

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

22/86

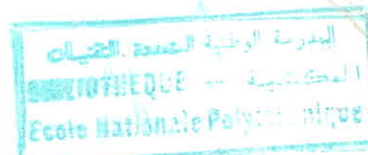
وزارة التعليم والبحث العلمي

2EX

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE CIVIL



PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

TRAITEMENT DES LIMONS
A LA CHAUX
PLANCHE D'ESSAI
A L'AEROPORT HOUARI
BOUMEDIENE

Proposé par : (L.N.T. P.) Etudié par : M*KHEBIBECHE Dirigé par : KENANA
DJ*BOUCHAMA Y*LEROLLE

LABORATOIRE NATIONALE
DES TRAVAUX PUBLICS

PROMOTION : JANVIER 86

Travail de fin d'études présenté par :

M.M BOUCHAMA
KHEBIBECHE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

TRAITEMENT DES LIMONS A LA CHAUX
PLANCHE D'ESSAI A L'AEROPORT HOUARI BOUMEDIENE

PROMOTION : JANVIER 1986

SOMMAIRE GENERAL

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

1ère Partie : (Etude Théorique)

. Traitement des sols à la chaux..... Page 1

2ème partie : Etude au laboratoire

. A - Avant traitement..... Page 23

. B - Après traitement..... Page 39

3ème partie : Essai In-Situ..... Page 59

4ème partie : Conclusions générales..... Page 82

ANNEXE : Modifications des teneurs en eau
(explication)..... Page 85

Références bibliographiques..... Page 86

TRAITEMENT DES SOLS FINS A LA CHAUX

- AVANT PROPOS	p2
- INTRODUCTION	p4
<u>I - LA CHAUX</u>	
1 - Définition du matériau chaux	p6
2 - Différents types de chaux	p6
. Chaux aériennes	
. Chaux hydraulique	
3 - Caractéristiques chimiques et physiques	p8
. caractéristiques chimiques	
. caractéristiques physiques	
4 - Critères d'utilisation de la chaux dans le domaine routier	p9
5 - Types de chaux produites en Algérie	p10
. Caractéristiques de la chaux de Safda	
<u>II - LE SOL</u>	
1 - Types de sols susceptibles d'être traités à la chaux	p11
2 - Zones susceptibles d'être traitées à la chaux	p11
<u>III - TRAITEMENT DES SOLS A LA CHAUX</u>	
1 - Introduction	p13
2 - Différents procédés du traitement à la chaux	p14
3 - Mécanisme du traitement	p14
3 - 1 - Effet immédiat	p15
3.1.1. La granulation	
3.1.2. Assèchement du sol	
3 - 2 - Effet à long terme	p17
4 - Présentation de résultats recherches sous forme de courbes	p18
5 - Présentation de travaux faits en Algérie	p19
Méthodologie d'étude au Laboratoire (LTFC)	

L'idée première, qui nous a amené à choisir ce sujet, était d'essayer de contribuer à la diversification des sujets de fins d'études à l'E.N.P.A. (Ecole Nationale Polytechnique d'Alger) et en même temps de développer certains domaines en géotechnique routière.

"Le Traitement des Sols Fins à la Chaux" nous a été proposé par Monsieur FEGHOUL Mohamed Djamel-Eddine, Directeur Général du Laboratoire National des Travaux Publics (L.N.T.P.).

Un bref aperçu du contenu du sujet a aiguisé notre curiosité pour une technique riche de promesses et nous avons accepté très volontiers d'étudier l'activité de la chaux sur les limons.

Les difficultés rencontrées dans les chantiers autoroutiers en raison des qualités médiocres des sols et des intempéries, nous amènent à nous pencher très sérieusement sur une technique qui permet au sol naturel subissant un traitement à la chaux d'atteindre des performances appréciables.

Au cours de ce travail, qui nous a été confié, nous primes connaissance des études qui furent établies au L.T.P.C. (Laboratoire Travaux Publics du Centre) ce qui nous a amené à une étude au Laboratoire et par la même occasion d'élargir cette étude par la confection d'une planche d'essai expérimentale.

Nous tenons à remercier Monsieur FEGHOUL Mohamed Djamel-Eddine, Directeur Général du L.N.T.P. pour l'appui considérable qui nous a été donné pour l'établissement de notre travail, malgré les lourdes responsabilités de sa tâche.

Nous remercions Messieurs LEROLLE et KENANA, respectivement Ingénieur au L.N.T.P. et Enseignant en Mécanique des Sols à l'E.N.P.A. pour avoir consenti à patronner notre travail et toute l'attention qu'ils nous ont prodigué au cours de sa réalisation.

Par la même, nous remercions Monsieur BENDAOU, Directeur des Infrastructures de Base de la Wilaya d'Alger pour la prise en charge de la confection de la planche d'essai expérimental ainsi que l'Entreprise "Chantiers Modernes" pour sa réalisation.

INTRODUCTION.

Les argiles, les limons et les marnes représentent en extension une fraction importante des terres immergées.

En génie civil et plus particulièrement en construction routière, ils apparaissent trop souvent comme de mauvais sols à cause de la variabilité de leurs propriétés mécaniques avec teneur en eau; selon celle-ci la consistance du sol peut devenir plastique ou fluide et inversement (une faible pluie peut suffire pour passer d'un état à l'autre).

Dans certains cas particulièrement défavorables, l'Ingénieur se voit contraint de mettre à la décharge des milliers de mètres cubes de sols argileux et de les remplacer par des matériaux d'apport et ceci malgré le coût de telles opérations.

La stabilisation des sols en général peut apporter, une solution au problème de leur utilisation.

En effet, en améliorant ses caractéristiques mécaniques et sa durabilité elle tend à rendre ce matériel utilisable en construction.

Parmi les stabilisations de sols nous citerons :

- stabilisation au ciment;
- stabilisation à la chaux (éteinte ou vive)
- stabilisation par agent de constituants (morts ou vifs)
Actifs chimiquement : Bitume, hydrophobant).
- densification avec des moyens mécaniques (compactage, damage, ...)
- stabilisation d'un sol à la chaux et au ciment (traitement mixte).

./...

Si une stabilisation au moyen d'une technique (par ajout de chaux par exemple) est efficace avec un tel sol, elle ne peut l'être avec un autre. Chaque sol est un cas d'espèce; l'efficacité de la stabilisation est tributaire d'essais préalables dans chaque cas.

Au cours de notre travail nous étudierons la stabilisation des sols fins à la chaux qui touche une grande partie des sols limoneux argileux ou marneux.

LA CHAUX

1 - DEFINITION DU MATERIAU CHAUX

L'utilisation très ancienne de ce matériau de construction, les variétés différentes sous lesquelles il peut se présenter ont conduit à des définitions assez imprécises du terme chaux.

Il reste malgré tout acquis que le terme chaux se rapporte en ordre principal à l'oxyde de calcium et à l'hydrure de calcium.

Les formes de variétés chimiques ou physiques sous lesquelles peut se présenter l'oxyde de calcium soit :

- 1 - (CaO) état d'oxyde de calcium pur
- 2 - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ état d'oxyde de calcium après hydratation
- 3 - en mélange avec des éléments argileux formant des silicates et aluminates de calcium (chaux hydraulique).

2 - DIFFERENTS TYPES DE CHAUX

Il existe différents types de chaux dépendant du matériau d'origine, du procédé de fabrication et de l'état final du produit fabriqué. On peut envisager les paramètres suivants qui sont à la base de la diversification des chaux.

- La température et le degré de cuisson de la roche mère (CaCO_3) :
Il existe une température charnière (1150 - 1200°C) en deçà et au delà de laquelle la chaux obtenue possède des propriétés différentes.
- Richesse en carbonate de calcium roche mère.
- La teneur en éléments argileux de la roche mère.

On distingue deux types de chaux :

- . chaux aérienne
- . chaux hydraulique

1 - Chaux aériennes

Ceux sont des chaux provenant de la calcination à une température de 900° à 1000° C de roches calcaires très pures (de 65 à 99 % de Ca CO_3): le carbonate de calcium (Ca CO_3) que contiennent ces roches se décompose alors que le gaz carbonique s'échappe et il reste l'oxyde de calcium (CaO) $\text{Ca CO}_3 \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{CaO}$, le reste étant constitué de carbonate de magnésium, de silice, d'oxyde de fer et d'alumine. Elles contiennent une teneur importante en Ca (60 à 97 %) exprimé en CaO . Leur teneur en CaO est de 60 à 97 %. Elles sont appelées ainsi parce qu'en cas de construction elles constituent des liants qui font prise à l'air par recarbonation.

Elles constituent les principales chaux utilisables en stabilisation. Les chaux les plus pures sont souvent appelées chaux grasses en raison de l'onctuosité qu'elles donnent aux mortiers. Par opposition, les chaux moins pures sont appelées chaux maigres.

On y distingue :

La chaux vive (CaO)

Directement produite, son emploi est limité par des conditions délicates de stockage et de manutention : c'est un matériau très avide d'eau et agressif qu'il faut manipuler avec précaution et qui doit être maintenu à l'abri de l'humidité jusqu'à son emploi.

La chaux vive, en contact avec l'eau, produit un échauffement violent et la température peut alors dépasser 150° C, elle peut présenter cependant certains avantages sur la chaux éteinte ; dans les sols humides en absorbant une grande quantité d'eau à poids égal, elle est plus efficace car elle apporte plus d'ions-calcium.

./.

- Chaux éteinte : $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Est obtenue par hydratation de la chaux vive. Ne présentant pas les inconvénients propres à la chaux vive. Elle est couramment utilisée en stabilisation ce qui nous a amené à la choisir pour notre travail.

2 - Chaux hydraulique

Ceux sont des chaux en provenance de la calcination à la température juste au-dessus de 1200°C de roches calcaires argileuses contenant moins de 95 % de carbonate de calcium (entre 40 à 95 %) et ont par conséquent des propriétés hydrauliques fortement marquées qui les rapprochent des ciments. Elles sont surtout utilisées pour le bâtiment faite de ciment.

3 - Caractéristiques chimiques et physiques :

Caractéristiques chimiques :

- . La teneur en CaO : est évidemment la principale caractéristique d'une chaux. Mais ce CaO peut être libre c'est-à-dire sous forme de CaO ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
- . La teneur en MgO : est importante à connaître puisque la magnésie a en général une action analogue à la chaux. Le MgO peut être libre ou combiné.

Les principales indications données par l'analyse chimique d'une chaux seront les teneur en :

- CaO total et libre
- MgO
- CO_2
- SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3

Réactivité : elle exprime la rapidité d'action d'une chaux lors de son emploi. Elle peut se mesurer en déterminant la vitesse de réaction de la chaux en présence d'eau.

Il est bien évident que pour les chaux éteintes qui ont déjà été hydratées ne réagissent plus à l'eau.

Caractéristiques physiques- Finesse :

+ Surface spécifique : donne indication sur l'importance des surfaces de contact entre chaux et sol :

- chaux vive 3 000 à 10 000 cm²/g
- chaux éteinte 10 000 à 20 000 cm²/g
- par contre le ciment 2 000 à 3 000 cm²/g

+ Masse volumique apparente : varie beaucoup

- chaux vive 800 à 950 kg/m³
- chaux éteinte 300 à 650 kg/m³

+ Solubilité : très faible et diminue lorsque la température augmente
1,2 g/l à 20 °C et de 0,67 g/l à 80° C.

4 - Critères d'utilisation de la chaux dans le domaine routier

Dans le domaine routier, l'utilisation de la chaux est régie par des recommandations.

On citera les spécifications du SETRA - LCPC (tableau 1)

Les critères indiqués dans le tableau 1 concernent les chaux aériennes (vive ou éteinte).

Le respect de telles conditions garantit l'aptitude d'une chaux au traitement des sols fins.

Cependant d'après SETRA - LCPC Août 72, l'emploi d'une chaux ne remplissant pas toutes les conditions énumérées, n'est pas nécessairement exclu.

Chaux viveChaux éteintecritères granulométriques

- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1. Classe granulométrique 0/2 mm
2. Passant au tamis de 200 μ > 90 %
3. Passant au tamis de 80 μ > 50 % | passant au tamis de 80 μ > 90 % |
|---|-------------------------------------|

critères chimiques et de réactivité

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Teneur en chaux libre > 80 % (*)
2. Teneur en chaux éteinte < 5 %
3. Test de réactivité à l'eau (*) la température finale minimale doit atteindre 60°C au bout de 25 Mn | Teneur en chaux libre > 50 % |
|--|------------------------------|

(*) voir annexe II - paragraphe 2 (SETRA-LCPC - août 72)

5 - Types de chaux produites en Algérie : (1)

En Algérie, la plus grande usine de production de chaux est l'Unité d'Oum Djerane située dans la Wilaya de Saïda.

Néanmoins, il existe d'autres Unités qui produisent de moindres quantités.

- La Fabrique de Chenoua - Wilaya de Blida
 - . chaux vive non commercialisée
 - . chaux éteinte commercialisée
- La Fabrique de Chettaba
 - . chaux hydraulique (SNMC)

Caractéristiques de la chaux de Saïda :

chaux vive : sous forme broyée et en morceau
chaux éteinte appelée "chaux hydratée"

Conformément aux normes allemandes DIN/1060, les caractéristiques sont les suivantes :

	<u>surface spécifique</u>	<u>densité</u>
<u>chaux éteinte</u>	14 000 cm ² /g	370 kg/m ³
<u>chaux vive</u>	700 cm ² /g	700 à 800 kg/m ³

(1) voir Thèse de KARA Mostefa Kamel - année 83-84 (ENTP Kouba)

1) Type de sols susceptibles d'être traités à la chaux

Le sol doit avoir une proportion non négligeable d'argile : partie produisant une réaction avec la chaux.

Selon la nature des minéraux argileux présents dans ce sol (Kaolinite, Illite, Montmorillonite...) les résultats varient sensiblement.

La présence de matières organiques dans le sol peut retarder l'effet à long terme de l'adjonction de chaux.

Mais en augmentant les proportions de chaux, on peut traiter de façon satisfaisante un sol contenant jusqu'à 20 % de matière organique (1).

L'argile, partie active du sol, se présente lorsqu'elle se trouve dans ce sol, comme un matériau malléable, plastique et possède une certaine cohésion à une certaine teneur en eau. Quand elle sèche, sa cohésion augmente : elle durcit. Une nouvelle augmentation en teneur en eau (rehumidification) produit une perte de cohésion d'où grande difficulté de mise en oeuvre.

Dominique PRIN et Jean-Claude CUBEAU ont établi dans leur communication "Stabilisation des terres et les Mécanismes physico-chimique liés à la cristallisation à froid" une adéquation entre les caractéristiques d'un sol et la technique de stabilisation la plus appropriée :

" Le traitement à la chaux s'impose dans le cas d'un sol contenant plus de 40 % d'argile ou si l'indice de plasticité égal ou supérieur à 17 et sa limite de liquidité égale ou supérieure à 40".

