années que l'on pouvait pallier cette faiblesse par l'incorporation de fibres renforts.

C'est ainsi qu'on a utilisé, bien avant la guerre, un coton, de l'indienne ou même du papier avec les plastiques de l'époque.

Mais actuellement, la quasi-totalité des structures sont constituées avec des fibres de verre. Or, le domaine d'application à grande échelle des plastiques renforcés ne s'est pas étendu : bâtiment, constructions navales, transport, automobile, etc...

On peut se demander pourquoi d'autres fibres renforts ne donnent pas de résultats comparables, à meilleur prix. Tout y dépendra, voyons d'abord quelles sont les conditions essentielles d'un bon renforcement :

- Il faut un matériau possédant une résistance à la rupture assez élevée.

- La  $\sigma_{\text{rupture}}$  à la rupture doit être faible, et le module d'Young doit être élevé, car la charge est répartie proportionnellement aux sections et aux modules respectifs de la trébine et du renfort.

- On veut un matériau qui soit sous forme filonneuse assez fine pour permettre une bonne répartition des contraintes à l'intérieur de la trébine.

Tableau I-10

Résistance à la rupture, allongement maximum et module d'Young de quelques fibres.

Type de fibre	Matériau	Résistance à la traction (kg/cm <sup>2</sup> )	Allongement à la rupture (%)	Module d'Young (kg/cm <sup>2</sup> )
minérale	Fibre de verre continue de type "E"	350	5	7000
	Fil de verre	250-300	2,0-3,0	8000
	Fibre vitreuse d'alkaline	150	0,5-1,5	10000
naturelle	Coton	2,5-3,5	3,0-5,0	100-150
	Lin	3,5-4,5	3,5-5,2	2000
	Soie	3,5-5,5	1,5-4,5	5000
	Alcool	0,5-0,8	2,0-3,5	—
polyamide	Nylon 6-6 haute ténacité	5,0-6,5	10-20	500
	Nylon 6	3,5-5,5	10-15,5	300
acrylique	acron	2,5-3,5	20-30	500

Propriétés de quelques caractères renforcés avec des fibres synthétiques. (a)

Propriété	Verre	Alcon	Orlon	Nylon
Résistance à la traction (kg/cm <sup>2</sup> )	16,4	3,56	4,97	5,76
Module d'Young (kg/cm <sup>2</sup> )	900	700	677	308
Résistance au choc, sur barre 100 mm de diamètre	0,63	0,52	0,43	0,30
Module de compression (kg/cm <sup>2</sup> )	14,36	11,5	11,55	10,42

(a) Caractères contenant 25% du volume de fibres.

Or, parmi tous les matériaux à longues fibres, les plus adaptés en définitive, pourvu qu'on se souvienne des conditions d'emploi, c'est le verre qui possède le meilleur ensemble de propriétés.

L'acier, par exemple, qui a une résistance à la rupture analogue et un module plus élevé, ne peut pas valoir car on ne peut pas l'obtenir en fibres suffisamment fines, et il est trop lourd.

Le tableau II-16 indique la résistance à la rupture et l'allongement maximum d'un certain nombre de fibres actuellement utilisées par ailleurs. Il donne également quelques valeurs des propriétés mécaniques de stratifiés renforcés autrement que par le verre.

On voit que c'est le renforcement aux fibres de verre qui donne les meilleurs résultats. En fait, on peut envisager pour la stabilisation des fibres naturelles telles que lin, jute, ... mais en pratique rien actuellement ne peut être avantageusement comparé aux fibres de verre.

### III-2. Renforcement aux fibres de verre.

Le tableau II-17 donne quelques propriétés des fibres de verre de type "E" et de type "A". En fait, le verre type "A" pourrait largement suffire pour les applications qui nous intéressent.

En effet, ses propriétés mécaniques sont presque aussi bonnes. L'un de ses défauts majeurs est son manque de résistance à l'eau, mais ceci n'est sensible qu'au bout d'un temps assez long. Le verre type "E" est moins cher, mais actuellement il n'est pas fabriqué en France.

## Tableau II-11

Propriétés des fibres de verre de type "E" (faiblement alcalin)  
et de type "A" (inerte)

Propriétés	verre type "E"	verre type "A"
densité	2,55 (norm. massif 2,5)	2,46 (norm. massif 2,5)
épaisseur (mm)	6,50	6,50
Résistance à la rupture des fibres unitaires	350 kgf/mm <sup>2</sup>	315 kgf/mm <sup>2</sup>
Module d'élasticité (au tension)	7.500 kgf/mm <sup>2</sup>	6.600 kgf/mm <sup>2</sup>
coefficient de Poisson $\nu$	0,22	0,23
hygroscopie, fluage	nuls	nuls
module de résilience	300 g. cm. dm <sup>3</sup>	—
coefficient de dilatation	$4,63 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$7,70 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
conductivité thermique	2,92 cal.cm./h.cm <sup>2</sup> °C	3,06
chaleur spécifique	0,19	0,20

On a utilisé pour ces essais des fibres de verre de type "E" et "A" de diamètre 100  $\mu$ .

Composition des verres type "E" et "A" en %.

	Type E	Type A
SiO <sub>2</sub>	52,4	52,2
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3	10,0
CaO	10,0	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,6	1,8
MgO	5,2	3,5
CaO	15,5	3,5

Les fibres de verre se présentent sous différentes formes :

- Le filéage est constitué par des fibres continues obtenues en faisant le verre fondre à travers une filière. Le diamètre des fibres unitaires varie entre 4 et 10  $\mu$ .
- Le coupage est la fibre coupée obtenue par pulvérisation du verre fondu. Les fibres sont réunies en mâches qui peuvent être tendues ou non tendues. Le diamètre des fibres unitaires est de 7 à 10  $\mu$ .

Les filets de silicium sont obtenus en réunissant et en tendant un grand nombre de ces fibres.

Comme dans les textiles, on numérote les filets pour distinguer les différents types assemblés.

Le numérotage métrique correspond au nombre de filières contenues dans un kilo de fil : ainsi 1 kg de fil n° 30 contient 30.000 m. de fil.

On utilise aussi comme unité le "den", qui est le nombre de décaligrammes par mètre de fil.

Les renforts de verre se présentent sous diverses formes : fils, tisseurs, nœts, fibres coupées, revings, ...

- Le reving est obtenu en réunissant, sans tendre, un certain nombre de filets de silicium de 400 décaiter, dont le diamètre des fibres unitaires est de 10  $\mu$ . On trouve des revings à 1, 3, 6, 7, 8, 15, 30 ou 50 filets de silicium.
- Le fils tisseur est obtenu en coupant des filets de silicium à 50, 25 ou 12,5 m.



Les filaments peuvent être obtenus par découpage de fils de silice, de verres, ou de nichelle de verre. Il en existe de toutes sortes et ils donnent d'excellentes propriétés mécaniques, mais ils sont les traités à cause de leur usinage, et ils sont très chers.

Ils ont été expérimentés uniquement les n°s et les fils coupés projetés.

4) Les filaments sont constitués par des fils de silice coupés généralement à 50 cm et liés en appas, soit mécaniquement, soit par une petite quantité de liant.

En pratique, on trouve trois variétés de n°s différents par leur poids au même n° : 500, 400 et 300 g/m<sup>2</sup>.

5) Les filaments sont obtenus à partir des verres.

C'est le procédé qui nous semble le plus intéressant pour les tapis de surface, puisqu'on dispose de machines projetant simultanément de la résine accélérée, de la résine catalysée et des fibres sous forme de fils coupés que l'on obtient par découpage d'un rouleau continu.

Il est bien évident que les tapis de verre constituent un renfort devant des propriétés mécaniques plus intéressantes. Mais leur prix est beaucoup trop élevé.

Les n°s donnent des résultats légèrement meilleurs que les fibres coupées projetées. Mais la mise en oeuvre est plus compliquée du fait qu'il faut d'abord déposer le mat, puis l'imprégner de résine en passant un rouleau.

.../...

La méthode que nous avons employée (même couple obtenue par découpage de roving) a l'avantage d'être plus simple du point de vue application, tout en donnant des résultats comparables à ceux obtenus avec des nids.

#### II-7.3. Rovings utilisés.

Nous avons utilisé des pelotes de roving obtenues par "Le Vauve Corvide", dont la référence exacte est la suivante :

- Pâte spéciale 22-10, F7, présentation N 10, Diablon 100-1-80.

#### II-7.4. Propriétés obtenues des stratifiés polypropylène-nylon avec différents matériaux.

Le tableau II-12 montre d'abord la différence entre le polypropylène seul et le stratifié. Il montre également que les propriétés obtenues avec un renforcement en fibres sont meilleures d'environ 30 % que celles des stratifiés obtenus à partir de fils coupés. Il compare diverses propriétés mécaniques des stratifiés, de l'aluminium et de l'acier courant de construction.

Ces valeurs ne sont évidemment que des moyennes, obtenues avec des matériaux standards commerciaux. Mais elles sont données à titre indicatif, afin de comparer de façon plus précise les diverses propriétés de ces matériaux.

1511-26 II-42

Propriété résistante et pléomorphe composée de divers polyamides à chaîne principale non linéaire, dissémination et action élastique.

	Spécificité de l'essai (dans la table)	Modulus de rupture par lb de poids de la corde (dans la table)	Spécificité de l'essai (dans la table)	Atténuation	Aspect de la corde élastique
Résistance à la traction (1 g/1000)	20,6	49,2	4,2	7 - 20,5	42-48
Résistance à la traction (100 g/1000)	45,0	44,0	3,2	7,5-10	50-60
Résistance à la compression (1 g/1000)	24	43,5	4,2	7 - 10,5	30,2-42
Résistance à la flexion (1 g/1000)	30,6	72,4	5,4	3 - 10,5	42 - 45,5
Test de traction (1 g/1000)	4960	4420	3,10	3000	21000
Résistance en cisaillement (1 g/1000)	5,8	8,4	1	8,9-10	31,5-35
Pléomorphisme d'essai 80% après 24 heures d'essai à 100°C.	0,2-0,5	0,9-1,0	0,4	trulle	trulle
Durabilité	4,7	4,5-4,6	4,2	2,7	3,5
Traces en traction	57	35-45	trulle	trulle	trulle

3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100.

22-3. Propriétés particulières recherchées pour l'application  
des polyester renforcés aux fils de verre à la fibre  
verre.

Si les polyester et autres plastiques renforcés aux fibres de verre ont une gamme d'applications très étendue dans l'industrie, c'est grâce à leurs propriétés mécaniques spécifiques, obtenues dans des conditions particulières : les objets sont fabriqués en usine, dans à l'air des températures, et le temps de prise n'est pas un facteur essentiel.

Pour la réalisation au contraire, les difficultés sont nombreuses :

- la prise doit être rapide (une heure),
- elle doit pouvoir se faire en plein air, c'est-à-dire éventuellement en présence d'eau et à basse température,
- la viscosité du polyester doit rester à l'intérieur de certaines limites pour que les machines de projection puissent fonctionner normalement.

Or, jusqu'à présent, les fabricants de polyester ne s'étaient absolument pas préoccupés de ces problèmes.

Dans l'industrie, les polyester ne sont jamais mis en oeuvre directement de 20°-0°-3° encore, le plus souvent précipité-on à une cuisson à l'échelle pour mener plus loin le durcissement.

Revenant quel est le polymère de polyéthylène téréphtalate que l'on compare, résistances à la traction, bonnes propriétés électriques, résistance chimique, résistances à la température, résistance prolongée aux intempéries, etc... Autant de propriétés qui ne nous intéressent pas pour la stabilisation.

Le problème le plus important est celui de la prise à basse température, c'est-à-dire en-dessous de  $910^{\circ}\text{C}$ . Le temps de prise et la viscosité augmentent alors considérablement.

Nous verrons dans le paragraphe suivant comment ces problèmes ont été résolus.

### 17-3. Recherche de résines alternatives utilisables dans les conditions particulières d'application à la stabilisation.

Comme nous l'avons vu plus haut, la mise en œuvre doit être simplifiée. Il faut donc un polyester :

- polymérisant avec un système catalytique unique, en milieu sec ou en milieu humide.
- durcissant en un temps inférieur à une heure, quelle que soit la température entre  $+ 30^{\circ}\text{C}$  et  $-10^{\circ}\text{C}$ .
- ayant une viscosité inférieure à 7 poises jusqu'aux basses températures.
- dont les propriétés mécaniques ainsi obtenues dans des conditions d'emploi très différentes soient assez peu dispersées.