2. Zones susceptibles d'être traitées à la chaux dans le Nord Algérien :

Beaucoup de régions en Algérie, notamment au Nord de l'Atlas Tellien sont composées de sédiments quaternaires essentiellement argileux (sols dits paranormaux en raison de leurs difficultés de mise en oeuvre).

./.

Une esquisse structurale établie par A. CAIRE en 1967 nous donne les zones susceptibles d'être traitées à la chaux (fig. 1)

Une localisation de l'Usine de fabrication de chaux (2) sur la même carte nous permet d'avoir une première approche de l'importance des frais de transport de chaux de l'usine au lieu de traitement.

(1) Par le CRATERRE (construire en terre) page 211

(2) Usine de Oum Djerane (Wilaya de Safda)

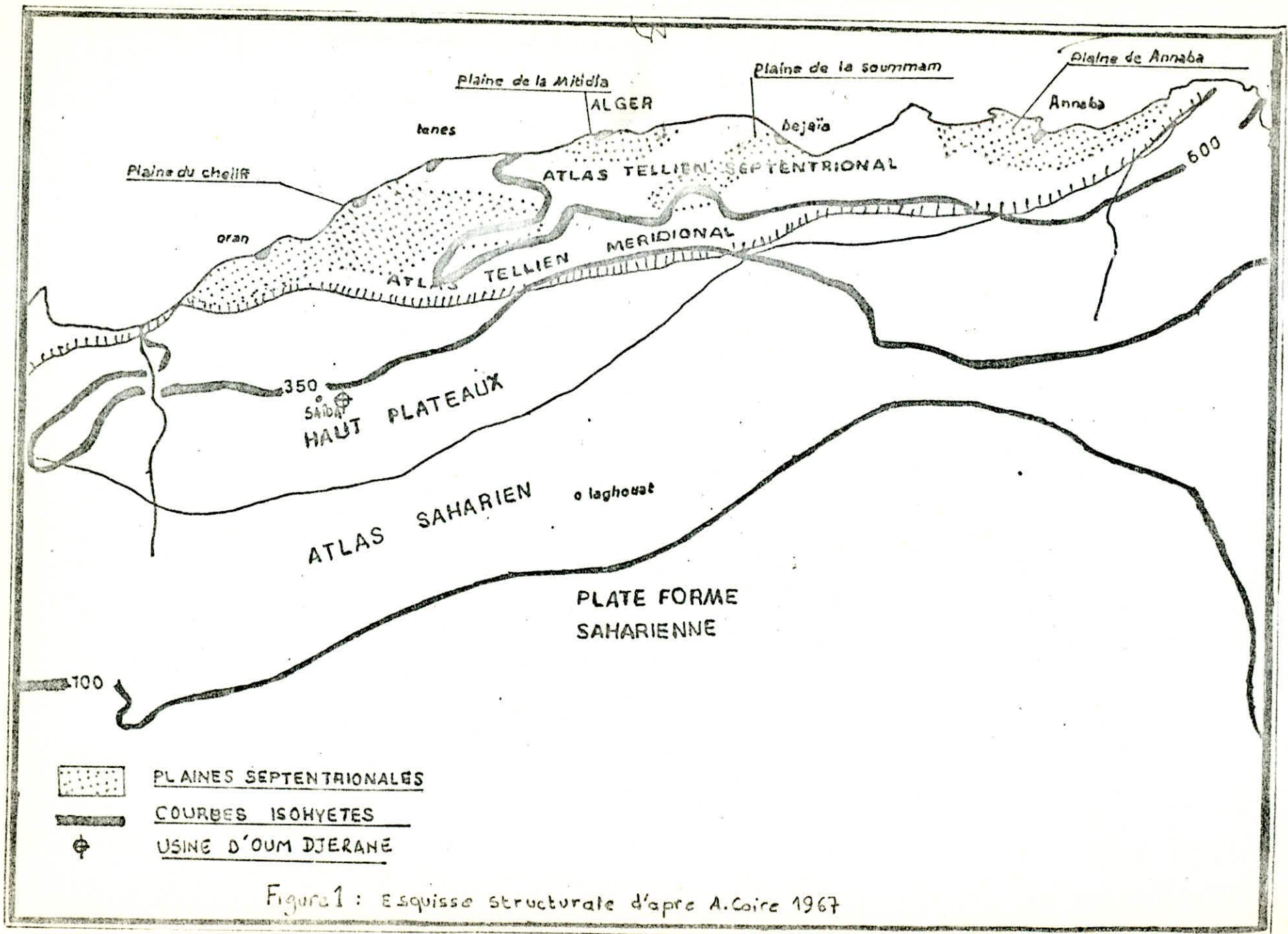


Figure 1 : Esquisse structurale d'après A. Coire 1967

III - TRAITEMENT DES SOLS A LA CHAUX -

1 - INTRODUCTION

L'utilisation de la chaux, dans le domaine routier, n'est pas nouvelle, "les Romains l'employèrent soit seule, soit en association avec des cendres volantes ou pouzzolannes pour construire leurs routes et spécialement la Voie Appienne. Cette route a rendu, depuis sa construction d'excellents services et sert encore au trafic." (1)

Après une éclipse de plusieurs siècles, cette technique est revenue à la mode aux Etats-Unis, en Allemagne et surtout en URSS où la faible susceptibilité au gel des argiles traitées à la chaux l'a fait utiliser pour construire une grande partie des routes de Sibérie.

L'application de ce mode de traitement, dont le but essentiel est de donner aux plates-formes ainsi traitées une certaine portance permettant de réduire l'épaisseur de matériaux nobles du corps de chaussée, présente en outre l'avantage de rendre traficable les matériaux argileux plastiques à des périodes de l'année où le travail normal est impossible.

Ces techniques, qui permettent l'utilisation des sols en place, ont le grand avantage d'éviter de faire appel aux matériaux d'apport de bonnes qualités qui se raréfient. Elles évitent aussi d'avoir à rechercher des lieux de dépôts pour les matériaux que l'on doit remplacer.

(1) d'après William LAMB "Stabilisation des Sols" - article contenu dans le livre de LEONARDS "Fondations" DUNOD 1968

2 - DIFFERENTS PROCEDES DU TRAITEMENT A LA CHAUX

Trois modalités d'application de l'amélioration se sont principalement développées :

- Amélioration *in Situ* (ou en couche de forme)
- Amélioration dite en remblai
- Amélioration dite en déblai.

Dans les deux premières citées, l'amélioration se caractérise par le fait que le traitement et le compactage se déroulent au même endroit, par contre dans l'amélioration en déblai, ils ont lieu dans des endroits différents.

Dans le cas des remblais et des déblais, l'objectif du traitement à la chaux est de pouvoir utiliser des sols argileux difficiles à mettre en oeuvre dans des conditions économiques acceptables. Ceux sont donc essentiellement les effets immédiats du traitement à la chaux qui sont intéressants.

Dans le cas des couches de forme, ceux sont par contre les propriétés mécaniques élevées à long terme des mélanges sol-chaux qui constituent l'intérêt majeur du traitement.

3 - MECANISME DU TRAITEMENT

L'action de la chaux se fait essentiellement sur les minéraux argileux d'un sol, l'élément actif étant la chaux libre éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Ce mécanisme peut se décomposer en actions élémentaires dues aux réactions chimiques et aux procédés de mise en oeuvre du mélange sol + chaux.

Ces actions élémentaires sont :

- Assèchement du sol par apport de chaux
- Flocculation des éléments argileux
- Réaction pouzzolanique.

Le traitement modifie profondément le comportement des sols argileux ceci résulte de réactions complexes que l'on peut distinguer en actions immédiates et à long terme.

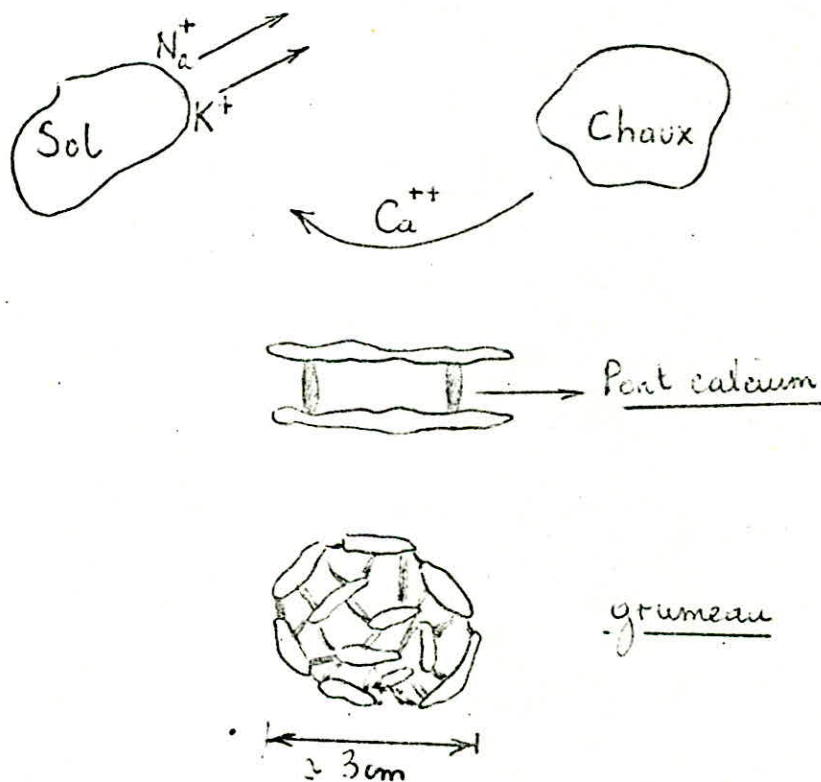
3 - 1 - Effets immédiats de la chaux

L'ajout de chaux dans un sol cohérent humide produit deux effets essentiels :

- granulation
- assèchement du sol.

3.1.1. La granulation

L'ionisation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (par dissociation dans l'eau) permet la substitution d'ions Ca^{2+} présente dans la chaux avec les ions Na^+ et K^+ de l'argile suivant le schéma



d'où l'effet de floculation des particules argileuses provoquées par les forces électriques mises en jeu lors de cet échange.

Ce phénomène confère au sol une granulation qui subsiste même après immersion dans l'eau.

La formation de grumeaux est favorisée par le séchage du sol et par les forces de cisaillement (malaxage du mélange).

Les grumeaux du sol + chaux, comparés à ceux du sol non traités, sont plus petits non collants de teinte plus claire et plus secs en apparence, le sol devient donc pulvérulent, poudreux et presque sableux et ceci a une incidence immédiate sur les propriétés géotechniques du sol.

- Amélioration instantanée du sol :
.....

Les grumeaux du mélange (sol - chaux) se comportent comme des grains individuels stables qui confèrent une amélioration mécanique du sol se traduisant par :

- . limite de plasticité est repoussée
- . indice de plasticité diminue
- . modification des courbes Proctor
- . augmentation de l'indice CBR et déplacement de la courbe des indices CBR vers les teneurs en eau les plus élevées
- . résistance plus grande au gonflement par l'eau
- . élévation de la limite de retrait
- . augmentation de la résistance à la compression
- . cohésion et module de déformation.

3.1.2. Assèchement du sol par la chaux

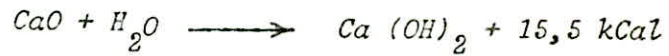
L'assèchement du sol résulte de l'ajout de chaux (éteinte ou vive) et de facteurs extérieurs.

a) L'assèchement dû à l'apport de chaux provient de trois phénomènes :

- la fixation chimique d'eau par l'hydroxyde de calcium
- augmentation du poids de matière sèche

./.

- évaporation d'une quantité d'eau par la chaleur d'hydratation de l'oxyde de calcium (cas de la chaux vive)



b) L'assèchement dû aux facteurs extérieurs résulte de l'évaporation de l'eau lors du malaxage et pendant l'exposition de la couche de sol + chaux pulvérisée à l'action du vent et du soleil.

3 - 2 - Effets à long terme

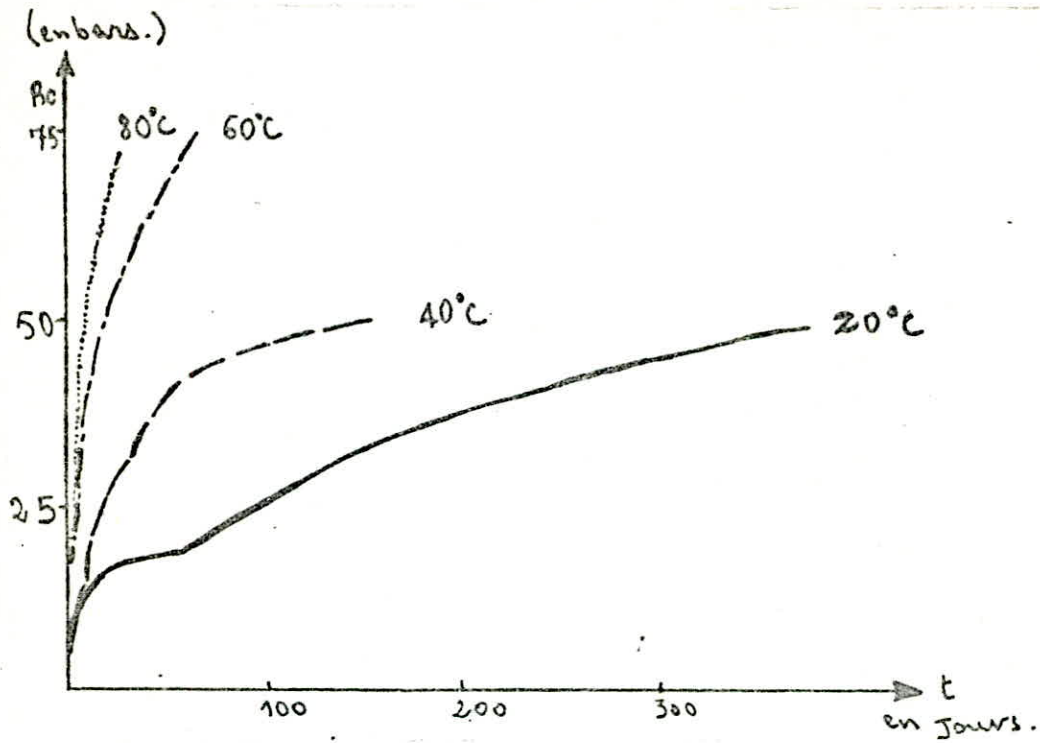
L'effet à long terme est une réaction de cimentation également appelée réaction pouzzolanique :

En présence d'eau, la chaux réagit avec certains composés silicieux et alumineux du sol formant ainsi de nouvelles espèces cristallines principalement des aluminates et des silicates de calcium hydratés qui jouent le rôle de ciment.

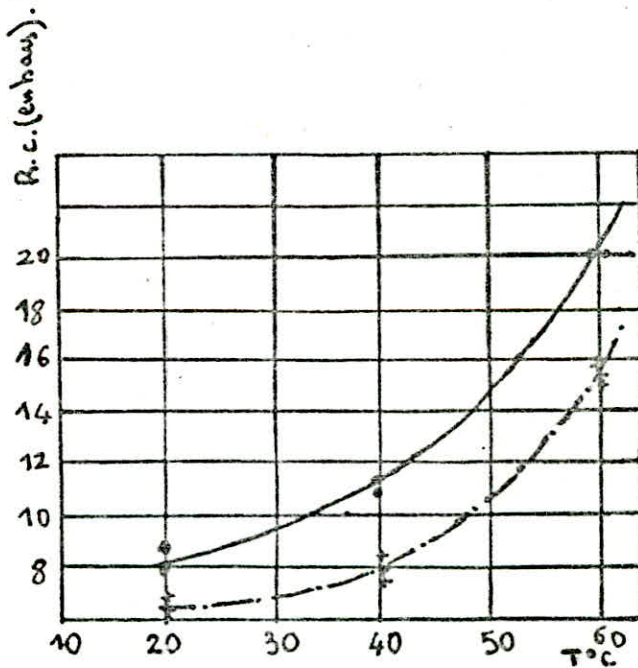
La vitesse de cette réaction dépend de la température. Elle peut être ralentie en période froide.

Les conséquences de cette action sont la formation d'un matériau (sol - chaux) dont les caractéristiques mécaniques telles que la portance, l'indice CBR, la résistance à la compression augmentent avec le temps jusqu'à atteindre des valeurs suffisantes pour le rendre insensible au sol.

4 - PRESENTATION DE RESULTATS SIGNIFICATIFS SOUS FORME DE COURBES



Variations. Des caractéristiques. mécaniques en fonction du temps. suivant la température. $R_c = f(t)$.
(P. PERRET.)



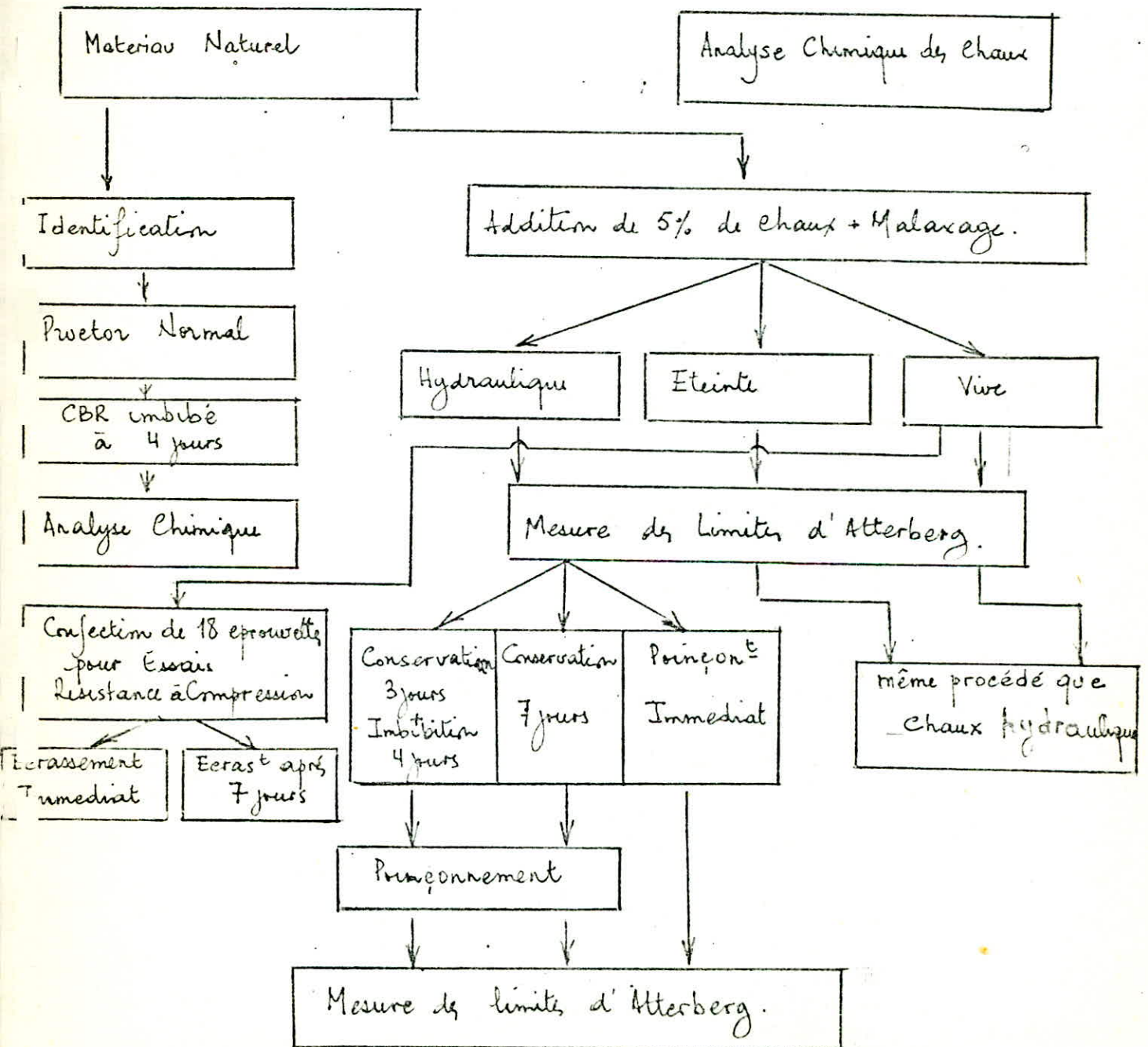
Influence des températures sur les résistances à la compression.
simple de deux échantillons Kaoliniques traités avec 5% de Eau.
(A. LE ROUX.)

5 - PRESENTATION DE TRAVAUX FAITS EN ALGERIE

Lors de l'élaboration de l'étude concernant l'Aéroport Houari Boumédiène, un des points examinés était l'éventuel traitement des sols à la chaux.

Le Ministère des Travaux Publics a saisi le L.N.T.P.B. (L.T.P.C.) pour procéder à une étude (rapport "LNTPB (B17) dossier n°22.79.3105 du 31 mars 1981) préliminaire en Laboratoire portant sur trois classes de chaux disponibles en Algérie.

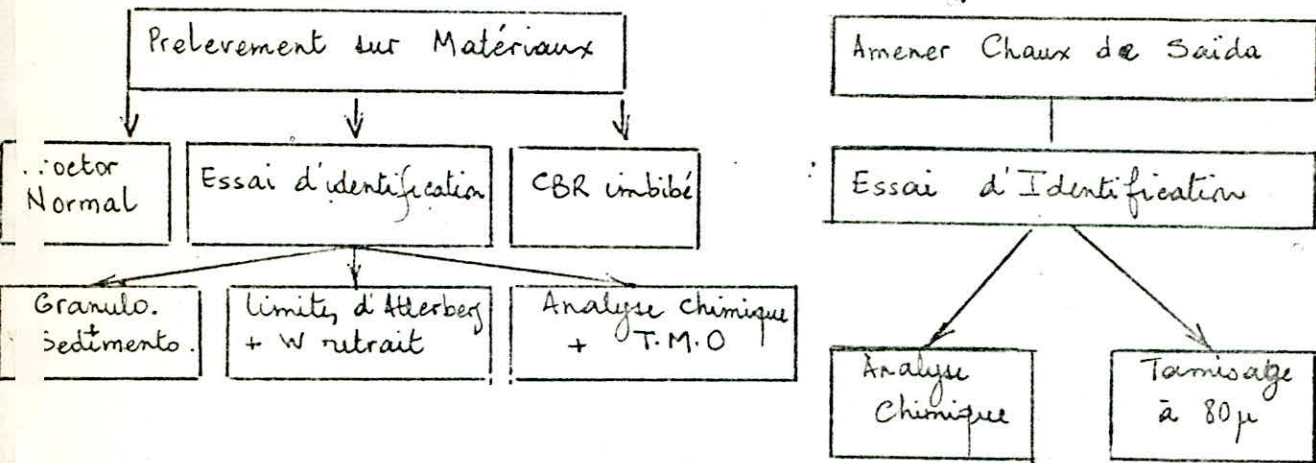
Schéma Procédure d'essai



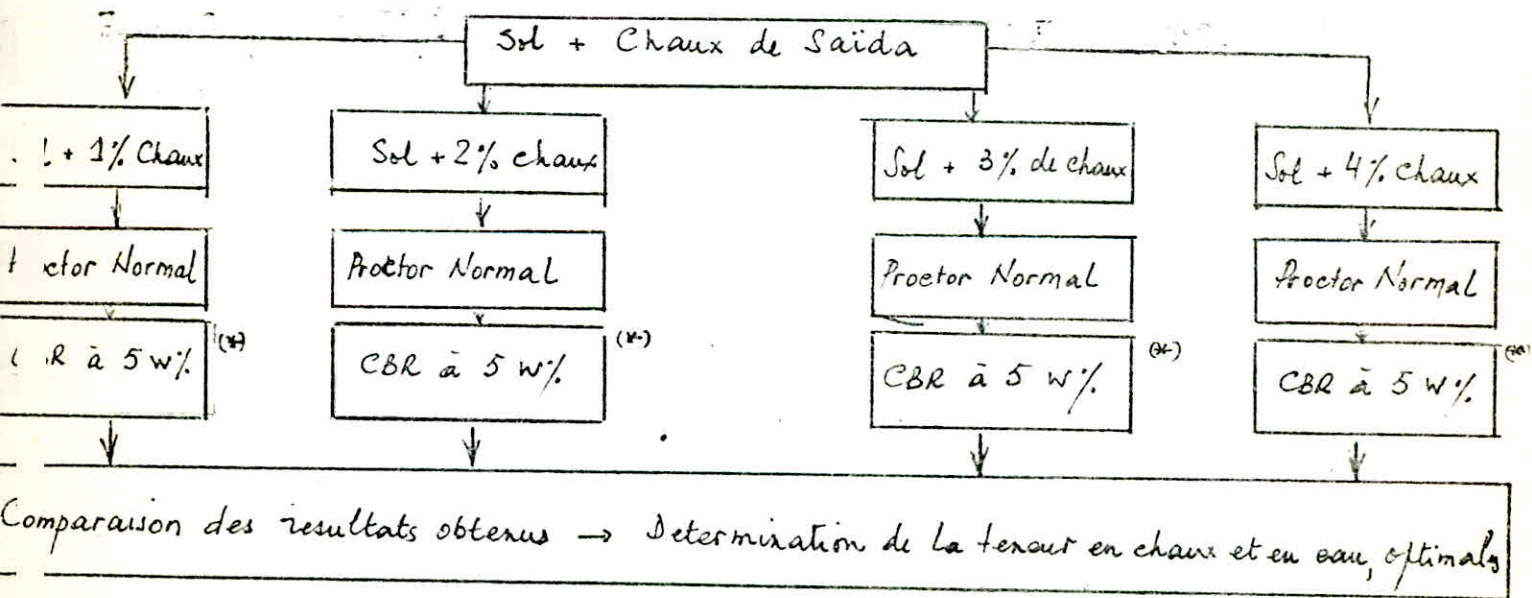
Suite au rapport (B17) préliminaire établi par le L.N.T.P.B. et dans le cadre du projet de l'Aéroport Houari Boumédiène a été établi un second rapport (rapport LNTFB (B31) dossier n° 22.79.3105 du 25 mai 1982) qui a pour objet d'exposer les résultats disponibles de l'étude complémentaire de stabilisation des sols de Dar-El-Beïda à la chaux de Saïda.

Le programme des essais a été transmis au L.N.T.P.B. par le Ministère des Travaux Publics.

PHASE I

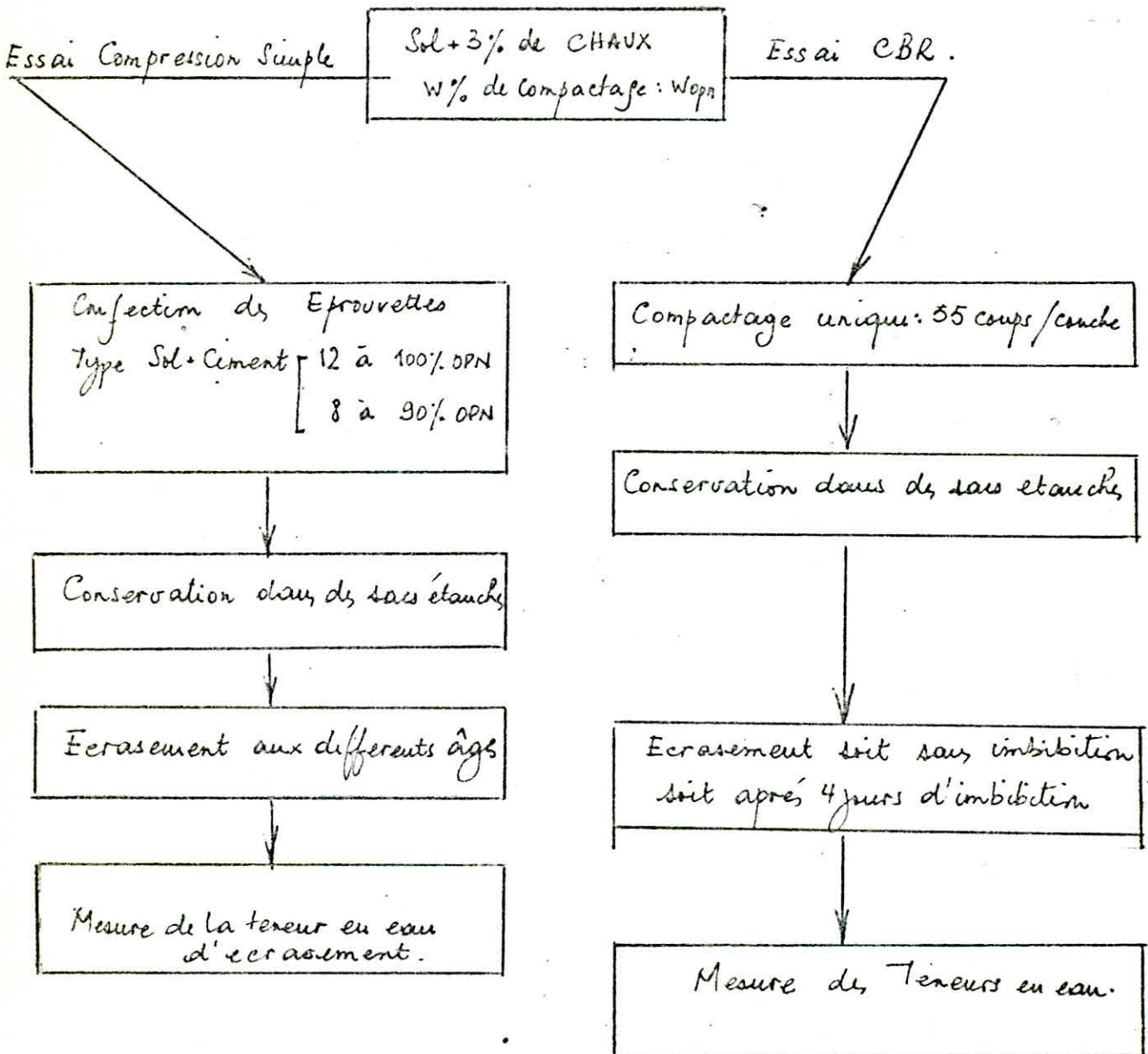


PHASE II



(*) Les essais CBR ont été exécutés à 5 teneurs en eau différentes pour chaque teneur en chaux soit à w_{opt} ; $w_{opt} \pm 2\%$; $w_{opt} \pm 4\%$.