En fait, en certains cas, les propriétés mécaniques satisfaisantes. Le problème réside dans le choix d'un système catalytique approprié permettant une prise et un durcissement qui dépendent des conditions locales et-locales.

Après avoir consulté un certain nombre de laboratoires de Sociétés Chimiques, et essayé divers produits, nous avons finalement retenu deux polymères et les systèmes catalytiques correspondants dont les essais semblent satisfaisants.

L'un est fourni par la Société Rhodant avec le nom d'Hydroxy B. 22. L'autre a déjà été essayé au laboratoire d'une autre façon, pour la stabilisation des sables dans la mer; il est fourni par la Société Rhodant avec le nom de Hydroxy B. 22.

### Hydroxy B. 22

#### Système catalytique :

- catalyseur : hydroperoxyde de cumène,
- co-catalyseur: KV 10.

Température : 200 cps à 20° C (viscosimètre Koppel Meyer).

#### Essais de prise :

Ce système catalytique a été choisi essentiellement pour répondre aux deux conditions : prise rapide dans l'eau et à basse température.

En ce point de vue, l'essai réalisé dans l'air à 400 °C a été particulièrement intéressant, puisqu'il a permis un écoulement en phase de 1 heure.

Dans une série continue de cette nature d'essai, les conditions en contact ont été effectuées à l'air, à une température de 400 °C, sur du mercure,  $Hg$ ,  $P_2O_5$ , etc. Les essais ont été dirigés de façon systématique et méthodique.

On a obtenu les résultats suivants :

| Concentration Hg                  | 0,1 | 0,2  | 0,3   | 0,4  |
|-----------------------------------|-----|------|-------|------|
| Concentration $P_2O_5$            | 0,1 | 0,2  | 0,3   | 0,4  |
| Temps de contact (min)            | 10  | 15   | 20    | 25   |
| Temps de contact (h)              | 15  | 1 h. | 1h.30 | 1 h. |
| Vie en jet de mélange catalytique | 15  | 20   | 30    | 45   |

Remarques :

a) Concentration de catalyseur et d'écoulement.

Les pourcentages de catalyseur correspondent à ceux qu'on emploie couramment dans l'industrie. Par contre, ceux d'écoulement sont beaucoup plus élevés, les taux maximaux étant de 0,2% à 0,5 %.

a) Temps de gelification et temps de durcissement.

On distingue le temps de gelification et le temps de durcissement. En fait, pour la solidification par dépôt de surface, seul le temps de durcissement nous intéresse.

La gelification, c'est ce que nous appelons l'indigé, qui consiste à précipiter un gel qui est noir et qui a toutes les propriétés mécaniques du caoutchouc. On parle alors de la température de gelification à 65°C.

Mais le temps de gelification précède le durcissement pour les vulcanisateurs qui impliquent un mélange catalytique et caoutchouc, puisque il n'est pas possible de mettre en contact ce mélange sans que la gelification s'est opérée.

Les substances comme le plus souvent le temps de gelification à une température donnée, le durcissement à cette température se poursuit indéfiniment.

Mais on peut constater, pour ce polyester et ce système catalytique, que le temps nécessaire pour obtenir un durcissement équivalent à 80 % de durcissement final est 4 à 5 fois le temps de gelification à la température considérée. Nous reviendrons plus loin sur cette question.

b) Durée de vie en air de différents vulcanisateurs catalytiques.

Le tableau précédent montre qu'avec les deux vulcanisateurs nécessaires pour obtenir une prise rapide, il n'est pas question d'opérer directement avec une résine



accélérateur est accéléré : à 20°C par exemple, au bout de 15 minutes, le mélange ne serait plus utilisable. A 20°C par contre, la gélification pourrait s'opérer au bout de quelques minutes.

D'où l'utilisation impérative de machines à deux réservoirs : 1<sup>er</sup> en contenant de la résine accélérée, 2<sup>e</sup> celle de la résine catalysée. Le contact se fait directement sur le bord de la projection, comme nous le verrons un instant plus loin, dans le paragraphe III-7.

#### 4) Durée de vie de la résine avec accélérateur seul ou catalyseur seul.

En principe, une résine accélérée seulement, peut se conserver aussi longtemps que la résine pure.

Une résine avec catalyseur seul peut se conserver de quelques heures à quelques jours suivant la température.

En fait, pour l'Évypox B.33, le fabricant donne une vie en pot de 2 jours, à 20° C, aussi bien pour la résine accélérée à 2 t que pour la résine catalysée à 2 t.

Mais il ne faut pas oublier que lorsqu'on vend une résine à 2 t de catalyseur et 2 t d'accélérateur, on vend des pots différents, et dans chacun d'eux le pourcentage est doublé : on a alors une résine catalysée à 4 t d'un côté et une résine accélérée à 4 t de l'autre, et de ce fait des durées de conservation sont encore diminuées.

### Ann. 3. Modèles 301 et 302.

Nous avons déjà mentionné ce polyester à propos des essais de stabilisation de sable par voie chimique (cf. paragraphe 1-4.4.).

#### Propriétés de la résine avant polymérisation.

- . Densité à 25° C ..... 1,22
- . Viscosité à 25° C ..... 1,5 à 2,5 poises
- . Teneur en styrène ..... 35,5 %
- . Durée de conservation à 25° C ... supérieure à 3 mois.

#### Systèmes catalytiques à froid.

Il en existe deux principaux :

|    | Catalyseur-  | Accélérateur      |
|----|--------------|-------------------|
| 1/ | Etanox       | Octoate de cobalt |
| 2/ | Percylgel CR | Diméthylaniline   |

Le Etanox est un peroxyde de méthylethylecétone à 50 % dans le phthalate de méthyle, et le Percylgel CR est un peroxyde de benzoyle à 50 % dans le triméthylphosphate.

Le système 1/ est le plus couramment utilisé dans l'industrie; mais il doit être employé à sec.

Le système 2/ par contre permet la polymérisation en présence d'eau.

charge de 500 grammes en solution

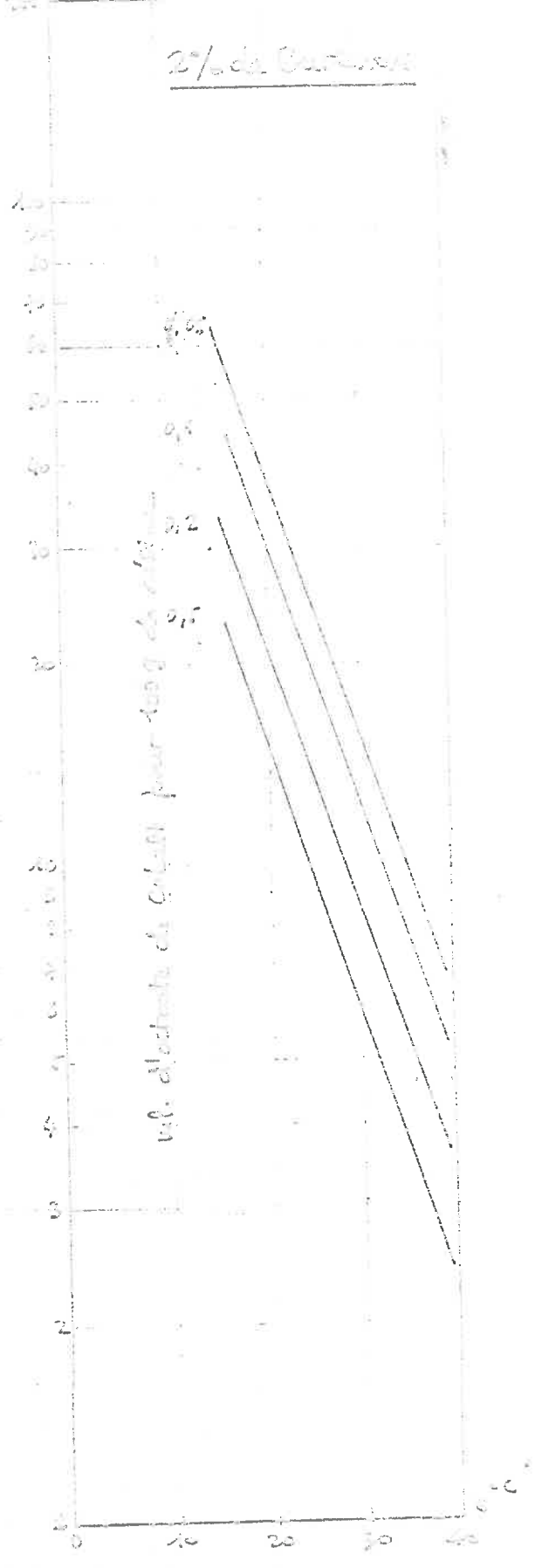
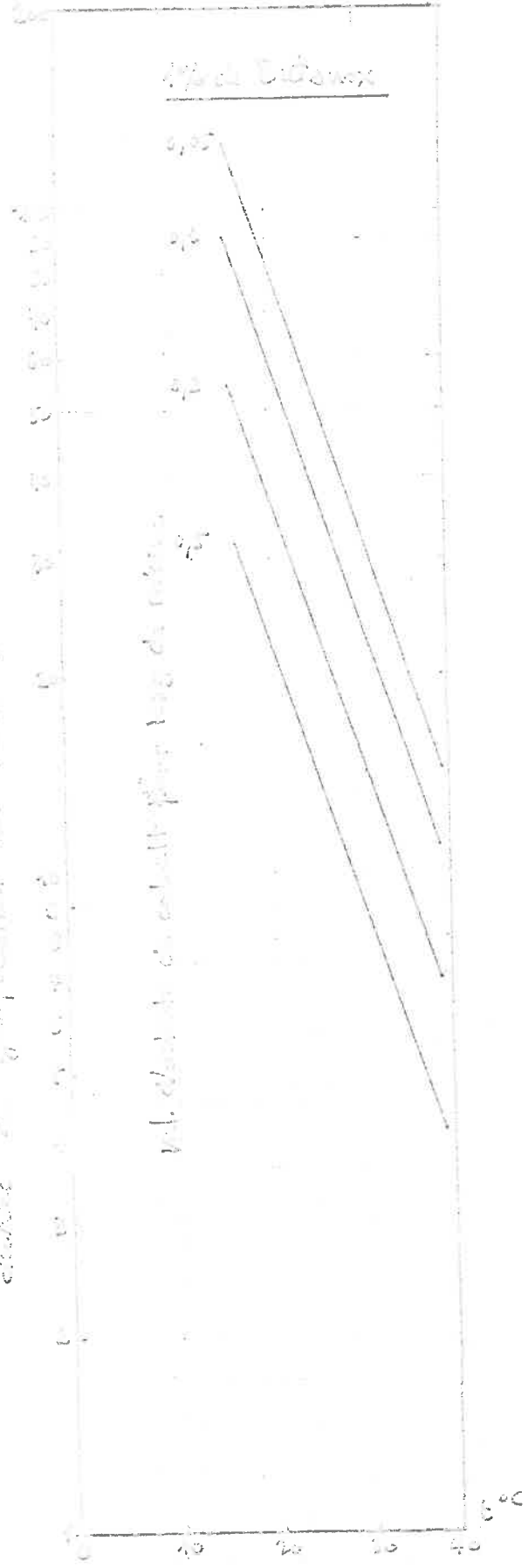
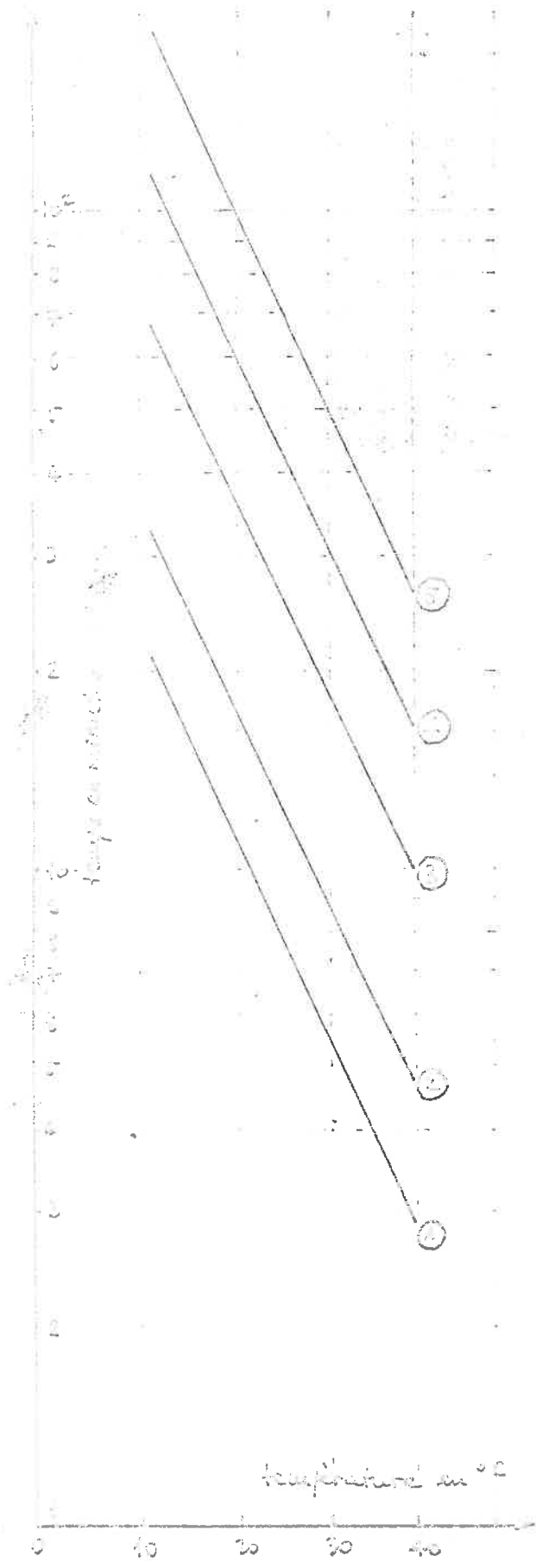