PHASE III



Un troisième rapport (rapport LNTPB (B34) dossier n° 22.79.3105 du 19 mai 1983) contenant les derniers résultats des essais de compression simple et de poinçonnement CBR obtenus après une observation qui a duré 183 jours.

Un quatrième rapport (rapport LTFC (B37) dossier n° 22.79.3105 du 12 juin 1984) consiste à présenter les résultats des essais de laboratoire "l'influence de la chaux de Safda sur la variabilité du sol".

Un cinquième rapport (rapport LTFC (B38) dossier n° 22.79.3105 de décembre 1984) concernant le calage de l'essai accéléré consiste à doser un matériau donné avec 3 % et 4 % de chaux. Les essais effectués sont des essais de portance CBR effectués après une période de conservation de 60 jours suivis d'un étuvage de 2 jours.

ETUDE AU LABORATOIRE

I - <u>INTRODUCTION</u>	p 24
II - <u>METHODOLOGIE D'ETUDE AU LABORATOIRE</u>	
A - <u>AVANT TRAITEMENT</u>	
1 - Schéma d'étude suivie	p 25
2 - Présentation des résultats	p 26
A2 - 1 - <u>LE SOL</u>	
a) Prélèvement	p 26
a1 - Granulométrie et sédimentation avec courbes	p 26
a2 - Limites d'Atterberg	p 26
a2.1. Abaque de Casagrande	
a2.2. Activité au sens SKEMPTON	
a2.3. Indice de consistance	
a3 - Essai Proctor	p 30
b) Classification et choix de l'échantillon pour le traitement de la chaux	p 31
b1 - Classification du sol (échantillon n°1)	
b2 - Choix de l'échantillon pour le traitement à la chaux	
c) Analyse chimique du sol	p 33
d) Analyse diffractométrique du sol	p 34
d1 - Technique d'Analyse diffractométrique	
d2 - Préparation de l'échantillon	
d3 - Interprétation des spectres	
d4 - Comparaison de quelques résultats de l'analyse aux valeurs types pour les minéraux argileux détectés dans l'échantillon	
A2 - 2 - <u>LA CHAUX</u>	
a) Analyse chimique de la chaux	p 36
b) Teneur en chaux libre (Méthode de Leduc à la Saccharose)	
c) Granulométrie de la chaux	p 38
d) Conclusion	p 38

I - INTRODUCTION

La Différence existante entre les traitements d'un sol à la chaux, de par le type du sol (granularité, plasticité ...) et selon le but recherché (utilisation en remblai ou en couche de forme...) nous a amené à une étude de laboratoire au préalable.

Notre étude consistera, dans un premier temps, à la recherche d'un sol susceptible d'être traité à la chaux (selon les critères énoncés par le RTR) puis de voir l'évolution de ses propriétés mécaniques après rajout de chaux suivant des teneurs arbitrairement choisies (1, 2, 4 et 6 %).*

(*) *Recommandations sur le traitement des sols fins à la chaux (août 72)*

II - METHODOLOGIE D'ETUDE AU LABORATOIRE

A - AVANT TRAITEMENT

1°) Schéma suivi

Prélèvement de 3 échantillons
suivant les profondeurs

0,30 - 0,80 (1)

0,80 - 1,50 (2)

1,50 - 1,70 (3)



Essais sur les échantillons

- Granulométrie + Sédimentation
- Limites d'Atterberg
- Essai Proctor



Choix de l'Echantillon

N° 1



Sol

- Essais CBR
(immédiat et imbibé)
- Etude Minéralogique
(Diffraction RX)
- Teneur en matière
organique
- Analyse chimique

Chaux

- Analyse chimique
- Teneur en chaux
libre
- Granulométrie
+
Sédimentation

2°) Présentation des Résultats

A2 - 1 - Le Sol

a) Prélèvements

Les prélèvements ont été faits sur le site de l'Aéroport Houari Boumediène, après un décapage de terres végétales sur environ 30 cm de profondeur.

Les Echantillons prélevés sont à des profondeurs de :

- . 0,30 m à 0,80 m - Echantillon 1
- . 0,80 m à 1,50 m - Echantillon 2
- . 1,50 m à 1,70 m - Echantillon 3

a1 - Granulométrie et Sédimentation (*)

Afin de dresser la courbe granulométrique d'un sol, on procède à un tamisage pour les éléments supérieurs à 100 μ et une sédimentation pour les inférieurs à 100 μ

"La Sédimentométrie est basée sur la Loi de Stocker exprimant la vitesse de décantation d'une particule sphérique dans une liquide visqueux en fonction du diamètre de la particule".

$$v = \frac{\delta_s - \delta_0}{1,8 \eta} d^2 \quad \text{Unité CGS}$$

où v = vitesse de décantation (cm/s)

d = diamètre de la particule (cm)

δ_0 = poids volumique du liquide (KN/m³)

η = viscosité dynamique (Pa/s)

a2 - Limites d'Atterberg

La théorie des Limites d'Atterberg étant bien développés de plusieurs ouvrages de Mécanique des Sols (Costet & Sanglerat Tome 1 page 28 à 45), nous nous limiterons à énoncer les résultats obtenus sous forme de courbes et de tableau.

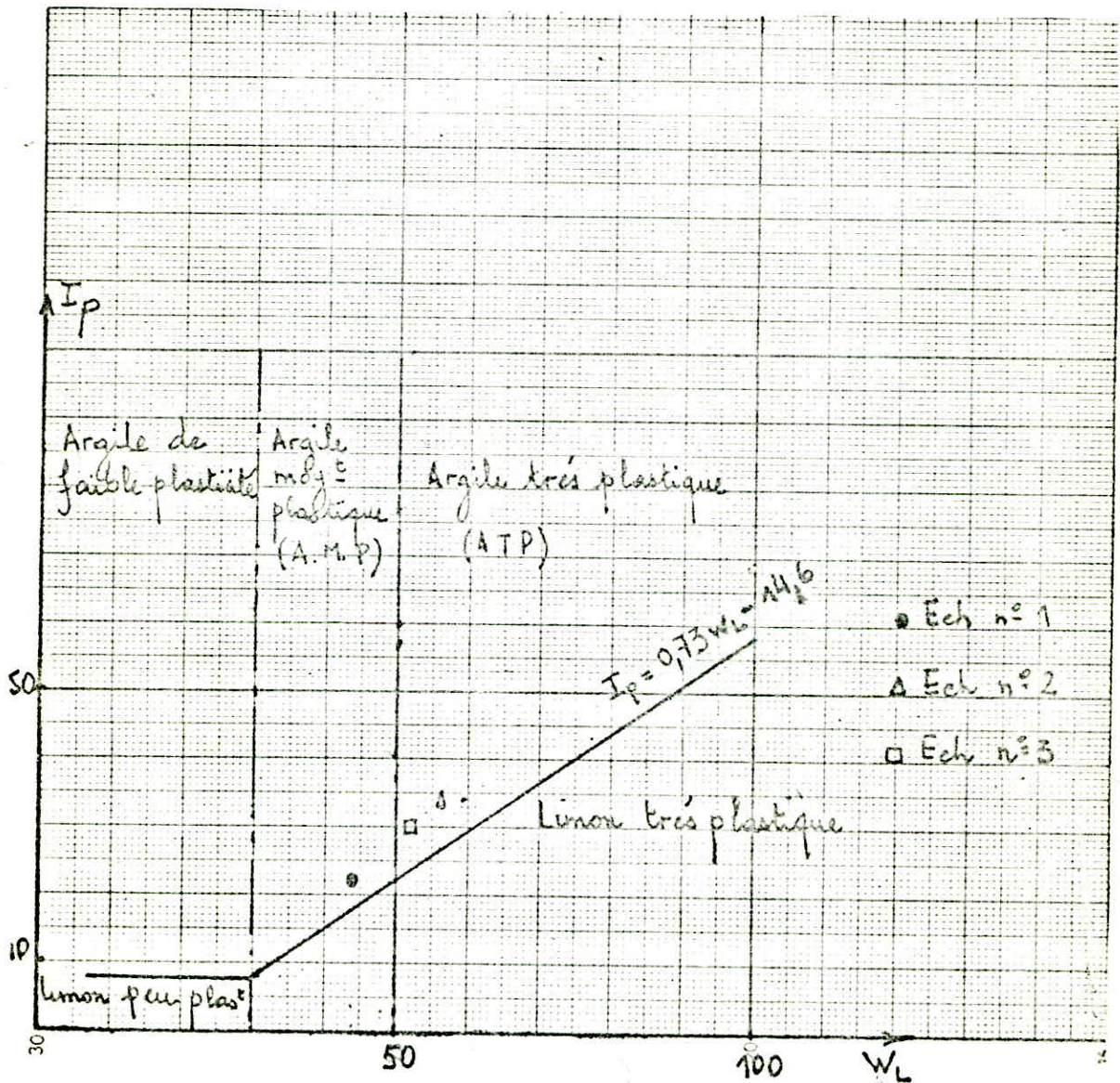
(*) Principe et mode opératoire - voir COSTET - SANGLERAT
Cours Mécanique des Sols Tome 1 pages 24 - 25.

Profondeur	WL %	W _p %	I _p %
(1) 0,30 - 0,80 m	44,0	22	22
(2) 0,80 - 1,50 m	56,0	22	34
(3) 1,50 - 1,70 m	52,0	22	30

a2.1 - Abaque de Casagrande

D'après l'Abaque de Casagrande, on classe nos échantillons :

- . Echantillon 1 : argile moyenne plastique (AMP)
- . Echantillon 2 : argile très plastique (ATP)
- . Echantillon 3 : argile très plastique (ATP)



a2.2 - Activité au sens Skempton

$$\tau_a = \text{teneur en argile} = \frac{\text{Poids sol sec } < 2 \mu}{\text{Poids total } > 0 < \text{passant } < 0,4 \text{ mm}}$$

<u>Echantillon</u>	I_p	$> 0 < \text{passant } < 0,4 \text{ mm}$	Passant $< 2 \mu$
n° 1	22	93 %	19 %
n° 2	34	95 %	25 %
n° 3	30	76 %	19 %

Nous supposons, pour notre cas, que les masses volumiques des éléments inférieurs à 2 est compris entre 0 et 0,4 mm sont les mêmes autrement dit, nous raisonnerons sur les quantités de passant en %, nous avons donc :

<u>Echantillon</u>	τ_a (%)
n° 1	20 %
n° 2	26 %
n° 3	25 %

Par définition,
L'Activité A = $\frac{I_p \text{ (%)}}{\tau_a \text{ (%)}}$

fonction linéaire de l'Indice de plasticité (voir courbe $I_p = F(\tau_a)$)

<u>Echantillon</u>	A
n° 1	1,10
n° 2	1,31
n° 3	1,20

ES-D.N.C

B.C.T.

Laboratoire - Geotechnique

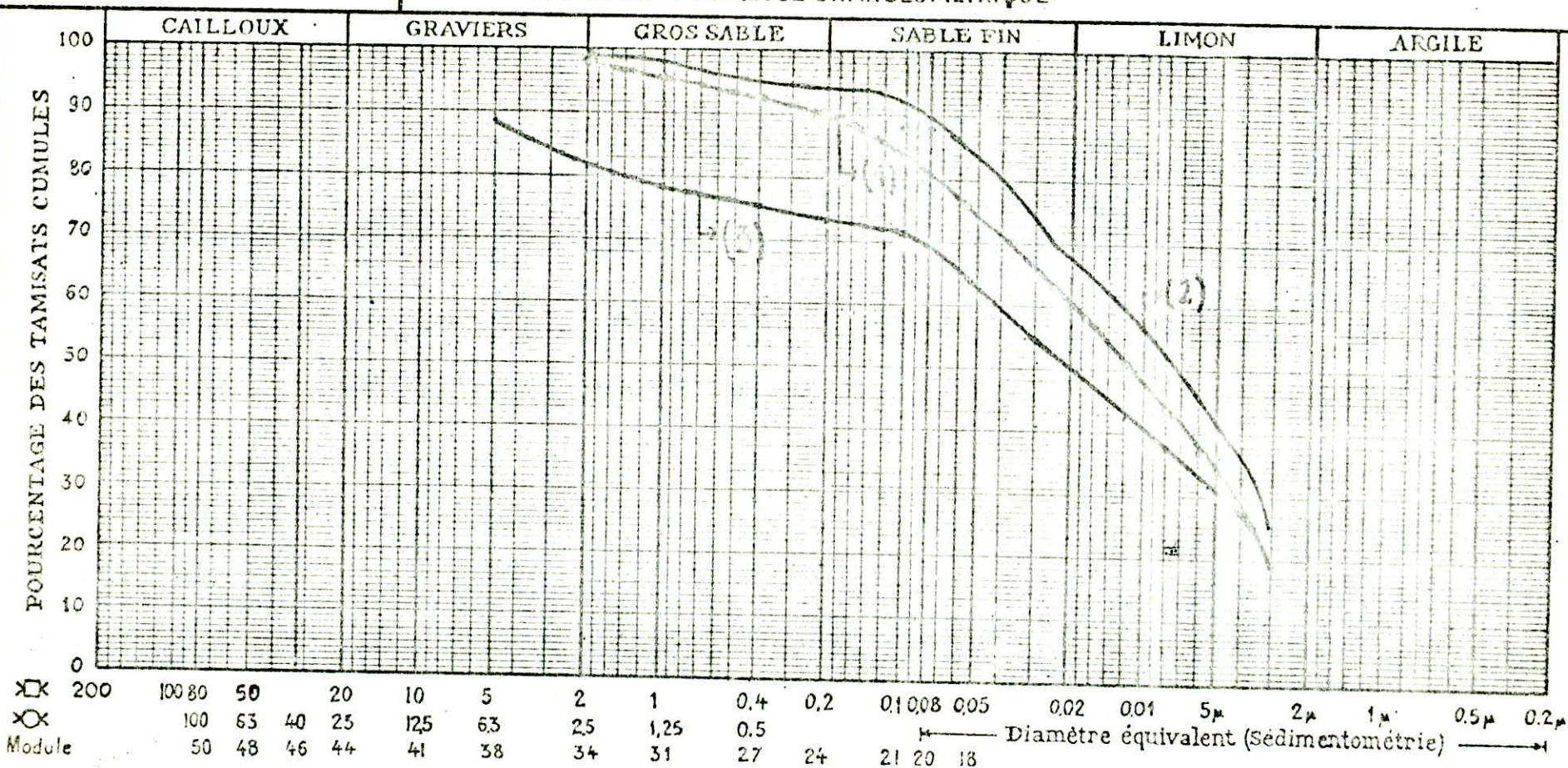
Désignation
des
échantillons

— N° 1
- - - N° 2
- - - N° 3

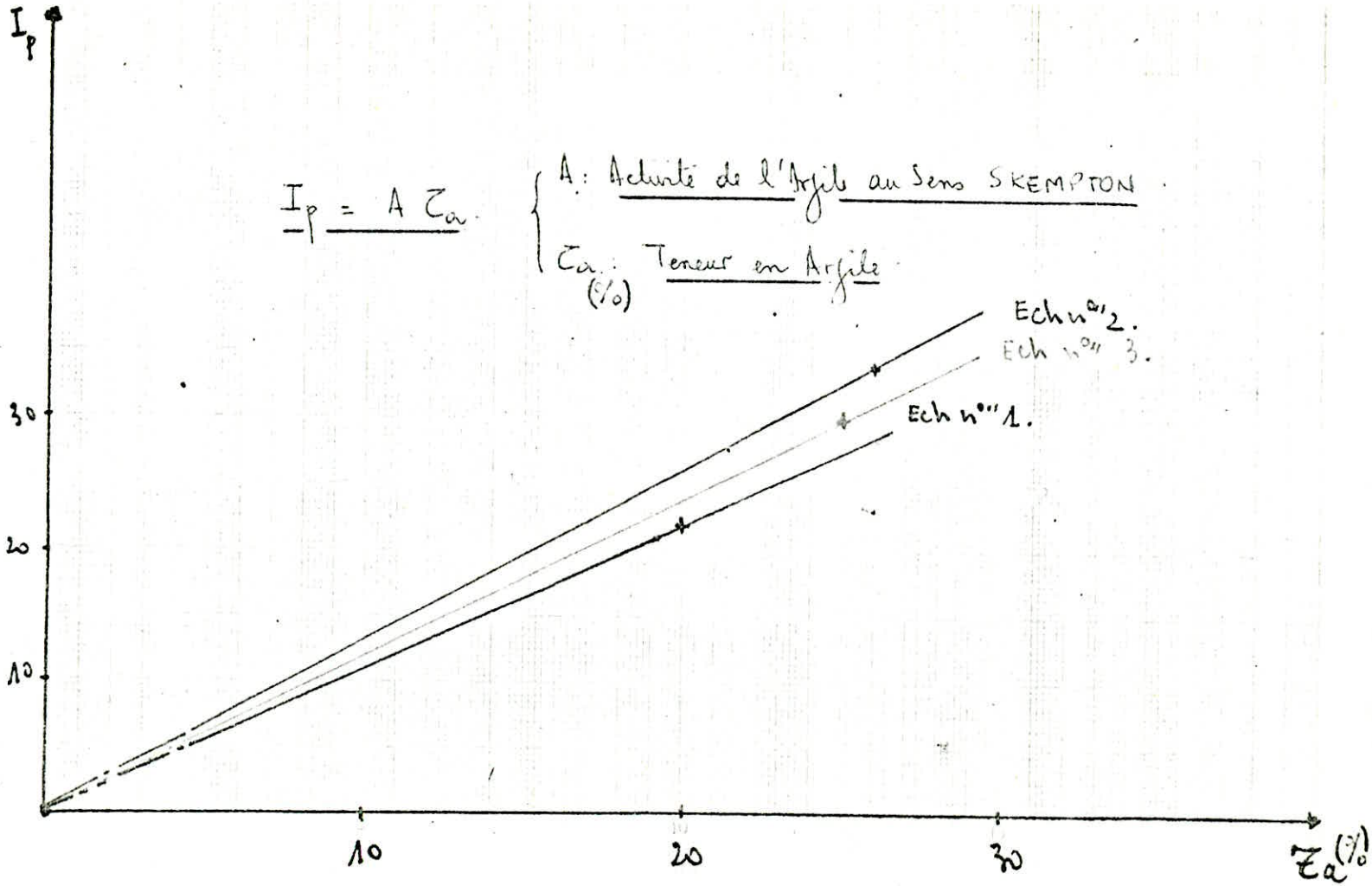
Profondeur : 0,30 à 0,80 m
Profondeur : 0,80 à 1,50 m
Profondeur : 1,50 à 1,70 m

GRAPHIQUE. N°

S.6 ET S.7 - ANALYSE GRANULOMETRIQUE



	%	S.8 LIMITES D'ATTERBERG			S.20 E.S.
		L.L.	I.P.	L.R.	
Ech. 1	81%				
Ech. 2	90%				
Ech. 3	68%				



D'après Skempton, nous avons :

Activité d'après Skempton	Qualification d'après Skempton
$A < 0,75$	Inactive
$0,75 < A < 1,25$	Normale
$A > 1,25$	Active

Echantillon	Activité	Qualification
n° 1	1,1	normale
n° 2	1,31	active
n° 3	1,2	normale

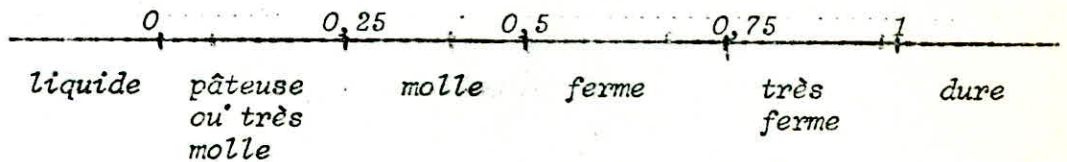
a2. 3 - Indice de Consistance

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

W : teneur en eau du sol rapportée à l'indice de plasticité

Echantillon	WL	W	I_p	I_c	
n° 1	44	21,97	22	1,0014	dure
n° 2	56	22,39	34	0,98853	très ferme
n° 3	52	22,2	30,00	0,99333	très ferme

D'après Terzaghi :



./.

a3 - Essai Proctor
 ++++++

(*) Tableau des conditions de chaque Essai Proctor

		Masse de la dame	Hauteur de chute	Nombre de coups par couche	Nombre de couches	Energie de compactage kJ/dm^3
Essai Proctor	Normal	2,490	30,5	25 (moule Proctor)	3	0,59
				55 (moule CBR)	3	0,53
	Modifié	4,54	45,7	25 (moule Proctor)	3	2,71
				55 (moule CBR)	3	2,41

(- type d'essais Proctor utilisé dans notre étude)

Remarque : les teneurs en eau choisies lors de la confection des moules CBR sont entre 12, 14, 16, 18 et 20 % (pourcentages pris par rapport au poids sec du sol, le séchage à l'étuve est à 105°C pendant 24 h).

Tableaux donnant γ_d , W % pour chaque échantillon

Tableau 1 (échantillon 0,30 m - 0,80 m)

γ_d t/m ³	1,55	1,60	1,63	1,56	
W %	14	17,29	18,79	20,77	(W compactage)

Tableau 2 (échantillon 0,80 m - 1,50 m)

γ_d t/m ³	1,43	1,48	1,52	1,45	
W %	12,75	14,29	16,4	18,39	(W compactage)

Tableau 3 (échantillon 1,50 - 1,70)

γ_d t/m ³	1,49	1,56	1,66	1,62	1,6
W %	13,71	14,39	17,09	18,59	19,93

Après étude des courbes 1, 2 et 3, on a :

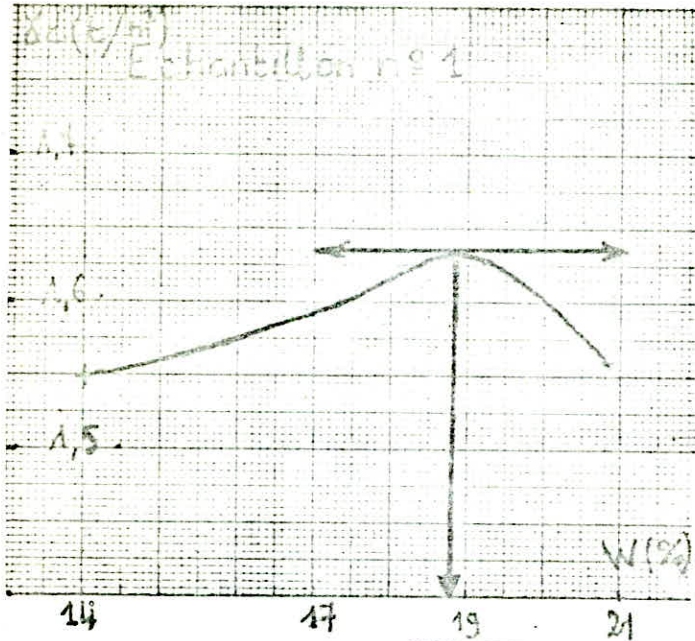
(*) d'après COSTET - SANGLERAT - Tome 1 page 9

ESSAI PROCTOR

NORMAL : S. 1

MODIFIÉ : S. 2

Teneur en eau optimum 18,8%
 Densité sèche maximum 1,63

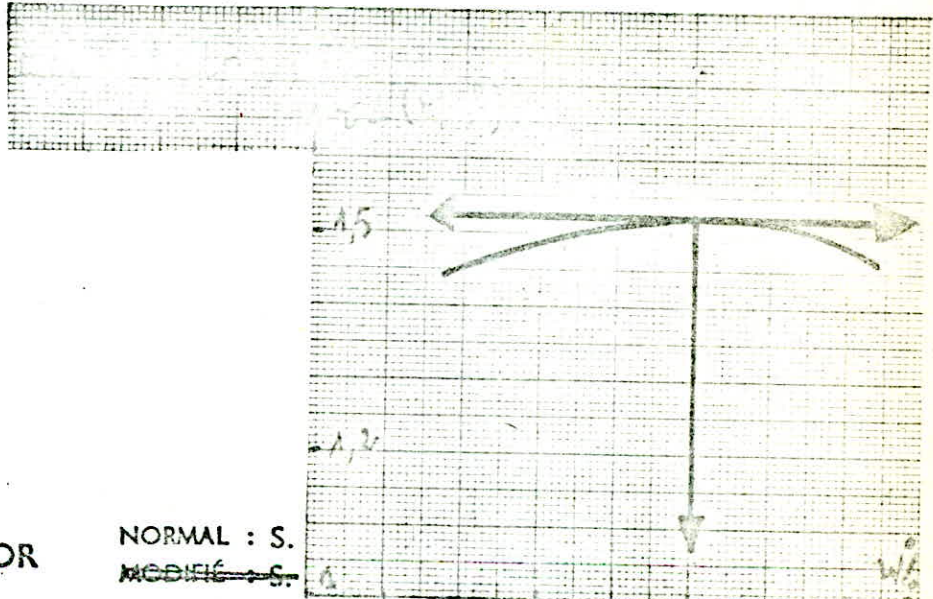


ESSAI PROCTOR

NORMAL : S. 1

MODIFIÉ : S. 2

Teneur en eau optimum 1,52%
 Densité sèche maximum 16,08



ESSAI PROCTOR

NORMAL : S.

MODIFIÉ : S.

Teneur en eau optimum 17,3%
 Densité sèche maximum 1,66

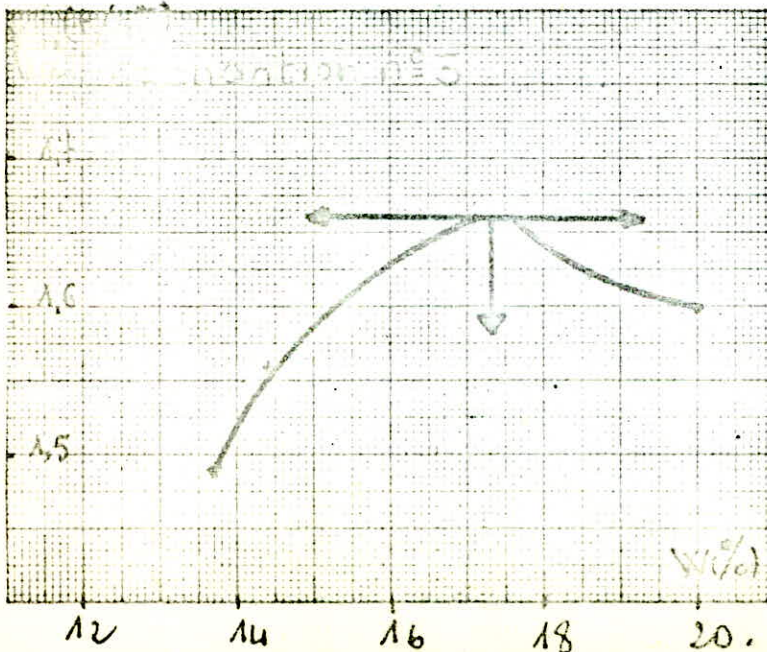


Tableau 4 : $\delta_{d\text{opn}}$ et W_{opn} pour chaque échantillon

	$\delta_{d\text{opn}}$	W_{opn}
Echantillon 1	1,63	18,8 %
Echantillon 2	1,52	16,05 %
Echantillon 3	1,66	17,3 %

b) Classification et choix de l'échantillon pour le traitement à la chaux

b1 - Classification du sol (échantillon n° 1)

D'après RTR (recommandations pour les terrassements routiers) fascicule 2 "Utilisation des sols en remblai et en couche de forme" - janvier 76

Etude de la courbe granulométrique

Diamètre des plus gros éléments : 2 mm \ll 50 mm

Tamisé à 80 μm = 81 % ($>$ 35 %)

ce qui nous donne un sol de classe A "sols fins"

Etude des propriétés physiques

$I_p = 22$ ($20 < I_p < 50$) \rightarrow sous classe A_3

Classement d'après l'état du sol :

$W = 19,52$ % (teneur en eau naturelle du sol)

$W_{\text{opn}} - 4$ % $< W < W_{\text{opn}} + 4$ % ($15 < W < 23$)

$I_c = 1,0014$ ($0,9 < I_c < 1,3$)

sol A_{3m} teneur en eau moyenne

b2 - Choix de l'échantillon pour le traitement à la chaux

Notre choix s'est porté sur l'échantillon n° 1 pour les raisons suivantes :

- profondeur suffisante (plus profond entraînerait des problèmes de drainage)
- matériau acceptable : A_{3m} (pour traitement des sols à la chaux éteinte) cf. tableau I

La suite des essais se poursuivra sur l'échantillon prélevé entre 0,30 et 0,80 m.