Fig II-13

DUREE DE SOLUCION EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

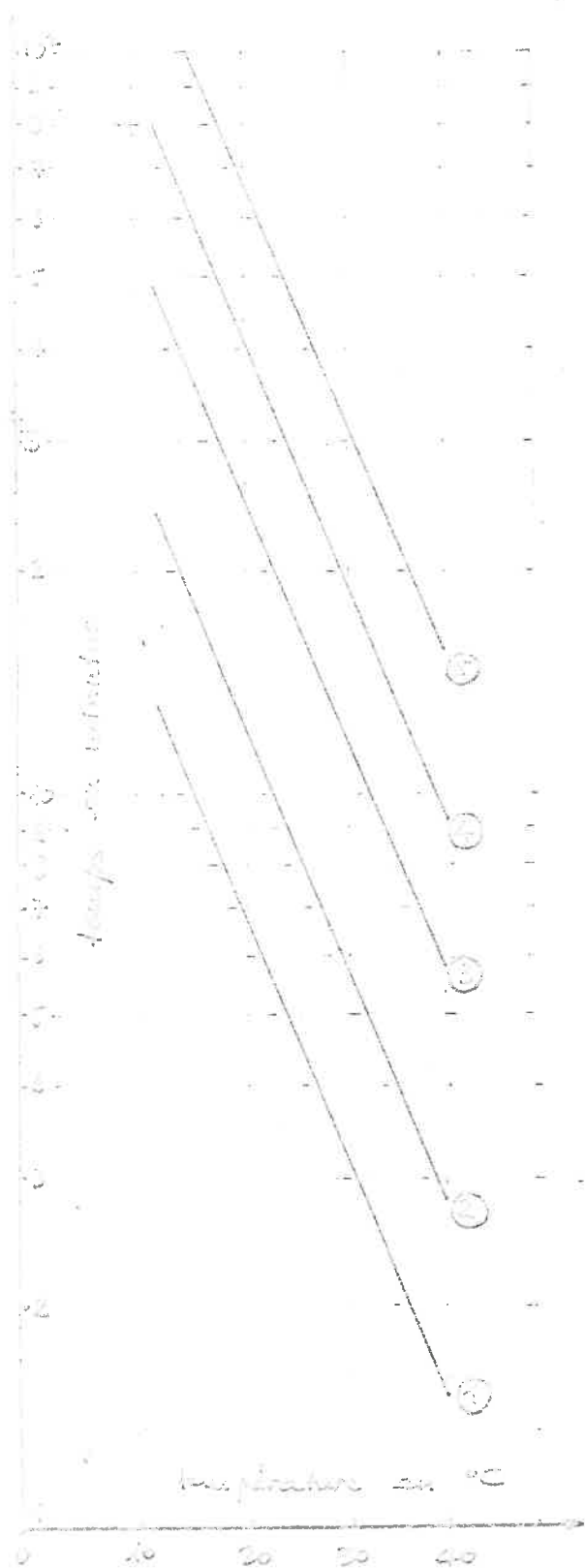
RHODESTER 3016 BL



- 1% dimethylamine
- 0,5% "
- 0,2% "
- 0,1% "
- 0,05% "

BURST OF CONDENSATION  
RHODASTOR 3016 24  
1% Parlygel CR

Fig. II-14



- 2% d'antipyrène
- 0,5% "
- 0,25% "
- 0,1% "
- 0,05% "

DURÉE DE GELIFICATION  
 RHODÉSTER DANS BL  
 2% Parlyge CR

### Annexe 1. Résultats

Les tableaux des figures II-10, III-10, IV-10 donnent les durées de gélification théoriques en fonction de la température, suivant les taux de catalyseur et d'acétal-aldéhyde. Ces temps ont été établis à sec, en laboratoire.

### Annexe 2. Durées de gélification

On a vu plus haut qu'en fait le temps de gélification ne varie beaucoup pas pour la stabilisation, mais que les durées de gélification sont essentiellement plutôt que le temps de durcissement ; il serait donc utile d'établir une relation entre ces deux temps.

Les tableaux suivants donnent la durée de gélification et la durée de durcissement (pour obtenir une durée totale de 10) en fonction des pourcentages de catalyseur et d'acétal-aldéhyde des trois systèmes, à 25° C.

TABLEAU 1.

| Matériau | Contenu de solvant (%) | Temps de gélification (minutes) | Temps de durcissement (minutes) |
|----------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1        | 0,2                    | 10                              | 0                               |
| 1,7      | 0,5                    | 10                              | 0                               |
| 1,5      | 0,2                    | 10                              | 0                               |
| 1        | 0,1                    | 10                              | 0                               |
| 1        | 0,2                    | 10                              | 0                               |

TABLEAU

| Temps de<br>1 | Échelle<br>antérieure<br>2 | Durée de<br>qualification<br>(minutes) | Durée de<br>développement<br>(minutes) |
|---------------|----------------------------|--|--|
| 1             | 0,2                        | 10                                     | 10                                     |
| 1             | 0,2                        | 15                                     | 15                                     |
| 0,3           | 0,2                        | 20                                     | 20                                     |
| 1,5           | 0,2                        | 30                                     | 30                                     |
| 2             | 0,2                        | 40                                     | 40                                     |
| 1             | 0,2                        | 50                                     | 50                                     |
| 1,2           | 0,2                        | 60                                     | 60                                     |
| 1             | 0,25                       | 70                                     | 70                                     |
| 1             | 0,2                        | 80                                     | 100                                    |

D'après ces essais :

- Échelle antérieure 1 :

Le temps de développement = 2 à 3 fois le temps de qualification.

- Échelle antérieure 2 :

Le temps de développement = 2 à 3 fois le temps de qualification.

20/10

Dans les essais (répétés plus loin) effectués dans le terrain, nous avons employé le système 2/ et utilisé les tiges suivantes :

- Polygal 68 " : 2 à
- Minétybarilline : 0,2 à 0

La température ambiante étant comprise entre 10° C et 12° C.

Le temps de gélification visé (cf. fig. III-10) est voisin de 70". Le temps de durcissement devrait être deux heures entre un et deux jours. En fait, le durcissement a été obtenu en tout d'une heure.

Il ne faut pas oublier que les conditions d'application de ciment ne sont jamais parfaitement idéales : la température, l'eau sur le sol et l'humidité de l'air interviennent, ainsi que l'épaisseur de la tige utilisée, etc..

Ainsi donc, la relation entre le temps de durcissement et le temps de gélification dépend du système utilisé, de la température, et de divers autres facteurs dont il est difficile de prévoir l'influence.

Il serait donc vain de chercher à construire des règles permettant de déterminer avec précision les temps de durcissement et recommander à employer pour avoir un temps de durcissement donné : une précision excessive serait illusoire.



Tableau I-12: Benzène à 100°C.

Après les divers essais effectués aux laboratoires de MONTBOURN et à Genève, on peut donner les tableaux suivants, donnant les taux de peroxyde de benzyle et de diméthylamaline à employer pour obtenir un temps de prise donné en fonction de la température.

Tableau I-12 bis : 85 mm.

| Température | % Peroxyde de benzyle pur (L) | % Diméthylamaline |
|-------------|-------------------------------|-------------------|
| 0° C        | 0,5                           | 1                 |
| 10° C       | 0,2                           | 0,85              |
| 20° C       | 0,2                           | 0,85              |
| 35° C       | 0,5                           | 1,35              |

Tableau I-12 bis : 115 mm.

| Température | % Peroxyde de benzyle pur (L) | % Diméthylamaline |
|-------------|-------------------------------|-------------------|
| 0° C        | 1                             | 1                 |
| 10° C       | 1                             | 0,85              |
| 20° C       | 1                             | 0,85              |
| 30° C       | 1                             | 0,85              |

Le tableau II-13 résume ces résultats.

11/12

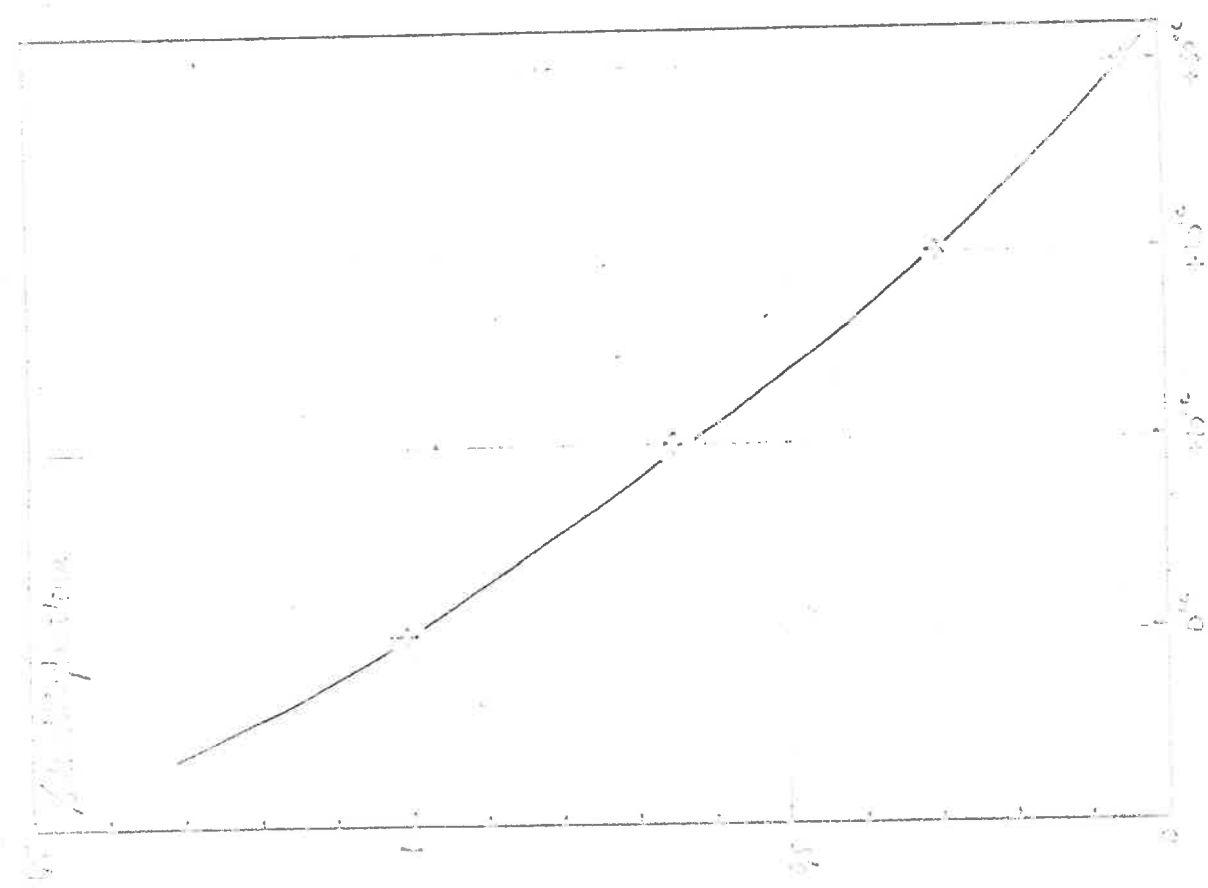
Principe :

L'Etat garde cependant un certain pouvoir d'intervention sur la participation, dont la conséquence est de rendre la situation instable.

Plus la prime sera élevée, plus la dette sera élevée.

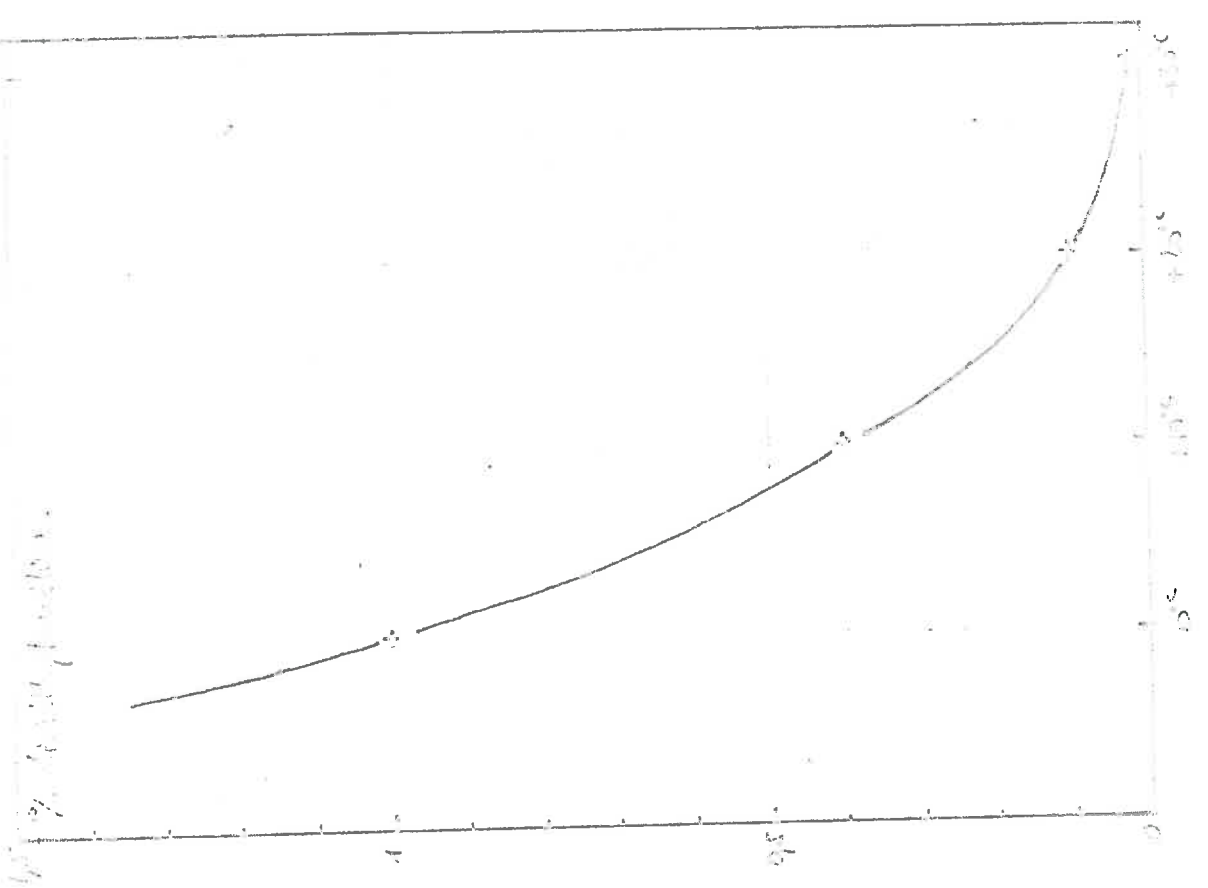
Si on le considère de l'intérieur des choses, on voit que les employés et pourcentage double, puisque le principe est une prime à côté de pourcentage payé.

67  
 20% completion



Complete time: 80 min  
 20% completion: 16 min

68  
 75% completion



Complete time: 80 min  
 75% completion: 48 min

Table No. 16

### Problèmes de viscosité.

Le type de machine employée exige que la viscosité de la résine soit la plus faible possible, et en tous cas inférieure à 7 poises. Ceci pour que la projection soit possible, et que le mélange, donc la polymérisation, se fasse correctement au col.

Or, la viscosité des résines augmente énormément lorsque la température s'abaisse. Un essai réalisé à Grenoble avec une température de  $-8^{\circ}$  C a montré que la projection était impossible.

On peut y remédier de deux façons :

#### a) Chauffage des récipients de résine.

Si on a résolu le problème de la prise à basse température, on pourra toujours utiliser des récipients chauffant la résine polyester à  $40^{\circ}$  C par exemple, et la machine fonctionnera dans des conditions normales.

#### b) Addition de styrène.

Nous avons vu au paragraphe II-3.2<sup>e</sup> qu'on utilise le plus souvent comme agent de réticulation, du styrène. C'est le cas du rhodester, dont la teneur en styrène est de 38 %.

Nous avons déterminé la quantité de styrène à ajouter pour obtenir une viscosité constante de 1,5 poise en fonction de la température.

|   |   |
|---|---|
| <p>Quantité de...<br/>à 200 g de...<br/>à 100 g de...</p> | <p>Quantité de...<br/>à 200 g de...<br/>à 100 g de...</p> |
| <p>à 200 g de...<br/>à 100 g de...</p>                    | <p>à 200 g de...<br/>à 100 g de...</p>                    |

à 200 g de...  
à 100 g de...  
à 200 g de...  
à 100 g de...

à 200 g de...  
à 100 g de...

à 200 g de...  
à 100 g de...  
à 200 g de...  
à 100 g de...

à 200 g de...  
à 100 g de...  
à 200 g de...  
à 100 g de...

à 200 g de...  
à 100 g de...  
à 200 g de...  
à 100 g de...  
à 200 g de...  
à 100 g de...

2.2.2. Le rôle de la machine à vapeur.

La machine à vapeur a permis de réaliser les premières applications de la vapeur dans les usines textiles de la région de Liège, mais avant d'être la force motrice qui entraîne le rouage industriel, elle a servi à produire la vapeur nécessaire, de la même manière et de la même façon que nous le verrons.

2.2.3. Le rôle de la machine à vapeur.

La machine que nous avons vue ici est une machine à vapeur à piston, alimentée par la vapeur d'eau à haute température.

Ces machines ont constitué les premières machines à vapeur qui ont été :

- des machines à piston, alimentées par la vapeur d'eau, à haute température.
- la machine à vapeur, qui sert à produire la vapeur d'eau et les machines.
- la machine à vapeur, comprenant deux cylindres qui produisent les deux mouvements de rotation, en la même par où ils sont, grâce à l'axe passé par une courroie, les deux cylindres.

2.2.4. Le rôle de la machine à vapeur.

La machine à vapeur, est une machine à piston, alimentée par la vapeur d'eau à haute température. Elle constitue les premières machines à vapeur qui ont été :

La pression peut être réglée par un lance-étendard ; les soupapes de sécurité sont réglées à 4 bars.

REMARQUE. Le nombre de fibres et la pression de la fibre forme un ensemble indépendant du système de propulsion de la machine.

Un autre appareil est utilisé pour la mesure de la pression qui diminue à mesure que la machine passe par deux phases. Un autre moteur actionne une soufflerie, et le débit d'air pulvérisé entraîne les fibres versées.

Une fois réglé ce type de pulvérisation, le débit de fibres peut être réglé de plusieurs façons :

- en variant le nombre de pulvérisations consécutives (2, 3 ou 6).
- en variant la vitesse de coupe (il y a trois positions d'entraînement pour le tambour à contact).
- en réglant ensuite l'aspiration d'air à la soufflerie par un volet mobile.

REMARQUE. Le nombre de pulvérisations comprend les deux pistolets à résine et la buse lance-fibre, sur tout d'un système de télécommande pour envoyer soit de la fibre seule, soit de la résine seule, soit l'ensemble.

Le débit des pistolets est fonction de :

- de la viscosité (fonc de la température),
- de la pression,
- de l'ouverture du pistolet.

L'épaisseur de viscosité se situe entre 1 et 7 g/cm<sup>3</sup>. Nous avons vu plus haut comment y parvenir.

L'ouverture du pistolet se règle à l'aide d'une aiguille qui étoupe plus ou moins la base du pistolet et dont on règle le déplacement sur un cadran gradué.

Un pointeau permet également de régler le débit d'air de pulvérisation.

En principe, on peut tracer les pistolets, pour une réaction donnée, à une température, une pression et une ouverture données.

Mais en pratique, on se contente de vérifier que les débits des deux pistolets sont égaux (cf. II-7.31 Réglage de la machine).

### III.2. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES.

Cette machine "Stratonic II" est faite normalement pour fonctionner en atelier. En effet, il faut :

- de l'air comprimé : 20 à 40 m<sup>3</sup>/h., sous 1 à 7 kg/cm<sup>2</sup>
- de courant électrique 220 ou 380 V. triphasé, pour une puissance de 1 kW.

En particulier, on pourrait concevoir une machine entièrement autonome, avec groupe électrogène et compression incorporée.

Mais notre but étant de voir où la mise en oeuvre d'un tel procédé in situ était réalisable, il fallait d'abord adapter une machine standard. Il faut donc :

- 1) un compresseur.
- 2) un groupe électrogène.



Il n'est pas très difficile de trouver un groupe électrogène adéquat : en effet, les groupes de petite puissance sont omniprésents, tandis que les groupes triphasés ont une puissance très supérieure à celle qu'on demande ; or un groupe de 15 kW ou plus est très peu disponible.

D'ailleurs un compresseur de chantier est aussi très répandu, et étonnamment l'appareillage associé est souvent plus volumineux et lourd que la machine elle-même.

Suivant les circonstances, nous avons utilisé des appareillages divers. Nous avons notamment un groupe électrogène de 15 kW, et un compresseur électrique assez léger. Il suffit de laisser le groupe électrogène en place, et de mettre sur une table voisine la machine et le compresseur, alimentés par un câble à partir du groupe électrogène fixe.

### 22-7.1. Mise en œuvre Technologie simplifiée.

#### 22-7.1.1. Réglage de la machine.

Les pots à vides fonctionnent normalement sous une pression de 2,5 bars.

#### 2/ Réglage des pistolets.

On prépare 2 à 3 kg de résine à essayer.

a) on demande à un des deux pistolets :

- en visant à bord la bûche d'aiguille,
- en déviant l'air de pulvérisation.

1) sur le coupe plectre, à l'aide :

- on verse à fond l'eau de pulvérisation,
- on débrosse de deux cotés complets la buse d'aiguille,
- on règle et on règle la pression de la cuve,
- on fait éjecter pendant une minute dans un récipient vide.

On obtient ainsi le débit :

- . pour une vitesse donnée,
- . pour une température, une pression et une ouverture de plectre donnée.

a) on opère de même avec le deuxième plectre.

On peut ensuite régler le débit de fibres de façon à donner dans le récipient une proportion en poids de fibres voisine de 50 %.

2) sur la suite, avec le même plectre et dans des conditions voisines d'ajustement, on peut se contenter de vérifier que les débits des deux plectres sont égaux. Pour cela :

- on verse à fond les pointeaux d'eau pour examiner la pulvérisation,
- on fait couler les deux plectres sur un carton horizontal.
- les diamètres des deux plaques doivent être égaux.

3) sur la suite.

2) sur la suite :

- de réglage,
- en nombre de plectres et, surtout,
- de la possibilité d'entretien et de la durée de service.

## II-7.12. Restrictions sur le contenu de l'analyse.

### 1/ Niveau de la pulvérisation.

Il ne faut à l'issue de la vie professionnelle de l'élève d'attention à l'œil : la pulvérisation ne doit pas être trop élevée afin d'éviter la suspension de la poudre dans l'atmosphère.