Tableau I - Extrait du tableau des différents types de traitement
de sols en fonction de l'objectif recherché et des
sols concernés (*)

type de traitement	sols concernés		Essais de base de l'étude de formulation	valeurs proposées
	sols bien adaptés	sols éventuellement adaptés		
Traitement à la chaux éteinte	A _{3m}	A _{4m} ; A _{2m} ; B _{6m} C _{1m} E ₃	Etude Proctor normal Indice CER Immédiat Imbibé	Indice CBR immé- diat de l'ordre de 5 à 15 Indice CBR après immersion de l'ordre de 20 à 25

(*) Bulletin de liaison LCPC "Terrassements Routiers" - tableau 1 page 125 (1983)

c - Analyse chimique du sol (1)

Référence

Echantillon

Argile

Composition

. Silice (Si O ₂)	63,00
. Oxydes totaux (R ₂ O ₃)	27,90
. Chaux (CaO)	1,82
. Magnésie (MgO)	0,23
. Chlorures (Na Cl)	0,12
. Sulfates (So ₃)	traces
. Perte au feu	7,50
Bilan pondéral	100,57

Résultats analytiques intermédiaires

Insolubles (Silice + Silicates)	77,80
Oxyde de Fer (Fe ₂ O ₃)	1,20
Oxyde d'alumine (Al ₂ O ₃)	26,70
Carbonates (Ca CO ₃)	2,61
Anhydride carbonique CO ₂	1,15
Eau de constitution (H ₂ O)	6,35
Matières organiques	6,32

Interprétation :

C'est une argile fortement siliceuse, alumineuse, carbonatée de forte teneur en matières organiques bien que cette valeur obtenue est à prendre sur toute réserve car on a procédé qu'à une seule mesure de teneur en matières organiques.

(1) résultats exprimés en % et en poids

./.

d - Analyse diffractométrique du sol

d1 - Techniques d'analyse diffractométrique

- Diffraction des rayons X (Rappel théorique)

"Lorsque la matière est soumise à un bombardement de rayons X, une partie des photons incidents peut être déviée de son trajet initial et ceci de deux façons différentes :

- lorsque les photons subissent une perte d'énergie, leur longueur d'onde λ change "effet COMPTON"

- lorsque les photons déviés ne perdent pas d'énergie, ils conservent leur longueur d'onde c'est ce phénomène qui est à la base de l'analyse diffractométrique des corps cristallins.

La réflexion des rayons X sur un cristal est soumise à la Loi de Bragg : $n\lambda = 2d \sin \theta$

λ : longueur d'onde du rayonnement en Å

d : espacement réticulaire en Å

θ : angle d'incidence

Il est possible à partir d'un spectre de rayons X de déterminer l'écart réticulaire d'un cristal et par la même, le caractériser.

d2 - Préparation de l'échantillon

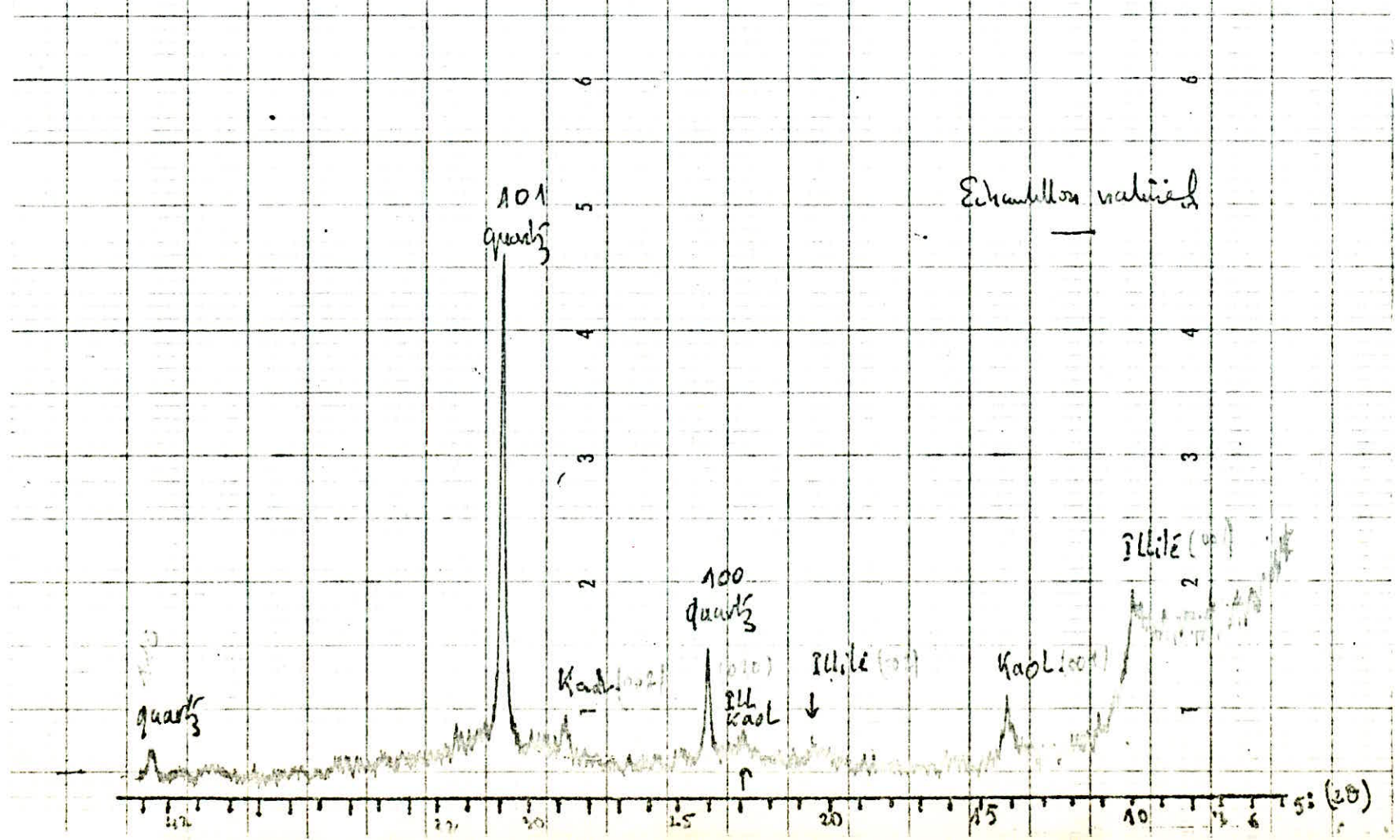
Il nous a été impossible de prélever la fraction granulométrique inférieure à 2μ . Donc, on a procédé comme suit :

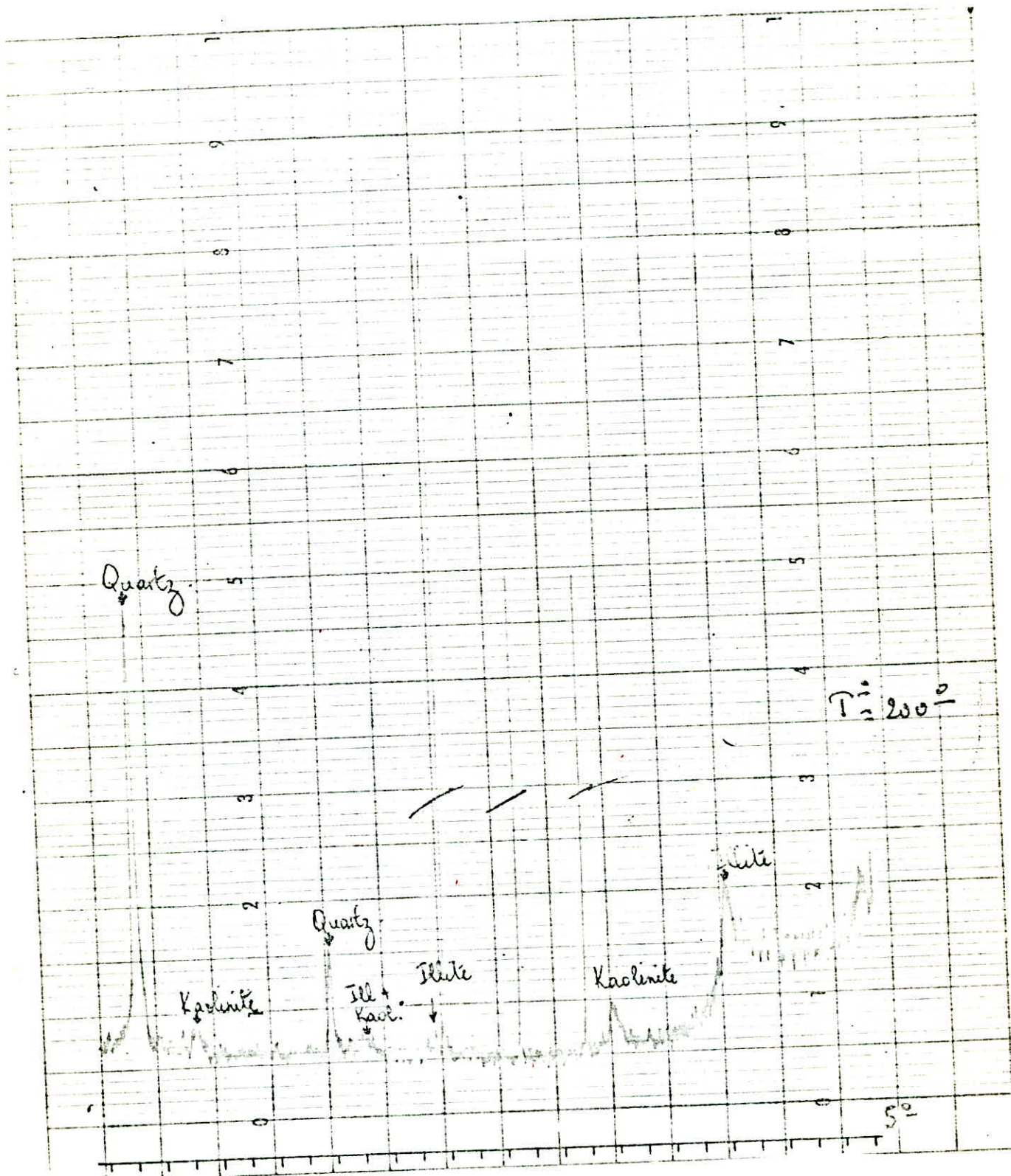
Une sédimentométrie de la fraction tamisée à 100μ pendant un temps de 20 mn nous donne la fraction à 10μ ensuite on la fait passer à l'étuve jusqu'à évaporation de toute l'eau. On recueille les fines particules sèches qui seront broyées au mortier. Nous avons obtenu de cette façon une orientation acceptable de particules.

d3 - Interprétation des spectres

Les réflexions aux environs de $10,2 \text{ \AA}$ et $5,03 \text{ \AA}$ sont caractéristiques de l'illite, $7,34 \text{ \AA}$ et $3,57 \text{ \AA}$ sont caractéristiques de la kaolinite.

rayt: small 2-98
 Reg. Kv, mA: 35 kv, 10 mA
 Ion. entr.: 12
 Sort.: 1/8"
 H. T. compt.: 1135 v.
 Imp. min: 1.104
 Er. Stat.: 2%
 Discrim: -
 Elaton: vacuul
 Vit. gonis.: 1/4" uen
 pap.: 1/8 cm/min
 gas à pos.: -
 Temps complage: -
 Nbre impul.: -
 Atten: 7





La réflexion à 3,83 Å correspond à une superposition de la Kaolinite et l'Illite et enfin les réflexions à 4,3 Å, 3,35 Å, 2,44 Å sont caractéristiques du Quartz.

<u>Quartz</u>			<u>Illite</u>			<u>Kaolinite</u>		
H K L	d (Å)	I	H K L	d (Å)	I	H K L	d(Å)	I
1 0 1	4,26	35	0 0 1	10	10	0 0 1	7,15	10
1 0 1	3,343	100	0 0 2	4,9	2	0 2 0	4,45	4
1 1 0	2,458	12	0 2 0	4,45	9	0 0 2	3,56	10

Le spectre obtenu à 200 °C est identique à celui obtenu à température normale ceci nous renseigne bien sur l'absence de structure gonflante (Montmorillonite) dans l'argile analysée.

d4 - Comparaison de quelques résultats de l'analyse aux valeurs types pour les minéraux argileux détectés dans l'échantillon

Minéral	oxydes %		
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	H ₂ O
Kaolinite	35 à 40	45	14
Illite	25 à 30	50	7
mélange analysé Kaolinite + Illite + quartz	26,7	63 (dont quartz)	6,35

- Les données pour Kaolinite et Illite sont prises dans "Minéralogie des argiles" - Caillère - Henon
- Il semble donc que la fraction analysée comporte beaucoup plus d'argile de type micas (Illite) que de Kaolinite. Ces minéraux sont souvent peu cristallins et donnent une réflexion basale peu intense à 10 Å ce qui explique qu'on ne peut passer de l'intensité diffractée mesurée à une évaluation, même approchée de leur proportion dans ce mélange.

a) Analyse chimique de la chaux

La teneur en CaO est la principale caractéristique d'une chaux (partie active de la chaux) : % CaO = 76 % (chaux libre)

Les spécifications du SETRA - LCPC (recommandations pour le traitement des sols à la chaux) relatives à la chaux donnent comme critère chimique : % CaO > 50 %.

La présence de carbonates (chaux combinée) nous paraît anormale ceci peut être expliqué soit :

- parce que le calcaire d'origine n'a pas été complètement dissocié et qu'il reste des incuits
- par recarbonisation de la chaux au contact de l'air.

Connaître la teneur en MgO est importante :

% MgO = 0,58 (MgO < 2 %) c'est une chaux calcitique (1).

L'absence de silice dans la chaux nous renseigne sur la pureté de la roche mère.

b) Mesure de la teneur en chaux libre : par la méthode de Leduc à la secharose

Mode opératoire :

10 g de sucre dans 100 cm³ d'eau distillée agiter, ajouter 1 g de chaux puis agiter pendant 15 mn. On dose en présence de phénolphthaleine

% CaO = 74,9 %

(2) On a dans une seconde opération augmenter (doubler) la quantité de sucre et le temps d'agitation.

On obtient 75 % comme teneur en chaux libre.

Les deux concentrations obtenues ne diffèrent pas aussi bien entre elles qu'avec la teneur obtenue par analyse chimique (% CaO = 76 %).