### 2/ Positionnement des jets.

Les deux jets doivent se superposer sur le sol avec un diamètre de 30 cm. environ.

On réalise le jet de sable au point de convergence à cette date lors d'opérations de sur et à mesure de la formation de l'analyse sur le sol.

### 3/ Hauteur de l'analyse.

On doit préférer à une hauteur de 30 à 35 cm, et maintenir le sol afin de protéger la élève.

## II-7.13. Restrictions à respecter dans la pulvérisation des analyses, lors des travaux et la vie professionnelle des élèves.

Nous avons déjà indiqué dans le paragraphe II-7.1. les précautions à prendre dans la manipulation des analyses et des analyses. Ces précautions sont essentielles.

appelons que :

- ces aiguilles ne doivent jamais être effilées directement aux acouilles.
- Elles doivent être conservées au chaud, à l'abri de la lumière, dans des récipients d'origine.
- on doit éviter les chocs violents.
- Il faut, par précaution, ne lever les mains systématiquement qu'après avoir travaillé avec une machine.

Pour que la polymérisation soit régulière, il faut que le catalyseur et l'acouille soient adaptés à la résine.

appelons que leur pourcentage dans chaque type de résine, calculé pour l'ensemble des deux axes.

Pour la résine pure, il n'y a que la proportion spéciale à prendre. Elle doit être conservée dans un récipient fermé pour éviter l'évaporation de styrène, et il faut savoir qu'elle est destinée à une polymérisation.

### III-7.31. Préparation à effectuer dans l'urgence de la machine.

On ne doit pas laisser de résine dans la machine après usage. On rince donc les circuits avec un solvant, qui peut être de l'acétone ou de tétrahydrofur, afin de polymériser dans un récipient.

- et on utilise l'acétone, il faut nettoyer à l'eau chaude, mais de haute source d'énergie.

- Le tétrahydrofur est un peu moins efficace, mais ne présente aucun danger d'incendie.

Le groupe projection doit être soigneusement nettoyé à l'eau, après avoir retiré l'aiguille du corps de la machine.

III-2. Stabilisation par voie chimique.  
Exemple sélectif et généralisé.

Jusqu'à présent, dans la stabilisation par voie chimique, les essais ne portaient que de manière générale sur des types de sols à stabiliser, et ces essais ont démontrés qu'on pouvait à une composition simple, après des tâtonnements et quelques de prise et un certain temps d'attente.

Le type d'expérimentation, dans le milieu de stabilisation est d'être très rigide, et dans ce genre de composition, ont évidemment aussi par le principe de ces des types de sols, et il a fallu rechercher une méthode d'expérimentation.

Le problème étant certainement nouveau, nous avons dû procéder à plusieurs séries d'essais très variés, soit en laboratoire, soit sur le terrain.

Sélectif

a) Cette série d'essais a été faite en laboratoire de manière des sols.

b) On a obtenu un aperçu des possibilités offertes par les stratifiés de polyesters pour la stabilisation.

c) Dispositif expérimental : (cf. photos 5 et 6).

Nous avons adopté un dispositif de polymérisation, qui ne donne évidemment que des valeurs à titre indicatif, et ne peut être comparé à un essai de plaque qu'avec précaution.

La carte des angles correspondants :

- Le triangle ABC, d'angle de sommet B  $34^\circ$
- d'angle de la droite-secante à  $65,3^\circ$  à sa gauche en C.
- d'angle de la droite-secante à  $65,3^\circ$  à sa gauche en A.

(Ces caractéristiques de ces angles ont été données dans le paragraphe 2<sup>o</sup>).

La droite qui passe par les points A et B est parallèle à la droite qui passe par les points C et D, et à  $2,6$  cm de ces droites.

4) Remarque.

- Les angles opposés par sommets sont égaux, d'où les angles  $20^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $120^\circ$ .
- On a obtenu la même vis-à-vis les angles inscrits dans le même arc de cercle à l'intersection de ce dernier. Évidemment dans ce cas, on a  $\theta = 20^\circ$ , et la relation obtenue classique jusqu'à la supériorité, mais si on considère que la mesure à la hauteur  $OP_1$  est la même chose :

$$200 < \theta_1 < 200 \text{ cm} / \text{unit}$$

5) Conclusion.

L'application de cette propriété des angles est très utile, car elle permet de trouver les angles inscrits dans un cercle, et de trouver les angles inscrits dans un cercle, et de trouver les angles inscrits dans un cercle.



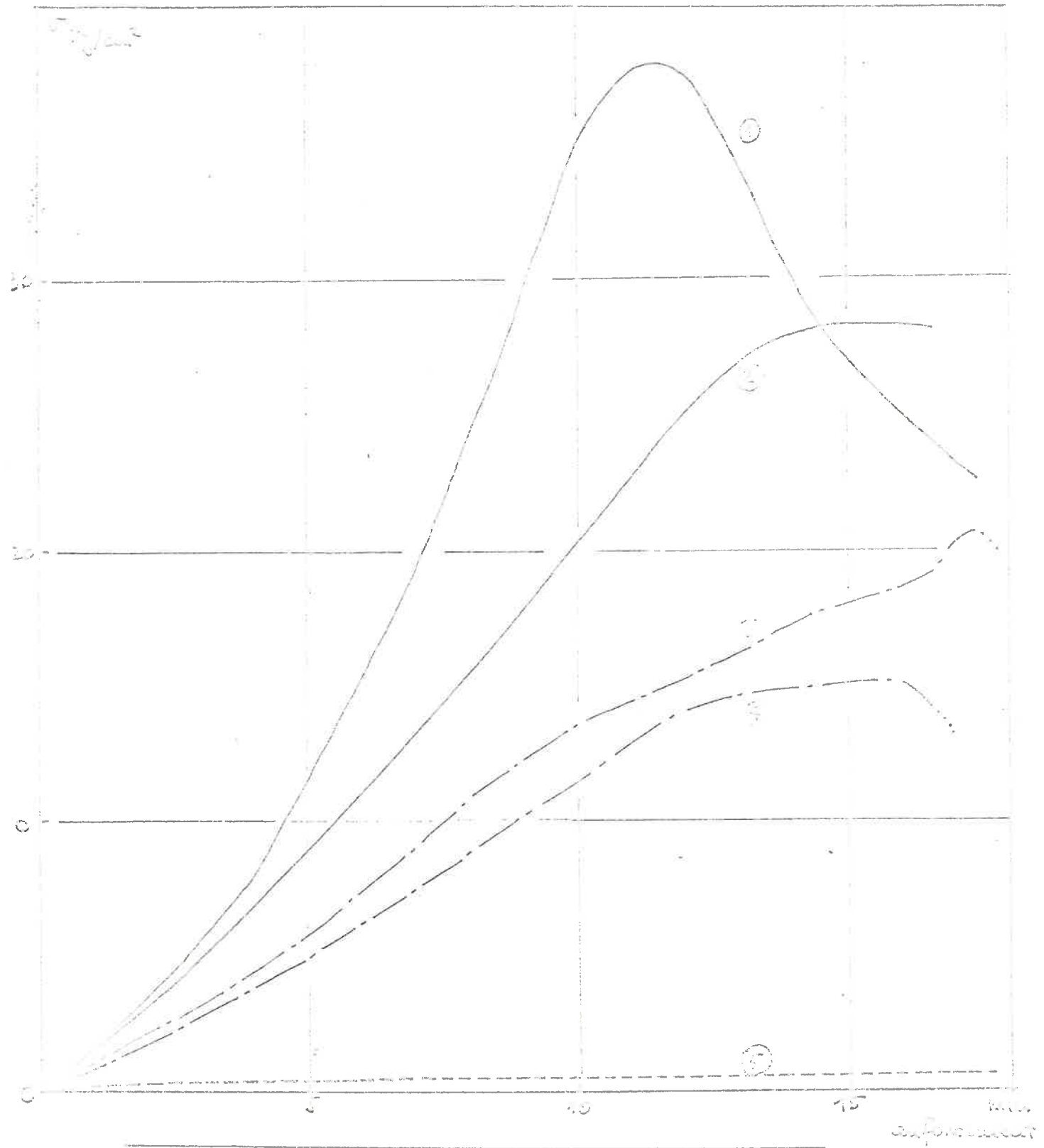
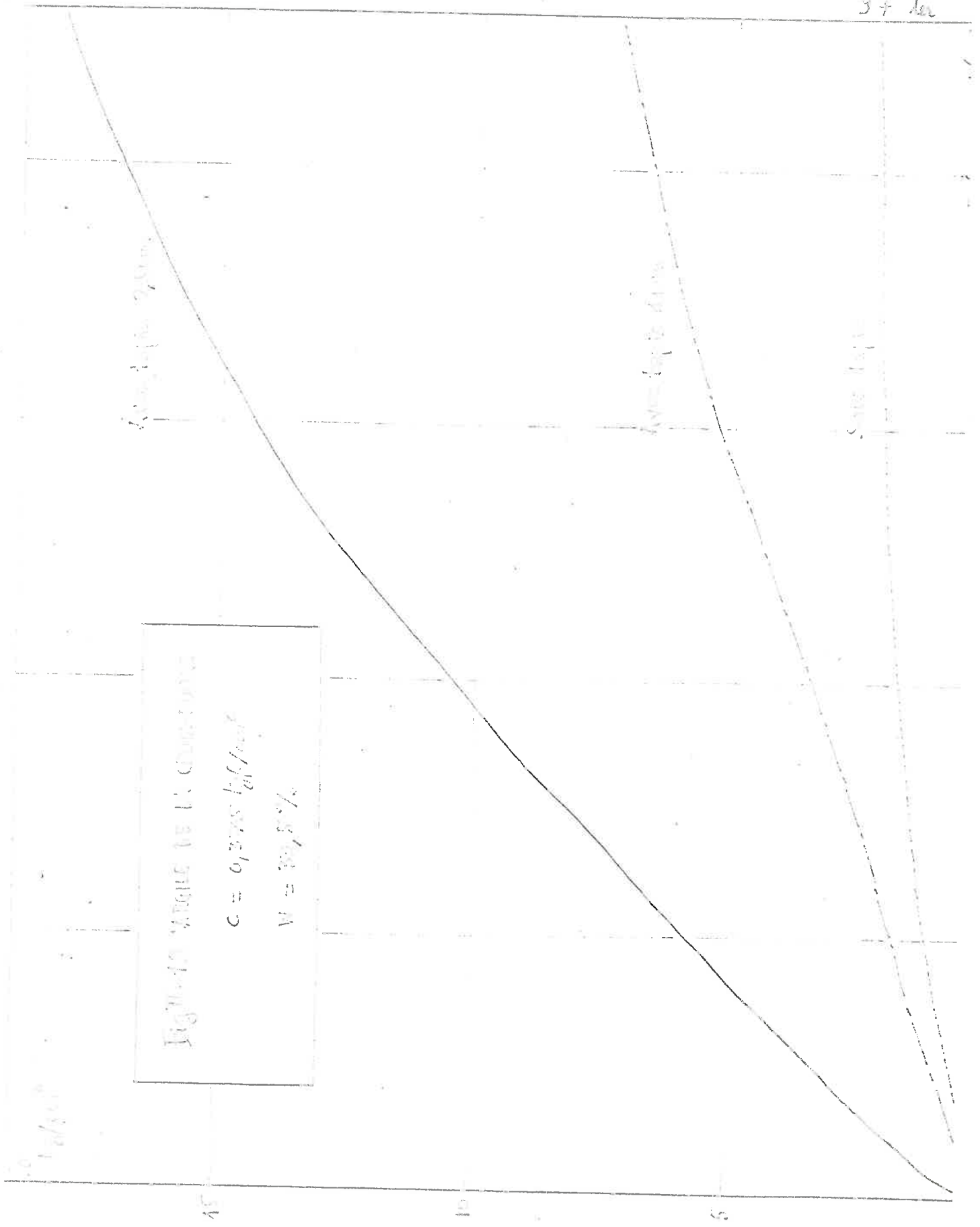
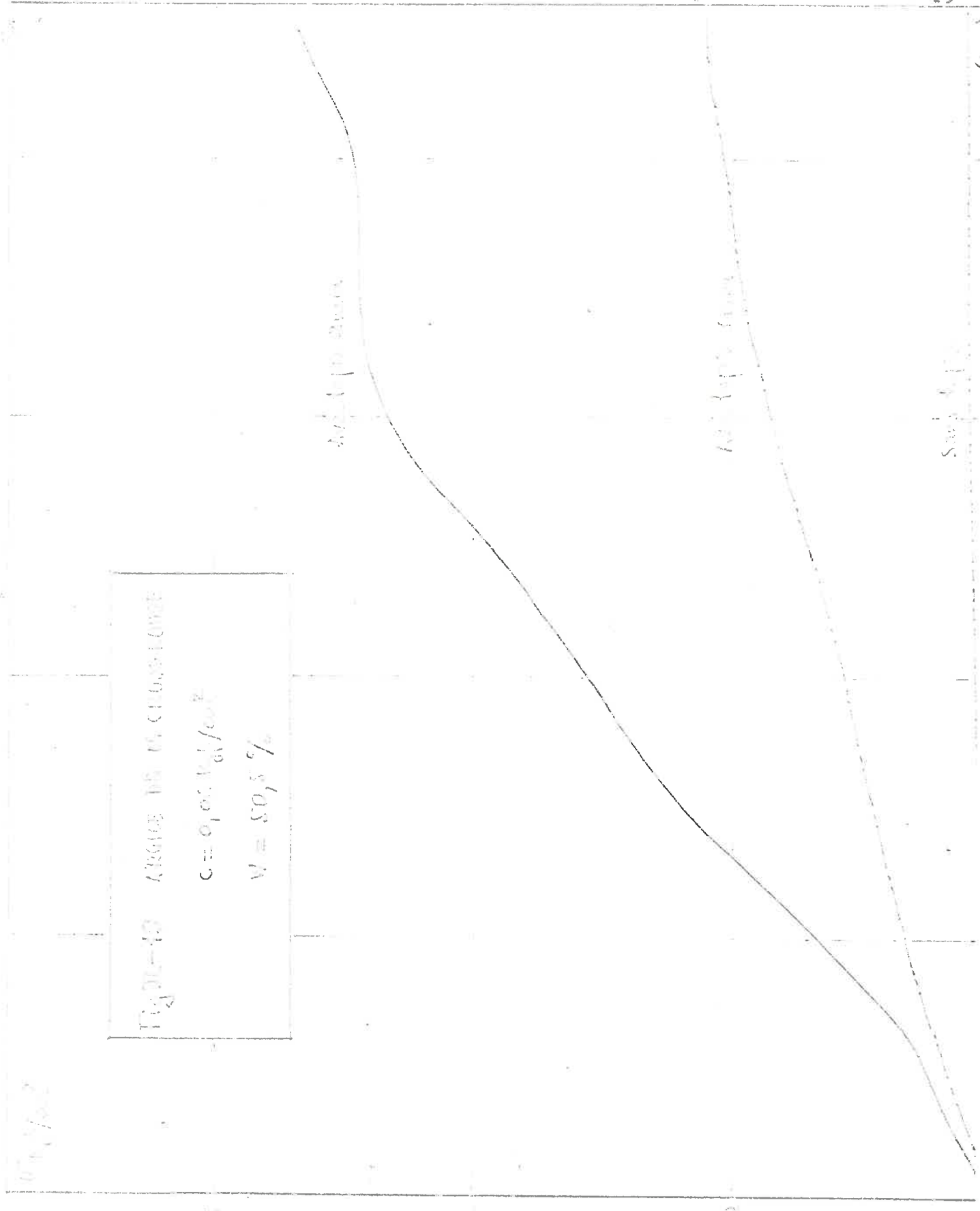


Fig III-17  
 37°C  
 Curve (1) & (2) : same type 2mm  
 Curve (3) & (4) : " " 1mm  
 Curve (5) : same type 2mm







## 4.2.1.2

af those areas affected by erosion due to the use of  
 various polymers in soil, in the field.

### 4.2.1.2.1

- The soil is made of soil, water, and air.
- The soil is made of soil, water, and air.
- The soil is made of soil, water, and air.
- The soil is made of soil, water, and air.

### 4.2.1.2.2

- The soil is made of soil, water, and air.
- The soil is made of soil, water, and air.
- The soil is made of soil, water, and air.
- The soil is made of soil, water, and air.

The soil is made of soil, water, and air. The soil is made of soil, water, and air. The soil is made of soil, water, and air. The soil is made of soil, water, and air.

### 4.2.1.2.3

- The soil is made of soil, water, and air.
- The soil is made of soil, water, and air.
- The soil is made of soil, water, and air.

à l'extrême d'alignement dans le tube filaire (cf. photo 4) et la stabilité n'est pas très bonne.

à Action d'une zone fine (zone de 2 CV, portée à 2,5 N/mm<sup>2</sup>).

Le tube étant souple, il se déforme sous la charge appliquée, d'où une déformation linéaire de 0,1 mm et une déformation relative de 0,001. Cette déformation relative est due à la déformation du tube et non à la déformation du filaire. Le tube est une tige, par conséquent, la déformation est linéaire.



à Passage d'une zone.

Les photos 4 et 5 montrent l'aspect du tube après passage d'une zone : il reste une déformation permanente, et le tube a été plié par suite des efforts tangentiels exercés.

On cherche donc à augmenter la rigidité en même temps que l'élasticité. Nous reviendrons plus loin sur ce problème.

### Étude 3-

Cette série d'essais avait pour but de tester la réaction polymère curatif de POLYMER - SAINT-CLAIR, à température inférieure à 5° C.

Ces essais, effectués en laboratoire et sur le terrain, ne sont révélateurs qu'à titre indicatif.

### Étude 4-

Cette a été réalisée en laboratoire, avec la résine Modastar 2022 de SAINT-CLAIR.

à titre :

- Recherche de spots catalytiques et des décharges à employer pour obtenir une bonne prise jusqu'à des températures inférieures à 5° C.
- Recherche d'un collage du tapis au sol.

à l'attention :

- Les résultats des deux premiers points ont été développés au paragraphe III-5.2. : Modastar 2022 St.
  - Quant au collage du tapis, on a essayé de le réaliser sur un sol argileux détrempé, en projetant d'abord une émulsion de polyester. Cette émulsion étant beaucoup moins visqueuse que la résine, on pouvait penser qu'en une heure ou deux on aurait une pénétration suffisante dans l'argile pour assurer un collage du tapis.
- En fait, cela n'a rien donné.

On a pu réaliser ce collage de façon mécanique, en faisant une série de trous dans le sol à traiter : le polystyrène projeté sur le sol coule dans ces trous et polymérise; on a ensuite un tapis avec des séries de points écartés dans le sol. Lorsque, sous l'action d'une charge, le tapis est sollicité en traction, il modifie les conditions de sollicitation du sol dans toute la zone du tapis en traction.

Par contact, ce sable artificiel de nature en pratique un sol proche à grande échelle.

#### Essai 1.

Cela a été réalisé en laboratoire, avec le sable polymérisé Evugon D. 11, de HANOVER.

- Les trois essais ont été faits pour les essais avec les mêmes conditions.
- Le système analytique et les moyens à employer pour obtenir une prise rapide à 0° C ont été étudiés; les résultats des essais ont été donnés dans le paragraphe II-3.1 : Evugon D. 11.

#### Essai 2.

Le collage de sable artificiel a été effectué sur une parcelle de terrain du Polygone d'Essais de Génie, à Grenoble.

Polystyrène employé : Mandator 2013 SL.

Et sur :

Après les différents laboratoires effectués en laboratoire avec le Mandator 2013 SL, nous avons voulu tester ce produit sur le terrain, pour certaines études, entre autres :

- comparaison : auto-fibre contre projetée.

En laboratoire, pour des raisons pratiques, on réalise de nos jours fibres des structures, et la qualité comparée réalisée de la fibre contre projetée. La réalisation est comparée aux deux sortes de structures en les réalisant simultanément, les conditions étant les mêmes pour les deux.

- étude de la mise en œuvre du textile sur la ligne et détermination des conditions d'usage.
- étude de la résistance à la fatigue pour le passage répété de roues de 600.
- étude des modes de rupture.
- résistance au poinçonnement et aux dents de machines.

et disponibilité expérimental.

Les essais ont été réalisés en deux endroits :

- première série : courants alternatifs, mais ne présentant pas de problèmes particuliers de puissance (photos 9, 10, 11). Ceci est l'occasion plus spécialement le structure lui-même.

Deux séries parallèles ont été réalisées : l'une avec de la fibre contre projetée avec la machine SUDAN et l'autre, l'autre avec un mat de 600 g/m<sup>2</sup>.

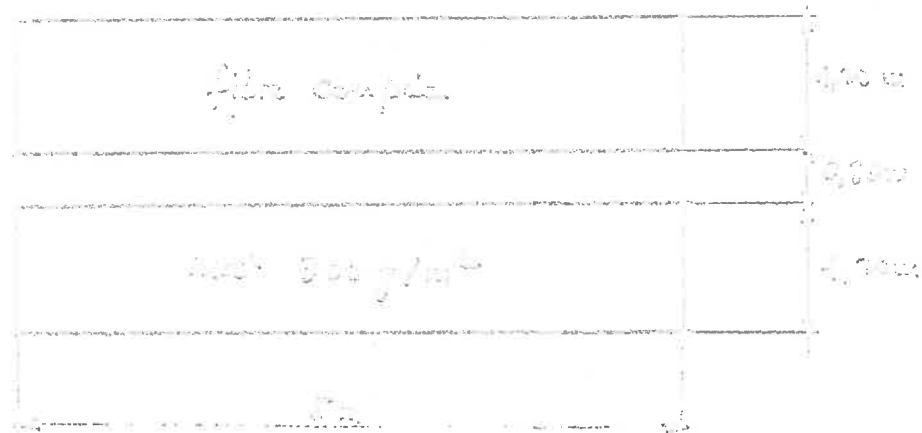


Fig. 2173

Conditions de la : surface supérieure chauffée (table 20).

Air disposé avec deux couches parallèles de même épaisseur.

Conditions de la :

- température extérieure, comprise entre 10 et 15° C au cours des essais.

- hygrométrie : = psychrom. CR 2 0

- densité relative : 0,2 6

Les déplacements de air obtenus au bout d'une heure.

- épaisseur des couches : de 2 à 3 mm.



de légers trous de vers effectués sur la première  
tranche.

- Lourdillage non entièrement du type en vol.-lat. par  
exemple photo 10), malgré une pénétration initiale de  
moins de 10 cm sur la sol.
- La part de la filasse exploitée, pour une même proportion  
d'humidité, diminue sensiblement les temps de séchage.  
En effet en action pour le cas est plus difficile pour  
qu'il soit dans une épaisseur et le rouillage doit être  
réglé.
- Rouillages répétés de 200 (20 passes).  
À chaque passage, chaque balle doit être soumise à l'action  
d'un seul type, puis de deux autres successives.  
Vitesses moyennes : 10 à 15 tours.
- Dans tous les cas signalés, les pertes de matière de 10  
à 15 pour cent (moyennes de 10 à 15 m après 20 passes).
- Le type a gardé sous les traces des roues une déformation  
assez faible (2 à 3 cm). Il n'est déformé du sol que les  
premières passes.
- À la fin des essais, on a constaté sous les traces de  
passage des roues des déformations transversales parallèles,  
très visibles sur la photo 10, dues aux efforts exercés  
par les roues.

• Passage d'un dentifrice à dentifrice BUNNINGER 20.

Le passage de dentifrice qu'on est capable de faire bien aux enfants de dentifrice provient par les dents des dentifrices.

Il est à dire pourquoi jusqu'à la rupture du type (C. photo 3) : après l'essai de dentifrice, il a été expérimenté dentifrice sur toute la dentifrice.

• Résultats des essais effectués sur la dentifrice 20.

Il est à dire dentifrice de dentifrice un type dentifrice sur une portion de dentifrice dentifrice d'une avec une dentifrice à dentifrice, sur la dentifrice et la dentifrice se dentifrice à la dentifrice de dentifrice. Il dentifrice dans dans en une dentifrice dentifrice de la dentifrice dentifrice.

Dans ce cas, le dentifrice a obtenu de dentifrice dentifrice dentifrice (C. photo 3), et la dentifrice dentifrice avec de dentifrice dentifrice.

• Passage répété de GNC.