(1) A. LEROUX : "traitement des sols argileux par la chaux" (Bulletin liaison LCPC - octobre 1969)

(2) d'après Pierre PERRET "Thèse de Doctorat d'Etat sur la stabilisation des sols à la chaux"

Analyse chimique complète (1)

Référence
Echantillon

Chaux éteinte

Composition

. Silice (SiO_2)	-
. Oxydes totaux ($\text{R}_2 \text{O}_3$)	1,75
. Chaux (CaO)	76,02
. Magnésie (MgO)	0,58
. Chlorures (Na Cl)	0,41
. Sulfates (SO_3)	traces
. Ferte au feu	: 21,41
Bilan pondéral	100,17

Résultats analytiques intermédiaires

. Insolubles (Silice + Silicates)	0,65
. Oxyde de fer ($\text{Fe}_2 \text{O}_3$)	-
. Oxyde d'alumine ($\text{Al}_2 \text{O}_3$)	-
. Carbonates (Ca CO_3)	17,39
. Anhydride carbonique (CO_2)	7,65
. Eau de constitution (H_2O)	13,75
. Chaux libre	75 %

(1) résultats exprimés en % et en poids

./.

c) Granulométrie de la chaux

Le critère granulométrique ($< 80\mu$ doit être supérieur à 90 %) d'après les spécifications du SETRA - LCPC, étant vérifié pour la chaux éteinte utilisée (cf Courbe Granulométrique de la chaux).

d) Conclusion

La chaux éteinte utilisée vérifie les critères chimiques et granulométriques pour la stabilisation des sols à la chaux (SETRA - LCPC).

./.

L. T. P. C.

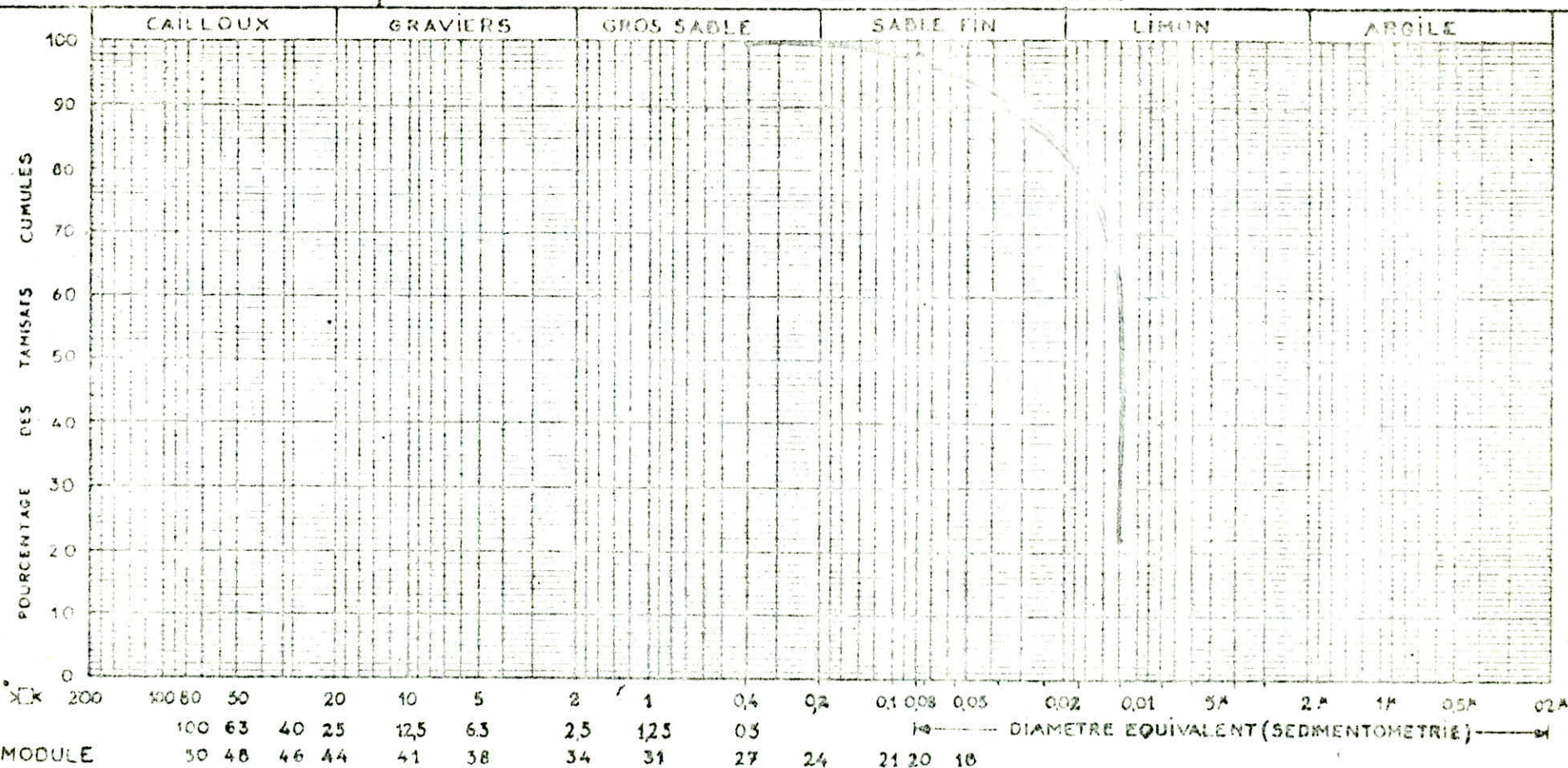
HUSSEIN-DEY - ALGER

DÉSIGNATION
DES
ÉCHANTILLONS

N° _____
N° _____ CHAUX. DE SAÏDA
N° _____

DOSSIER

S.6 et S.7 ANALYSE GRANULOMETRIQUE



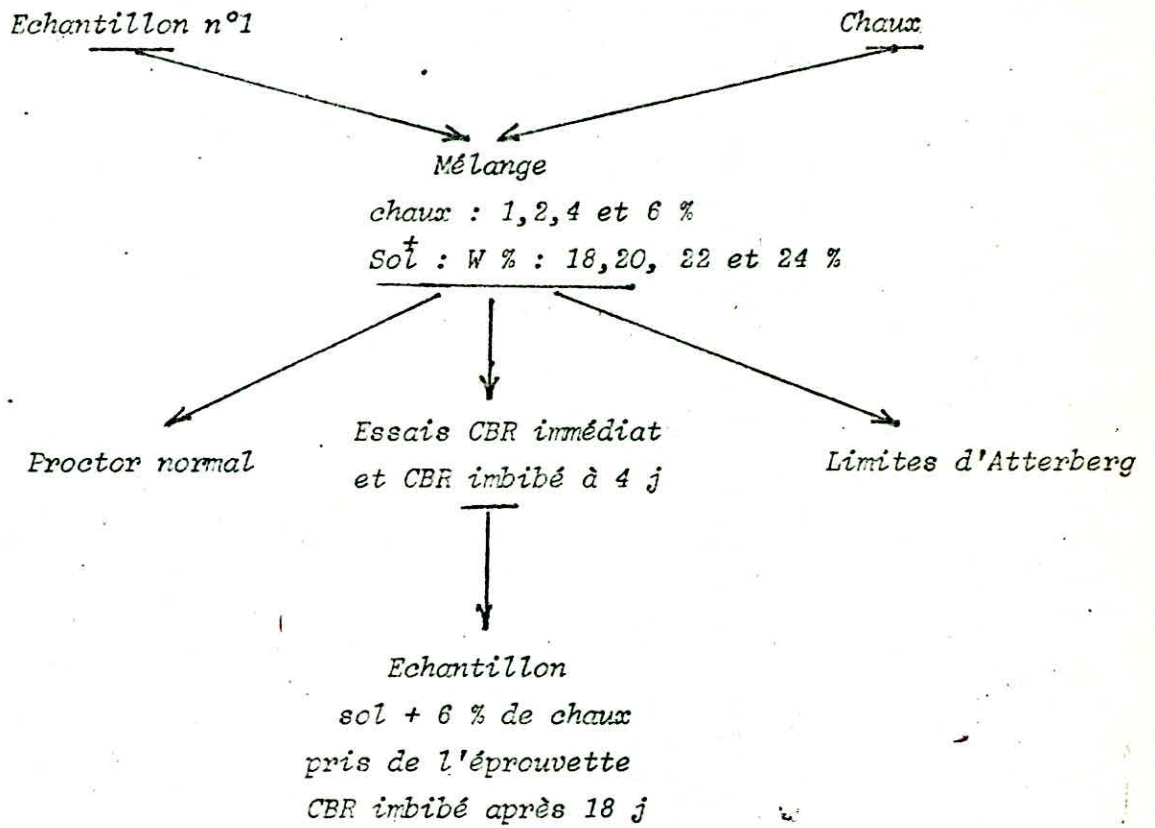
	%	S.6 LIMITES D'ATTERBERG			S.20 E.5
		W.L.	W.P.	W.R.	
Ech.	< 80%				
Ech.	98%				
Ech.					

B - APRES TRAITEMENT

- 1 - Schéma d'étude suivie p40
- 2 - Mode opératoire du mélange sol + chaux p41
- 3 - Essai Proctor p41
- 4 - Incidences du traitement sur les propriétés physiques du sol p42
 - a) Limites d'Atterberg
 - a1 - $L_p = f(c\%)$
 - a2 - $L_l = f(c\%)$
 - a3 - $I_p = f(c\%)$
 - b) Choix d'une formule de nature expérimentale : $L_p = f(c\%)$
 - c) Indice de consistance en fonction des teneurs en chaux
 - d) Abaque de Casagrande
 - d1 - Analyse de la variation d'état de l'argile traitée en fonction des différentes teneurs en chaux
- 5 - Essai CBR p47
 - a) Définition
 - b) CBR immédiat : $f(W\%)$
 - c) CBR imbibé : $f(W\%)$
 - d) CBR imbibé : $f(c\%)$ pour les teneurs en eau données
 - e) CBR immédiat : $f(c\%)$
 - f) CBR imbibé : $f(c\%)$
 - g) CBR immédiat : $f(c\%)$ pour les teneurs en eau de compactage
 - h) CBR imbibé : $f(W\%$ de poinçonnement)
 - i) W données : $f(c\%)$ pour CBR immédiat fixés
 - j) W données : $f(c\%)$ pour CBR imbibé fixés
- 6 - Variations en teneurs en eau p52
 - a) W compactage : $f(W$ données) poinçonnement immédiat
 - b) W compactage : $f(W$ données) poinçonnement après immersion 4j
 - c) W poinçonnement : $f(W$ compactage) après 4 j d'imbibition
- 7 - Mesure de gonflement p54
- 8 - Incidence du traitement sur la structure cristalline du sol p56
- 9 - Conclusion p57
 - a) remarques sur les essais
 - b) conclusions

B - APRES TRAITEMENT

1 - Schéma d'Etude



Mélange : l'échantillon n° 1 ayant

$\gamma_{cpn} = 1,63 \text{ t/m}^3$

$W_{opn} = 18,8 \%$

les teneurs en eau retenues pour le mélange sont dans la fourchette

$W_{opn} - 1 \% < W < W_{opn} + 5 \%$

2 - Mode opératoire du mélange (sol - chaux)

Le matériau seul (sans chaux) est mis à l'étuve à une température de 55 °C (cette température étant choisie à partir du pourcentage "élevé" des matières organiques contenues dans le sol).

Le matériau est ensuite tamisé à 5 mm puis mis à teneurs en eau, fixée à 18 %, 20 %, 22 % et 24 % (1), est conservée dans des sacs étanches pendant au moins 48 heures afin d'avoir une imbibition du sol.

Pour une teneur en chaux (1), fixée le mélange sol - chaux, se fait à diverses teneurs en eau dans un malaxeur (à lame coupante) pendant une durée de 2 mn environ et est ensuite conservé dans des sacs étanches pendant deux heures (pour permettre la réaction de la chaux avec le sol).

Remarque : nous avons tenu à énoncer notre mode opératoire faute de spécification à ce sujet sur les ouvrages consultés.

3 - Essai Proctor

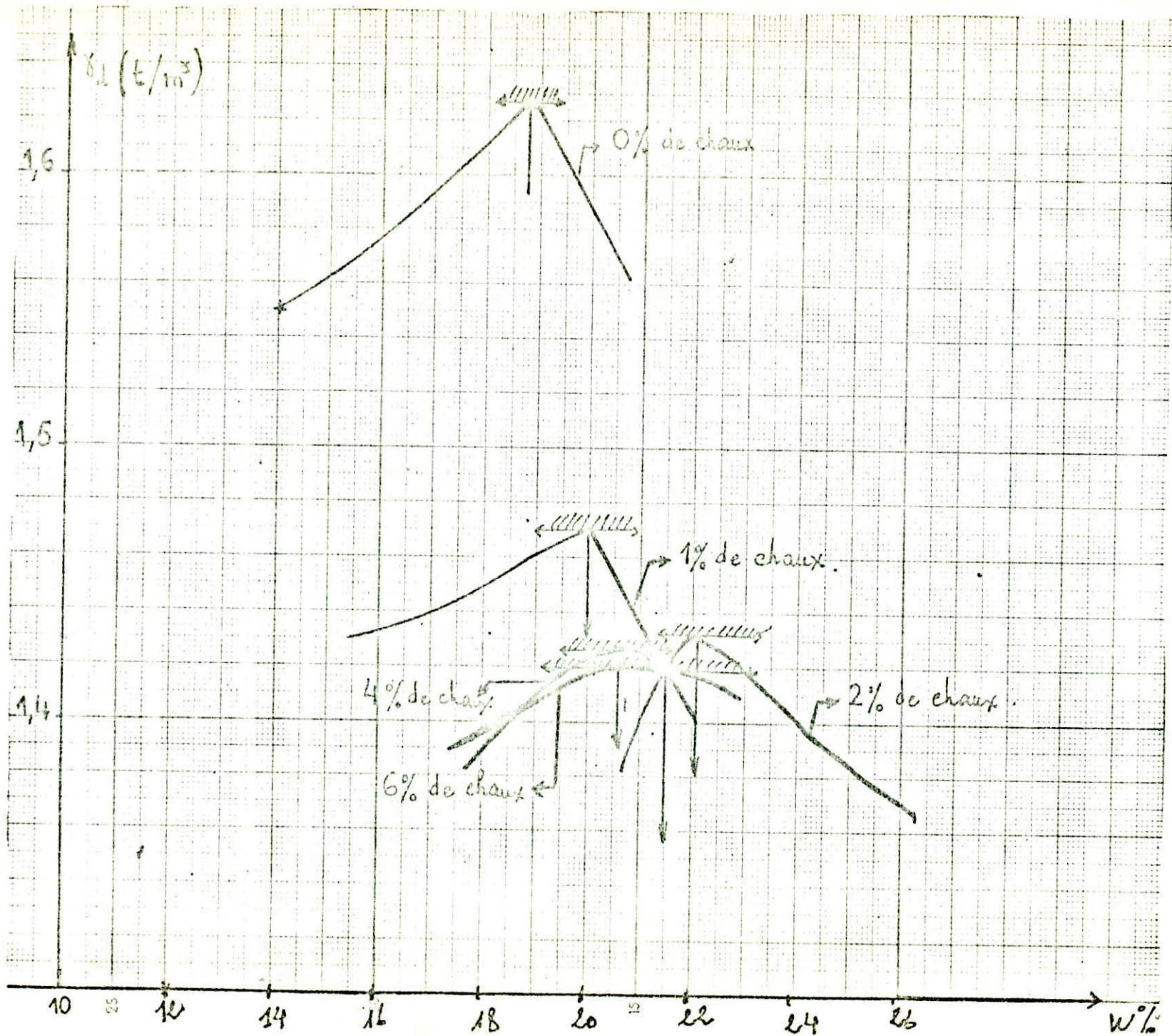
- Courbe Proctor pour chaque teneur en chaux

	0 %	1 %	2 %	4 %	6 %
(%)					
W _{opn}	18,8	20	22,1	20,5	21,5
(t/m ³)					
γ _{d.opn}	1,63	1,47	1,43	1,43	1,42

La modification de la courbe Proctor, qui devient plus plate autour de l'optimum Proctor lui-même déplacé vers des humidités plus grandes, ce qui donne une plus grande latitude de mise en oeuvre.