Les dentifrices dans la dentifrice avaient de 20 à 30 en de dentifrice. Les dentifrices sont les mêmes que pour les dentifrices sur la dentifrice dentifrice. La dentifrice dentifrice est plus grande, et la dentifrice dentifrice plus dentifrice.

• Conclusion.

Les dentifrices ont pu être dentifrices dentifrice dentifrice. Le dentifrice de dentifrice dentifrice de dentifrice, et dentifrice dentifrice.

Il dentifrice à dentifrice une plus grande dentifrice dentifrice, en dentifrice dentifrice de dentifrice.

## Matériau

a) Cette série d'essais a été réalisée grâce à la collaboration de l'Entreprise de Travaux Publics " LES TRAVAUX DE LA VILLE " à CHARENTON-LE-PONT (Seine).

Les séries polymères employées dans les échantillons ont été choisies au paragraphe 3.2 et sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

b) sur :

Etude de la mise en œuvre sur un ouvrage d'art. Etude de procédés de stabilisation rapide par tapis de surface.

c) Réalisation des essais.

- On a préparé un long tube avec différents enroulements (une partie sur un revêtement d'argile naturelle, une partie sur revêtement de grille dans une planche, ce revêtement étant fabriqué avec les plaques de béton qui, après 3 jours, on éjecte les différents pans y circulés).

A été aussi installé une pièce en bois pour la circulation de la machine à traction, et l'opérateur se déplaçait sur des planches avancées au fur et à mesure de la réalisation du tapis.

- Conditions de prise :

• température ambiante : 10° C environ

• catalyse : -paragel CR : 2 %

-diméthylamine : 0,5 %

Il y a des essais effectués au laboratoire (cf. paragraphes ci-dessus) sur pourcentage suivants dans le cas de prise.

.../...

« l'épaisseur de la tige » variable entre 2 et 10 mm.

En ces tiges distillées, quel que soit l'épaisseur, à obtenir une épaisseur régulière, à cause des aspérités du terrain ou de l'eau qui se trouve à sa surface. Tout ce qui peut en résulter en matière d'épaisseur.

« Le mode de culture distillée avait un autre type de culture »

« Plusieurs cultures ont été faites avec le même matériel différentiel »

- culture 1 : distillat complet (sans sucre) et sans alcool.
- culture 2 : non distillat.
- culture 3 : première couche distillée, des autres non.
- culture 4 : première couche distillée et seconde de bois, pour obtenir la polyéthylène et les la première couche en alcool, sans alcool de sucre en polyéthylène les autres complètes d'eau. Pas d'alcool.

|                   |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Distillat complet | 1      | 2      | 3      | 4      | 100 mm |
| ①                 | ②      | ③      | ④      |        |        |
| 100 mm            | 100 mm | 100 mm | 100 mm | 100 mm |        |

Fig 2-2

### 4.1.2.2.2.2.

- Le point a été obtenu en 1871 environ, ce qui peut être confirmé sans retardement.
- Quantité de polygone : on a utilisé 100 kg de résineux. On les garde avec les déchets, dans les fonds de bois, dans les bûches, jusqu'à ce qu'ils soient usés.

#### 4.1.2.2.3.

On a vu dans le chapitre précédent en ce qui concerne les points de vue, de l'écart par rapport aux données de l'industrie à propos de l'exploitation des bois de la zone (cf. pages 13 et 14).

La coupe de la coupe de la coupe de la coupe de la coupe, et la coupe de la coupe de la coupe de la coupe.

La coupe de la coupe de la coupe de la coupe : on voit, l'écart de la coupe de la coupe de la coupe de la coupe de la coupe de la coupe de la coupe de la coupe.

La coupe de la coupe de la coupe de la coupe de la coupe et la coupe de la coupe de la coupe de la coupe de la coupe.

La coupe de la coupe de la coupe de la coupe de la coupe de la coupe de la coupe de la coupe de la coupe.

#### 4.1.2.2.4.

La coupe de la coupe de la coupe de la coupe de la coupe.

En fait, on ne peut guère en tirer de conclusions, car les données de bois agissent de trois façons :

- par leur présence propre,

.../...

- par le fait que le polyacétate projeté à l'état de polyacétate sans être en contact de l'eau qui mouille le sol, et les propriétés mécaniques de résistance sont excellentes,

- par leur adhérence au sol.

Il serait intéressant d'étudier ce problème, car c'est peut-être dans cette direction qu'il faut chercher pour obtenir l'assèchement des tapis de sol.

### III-3. Conclusions.

#### III-3.1. Sur les problèmes mécaniques soulevés.

Les premiers essais réalisés en laboratoire sur un tapis de polyacétate sans de fibres de verre ne sont révélateurs que partiellement, la présence d'un sol ainsi stabilisé étant considérablement augmentée.

Mais ces problèmes essentiels tiennent surtout de la prise rapide de polyacétate au sol, c'est-à-dire éventuellement en présence d'eau et à température quelconque.

Ces problèmes soulevés à présent résolu, et on peut considérer que la prise est possible en moins d'une heure jusqu'à une température voisine de  $-5^{\circ} \text{C}$  (cf. paragraphes III-3.2).

On a vu d'autre part que la mise en œuvre jusqu'à de telles températures est possible grâce à l'addition de  $\text{CaCl}_2$ .

Dans l'ensemble, les effets bénéfiques sur le terrain de ces motifs métalliques, ou de motifs vides en encoches, sont :

ainsi, les différentes applications sont :

- la réalisation de tapis en sol, que l'on aie quand on réalise un revêtement.
- la réalisation d'un tapis suffisamment résistante, que la grande de projection mécanique de fibres ou de vides, lorsque le sol est recouvert d'une couche d'eau d'épaisseur supérieure à 1 cm.

Ensuite, il semble qu'on puisse obtenir une réalisation correcte moyennant certaines conditions :

- l'épaisseur du tapis,
- l'épaisseur suffisante de la couche de courtoisie,
- Le tapis doit être prolongé sur le sens de terrain dans de quelques mètres, sinon on risque d'avoir une amorce de décollement à l'extrémité du tapis, sous le passage des roues. Or, on a vu qu'une décollement se propage très vite dans le tapis à partir d'une telle amorce de rupture.

2.2.2.3. Exemples de réalisations à l'échelle.

Appelons simplement que le stockage et la manœuvre de ces motifs et leur réalisation sur un certain nombre de réalisations qui ont été réalisées plus haut (paragraphe 2.2.2.1. et 2.2.2.2.).

De même, un défaut de rinçage au solvant de la machine pendant un arrêt prolongé pourrait la mettre hors d'usage (cf. paragraphe II-7.34).

#### III.1. Essais à réaliser.

Les difficultés d'ordre pratique rencontrées au cours de notre expérimentation ne nous ont pas permis de réaliser tous les essais souhaitables. Les points à préciser sont les suivants :

- a) Etude approfondie des propriétés mécaniques des résistances polyester-verre, réalisées soit à sec, soit en présence d'eau, à différentes températures.
- b) Etude de nouveaux produits susceptibles d'être utilisés pour la réalisation de ces tapis, en cherchant particulièrement des temps de prise plus courts dans le domaine des températures inférieures à 0° C.
- c) Essais mécaniques sur des tapis de surface :
  - . Essais statiques :
    - essais de plaques,
    - ensencement de roues rigides ou de pneumatiques, etc...
  - . Essais dynamiques :
    - mesure des déformations sous sollicitations alternées,
    - résistances à la fatigue.



b) Mise en oeuvre :

Les cas où le sol est recouvert de végétation ou recouvert d'une couche d'eau sont à étudier plus particulièrement du point de vue réalisation pratique des tapis.

Ces aspects complémentaires confirmeraient peut-être le grand intérêt que peuvent présenter les stratifiés polyester-verre dans la stabilisation rapide des sols.

## B I B L I O G R A P H I E

---

- J. BIAREZ, "Cours de Mécanique des Sols Appliquée", Troisième Cycle de Mécanique des Sols, Faculté des Sciences, (GRENOBLE).
- B. GAUDIN, "Stabilisation rapide des sols humides à l'aide de résines synthétiques", Thèse de Doctorat de Spécialités, Faculté des Sciences, (GRENOBLE, 1965).
- C. MIEUSSENS, "La stabilisation chimique des sols", Thèse de Doctorat de Spécialités, Faculté des Sciences, (GRENOBLE, 1967).
- A. de DANI, "Plastiques renforcés aux fibres de verre", Eyrolles, (PARIS, 1966).
- L. RECHNER et G. LAVAL, "Ce que le constructeur doit savoir sur les matières plastiques. I - Initiation aux matières plastiques comme matériaux de construction", A.I.T.B.T.P., n° 193, série Matériaux n° 25, (Janvier 1964), 5 - 39.



Photo 1 : Machine "Stratisim E".



Photo 2 : Groupe de projection en action.

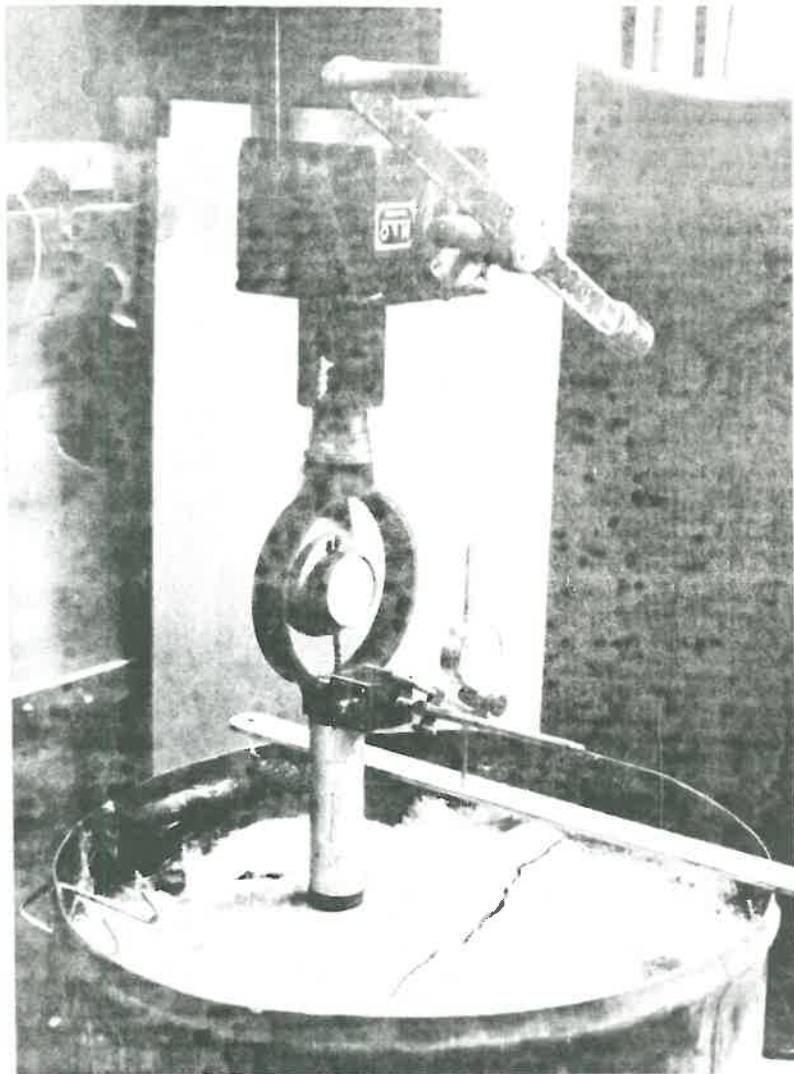


Photo 3



Photo 4 : amorce de rupture du tapis sous le piston CBR.

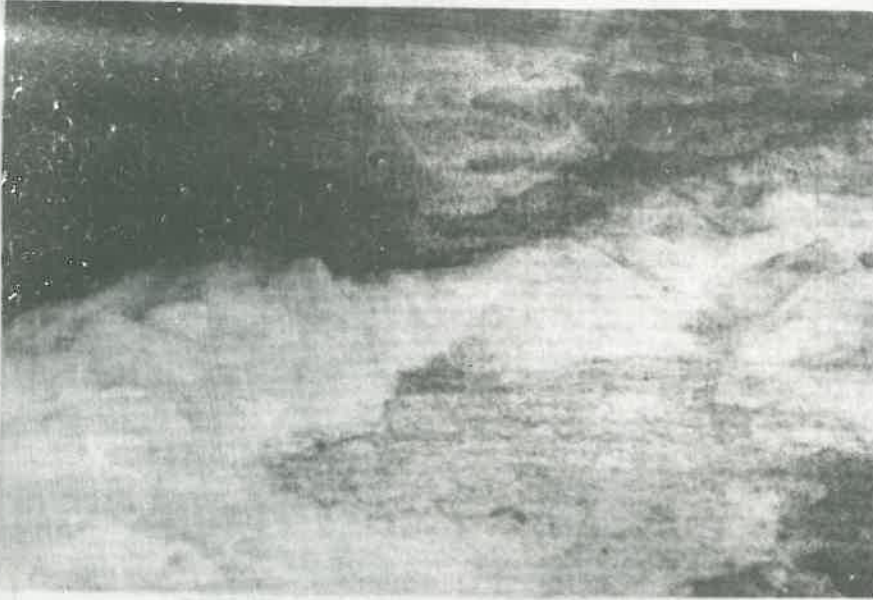


Photo 5 : Passage d'une roue .



Photo 6 : aspect d'un tapis non 'ébullé'  
après passage d'une roue .



Photo 7 : différence d'aspect entre partie  
roulée (à gauche) et non roulée.

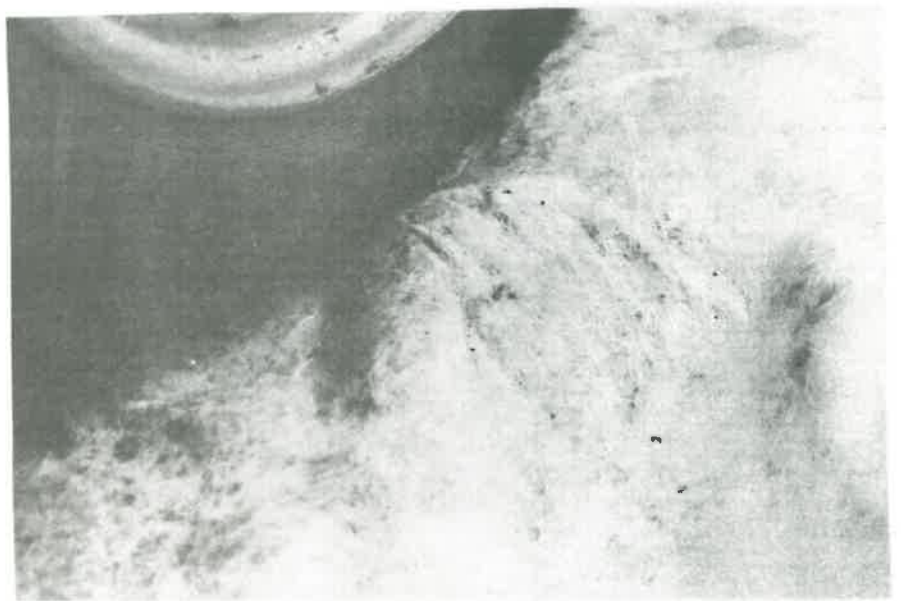


Photo 8 : aspect fibreux d'un tapis non roulé.

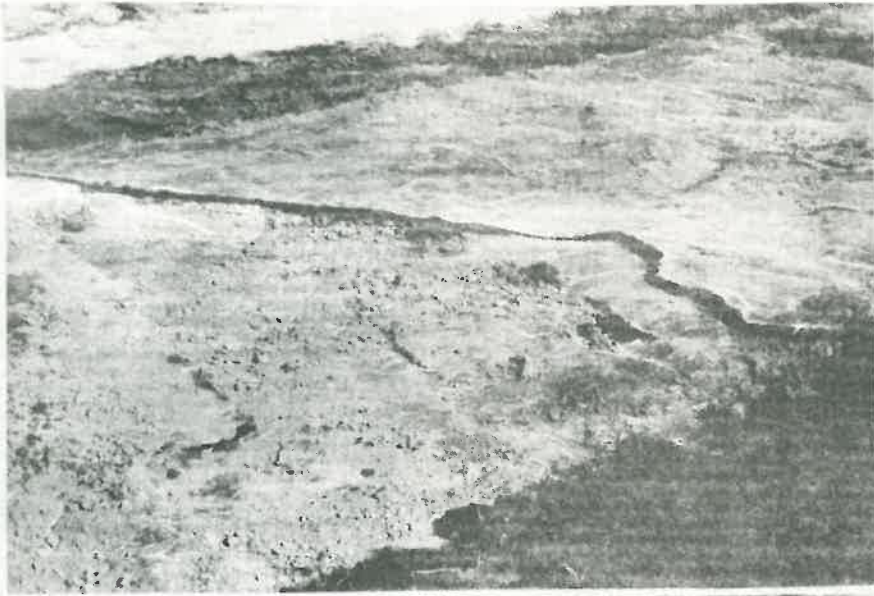


Photo 9 : cisaillement  
sur toute la largeur d'une  
bande de stratifié .

Photo 10 : rupture  
du tapis sous le  
passage répété de  
roues de G.M.C.

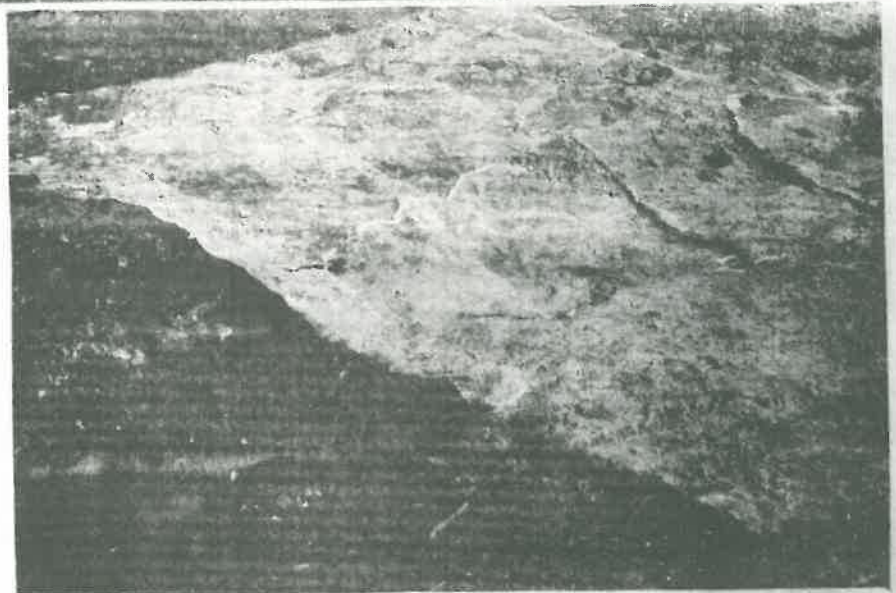


Photo 11 : traces  
lâissées par les  
chenilles d'un  
Bulldozer D8 .



Photo 12



Photo 13 : essai de rupture de tapis sous l'action d'un bulldozer à pneus CAT 824.

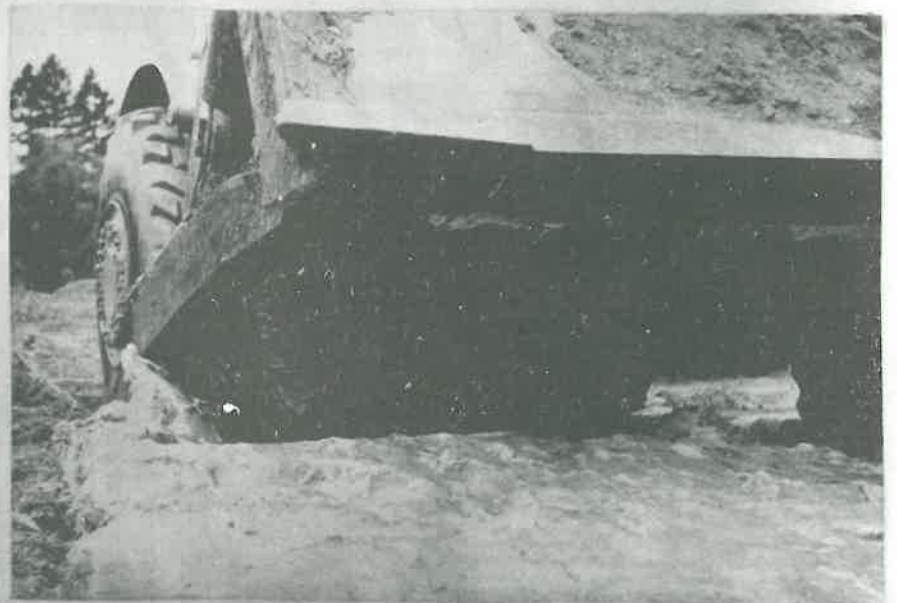


Photo 14 : Flexion du tapis et formation d'un bourrelet à l'avant de la roue.



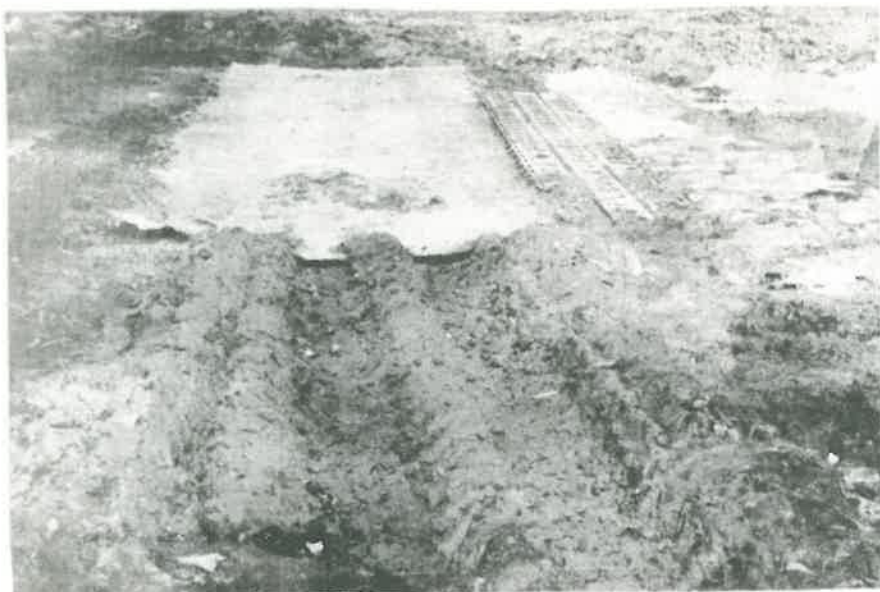


Photo 15 : décollement de tapis après passages répétés de G.M.C.

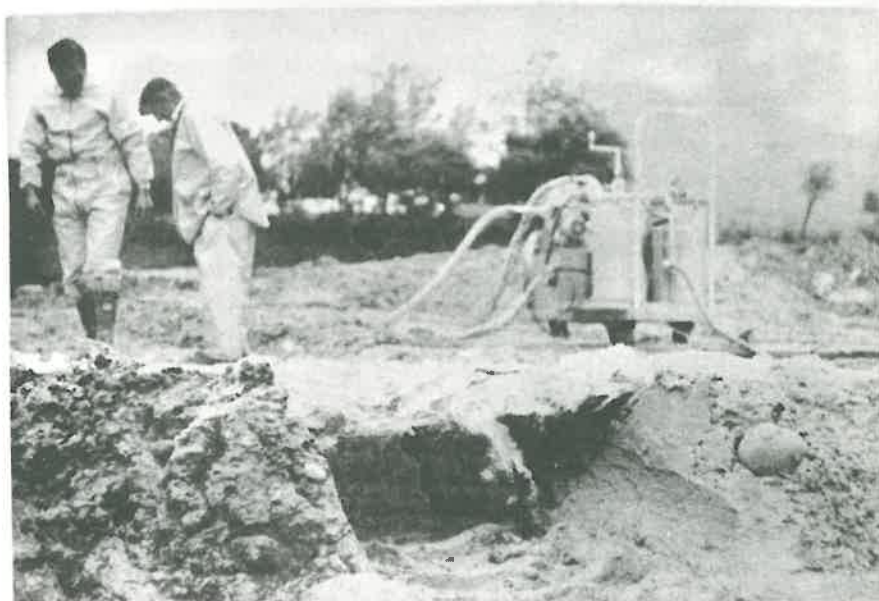


Photo 16 : ornières laissées par le Bulldozer à pneus CAT 824 après rupture du tapis.