D'après COSTET et SANGLERAT : "Lorsque la courbe est aplatie, le compactage est peu influencé par la teneur en eau, les matériaux de ce genre constituent les meilleurs remblais".

(1) Pourcentages pris à partir du poids sec du sol.



4 - Incidences du traitement sur les propriétés physiques du sol

a) Limites d'Atterberg

- a.1. Variations des limites de plasticité en fonction des teneurs en chaux. $I_p f(c\%)$
- a.2. Variations des limites de liquidité en fonction des teneurs en chaux. $Il f(c\%)$
- a.3. Variations des indices de plasticité en fonction des teneurs en chaux. $I_p f(c\%)$

Tableau 1

c% chaux	0 %	1 %	2 %	4 %	6 %
Wl (%)	44	51	42	47	59
Wp (%)	22	29	32	34	46
I_p (%)	22	22	11	13	13

Remarque :

- pour les limites de plasticité, on constate que I_p augmente quand la teneur en chaux augmente
- pour l'indice de plasticité : I_p diminue quand la teneur en chaux augmente. Il passe de 22 (à 0 %) à 13 (à 2 %, 4 % et 6 % de chaux)
- pour les limites de liquidité : variation irrégulière de la limite de liquidité n'ayant aucune influence sur la diminution du I_p .

Commentaire :

Les variations des limites d'Atterberg sont des modifications immédiates dûes, à notre avis, aux réactions provoquées par l'apport d'ions Ca^{++} et OH^- (effet de floculation des particules argileuses provoquées par les forces électriques mises en jeu par cet échange) ceci a pour incidence une augmentation de la limite de plasticité ce qui entraîne une diminution de l'indice de plasticité.

./.

b) Choix d'une formule de nature expérimentale par la méthode des moindres carrés pour modéliser l'évolution de W_p en fonction de la teneur en chaux

L'action de choisir les formules susceptibles de décrire certaines données expérimentales est d'autant plus intéressante qu'elle renferme plus de notions théoriques.

Proposons nous de trouver une formule qui corrèle le mieux possible les valeurs des limites de plasticité W_p d'un sol traité en fonction du pourcentage de chaux ajouté.

Les limites de plasticité trouvées en fonction du pourcentage de chaux sont précisées dans le tableau 1.

Si nous choisissons comme méthode de corrélation de ces paramètres, la méthode des moindres carrés, le problème consisterait donc à trouver une fonction $F(c)$, c étant le pourcentage de chaux telle que l'erreur commise S dans un nombre d'expériences " p " soit la plus petit possible.

L'erreur commise S est de la forme :

$$S = \sum_{n=1}^p (W_p - F(c))^2$$

Un programme, mis au point sur la calculateur HP 41 C, permet de corréler les données expérimentales (x_i, y_i) d'un nombre d'expériences i ($i = 1, 2, \dots, n$) à l'une des courbes suivantes :

- 1 - Droite (régression linéaire) : $y = ax + b$
- 2 - Exponentielle : $y = a e^{bx}$ ($a > 0$)
- 3 - Logarithmique : $y = a + b \ln x$
- 4 - fonction puissance : $y = ax^b$ ($a > 0$).

A chaque ajustement avec l'une des courbes ci-dessus, un coefficient de corrélation est déterminé qui nous donne une précision sur la corrélation effectuée : plus il se rapproche de 1 plus l'ajustement est bon.

./.

Le tableau 2 donne les résultats respectifs des différentes corrélations effectuées :

type de courbes	coefficient de corrélation R	paramètre a	paramètre b
Droite $y = ax + b$	0,89	3,17	24,95
Exponentielle $y = a e^{bx}$	0,91	26,27	0,09
Logarithmique $y = a + b \ln x$	0,75	27,33	8,19
Puissance $y = ax^b$	0,80	27,92	0,22

Les corrélations présentant les meilleurs résultats sont les courbes droite (régression linéaire) et exponentielle.

Bien que cette dernière a un coefficient de corrélation légèrement supérieur à celui de la régression linéaire, pour plus de commodité nous prendrons comme courbe d'ajustement des résultats expérimentaux :

$$W_p = 3,17 C + 24,95$$

c) Variations de $I_c = f(c\%)$

c %	W L	W	Ip	Ic
0 %	44	21,97	22	1,00136
1 %	51	21,97	22	1,32
2 %	43	21,97	11	1,912
4 %	47	21,97	13	1,9254
6 %	59	21,97	13	2,85

Les valeurs de W : nous avons pris comme valeur de W la teneur en eau du sol non traité à sa limite de plasticité (soit une valeur constante). Nous avons pu ainsi calculer les I_c des sols traités par différents pourcentages de chaux et voir comment variaient ces mêmes I_c avec le traitement.

Observation :

La mesure des I_c n'est pas prise ici dans son sens habituel, elle est simplement utilisée pour mettre en évidence les modifications apportées par l'addition de chaux aux matériaux argileux.

Les I_c , comme il était prévisible avec les teneurs en chaux : dans notre cas, ils sont tous supérieurs à 1, ils rendent bien compte de la modification subie par le sol.

./.

d) Abaque de Casagrande

d.1. Analysde de la variation d'état de l'argile traitée en fonction des différentes teneurs en chaux

Une fois traitées, une modification d'état est constatée :

0 % de chaux			1 % de chaux			2 % de chaux			4 % de chaux		
W_L	I_p	état	W_L	I_p	état	W_L	I_p	état	W_L	I_p	état
44	22	AMP	51	22	LTP	45	11	LMP	47	13	LMP

6 % de chaux :

W_L	I_p	état
59	13	LTP

Observation :

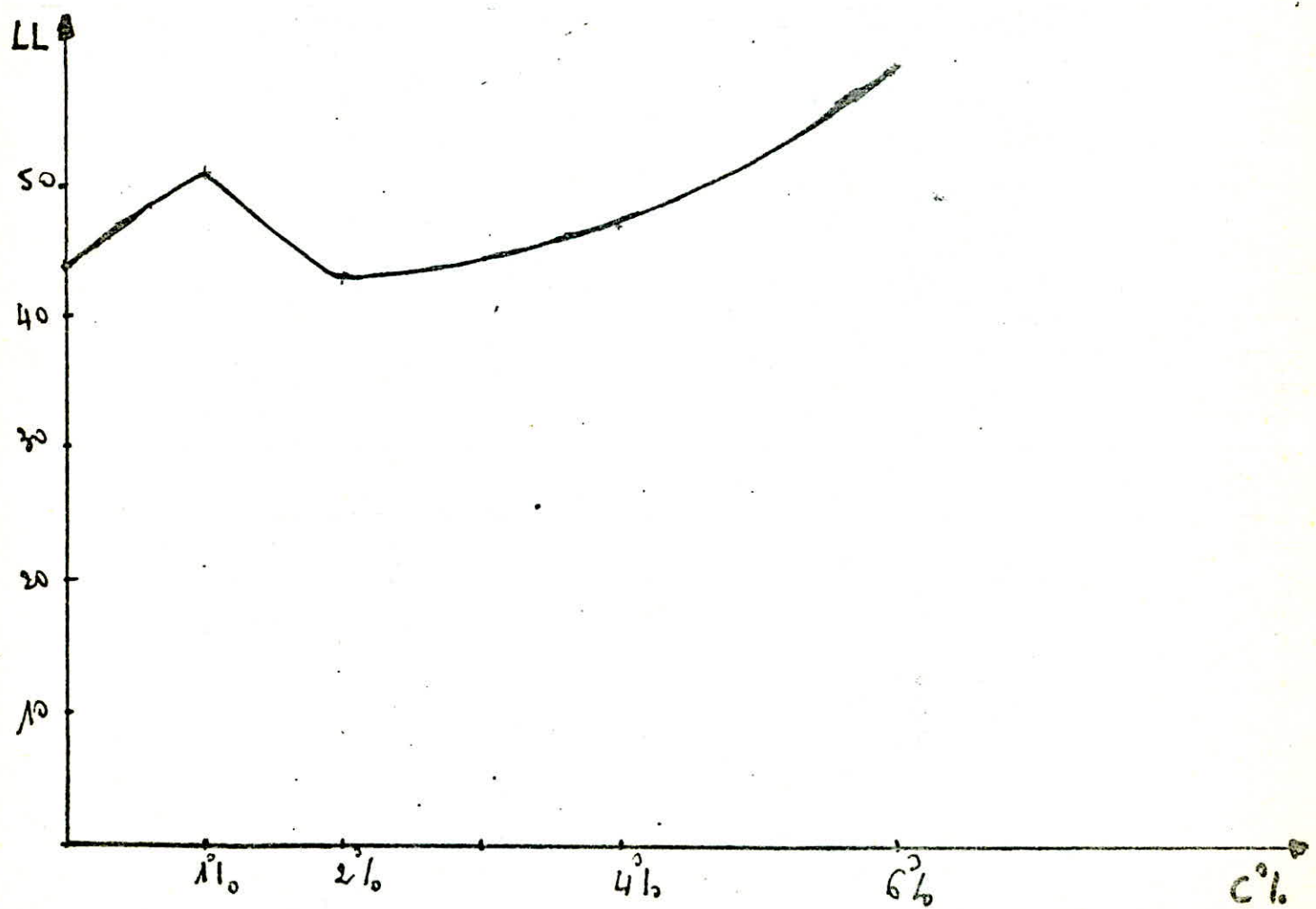
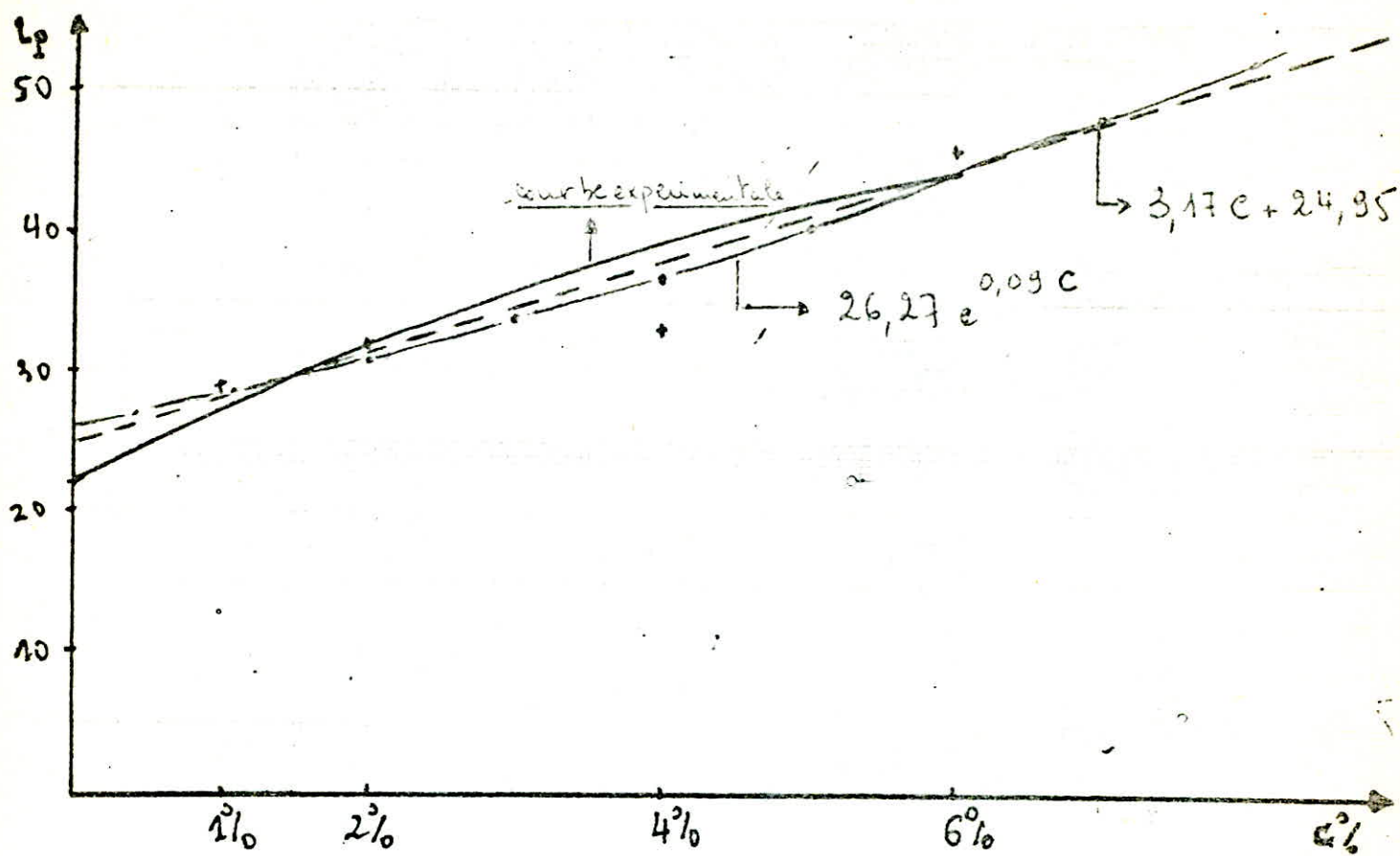
On constate un changement progressif à 0 % ou a (A.M.P.) (argile moyennement plastique) , à 1 % c'est des (L.T.F.) qui tend vers (L.M.P.) (limon moyennement plastique) à 2 % et 4 % on a carrément des L.M.P. (limon moyennement plastique) tandis qu'à 6 % on constate qu'il devient (L.T.P. (limon très plastique)

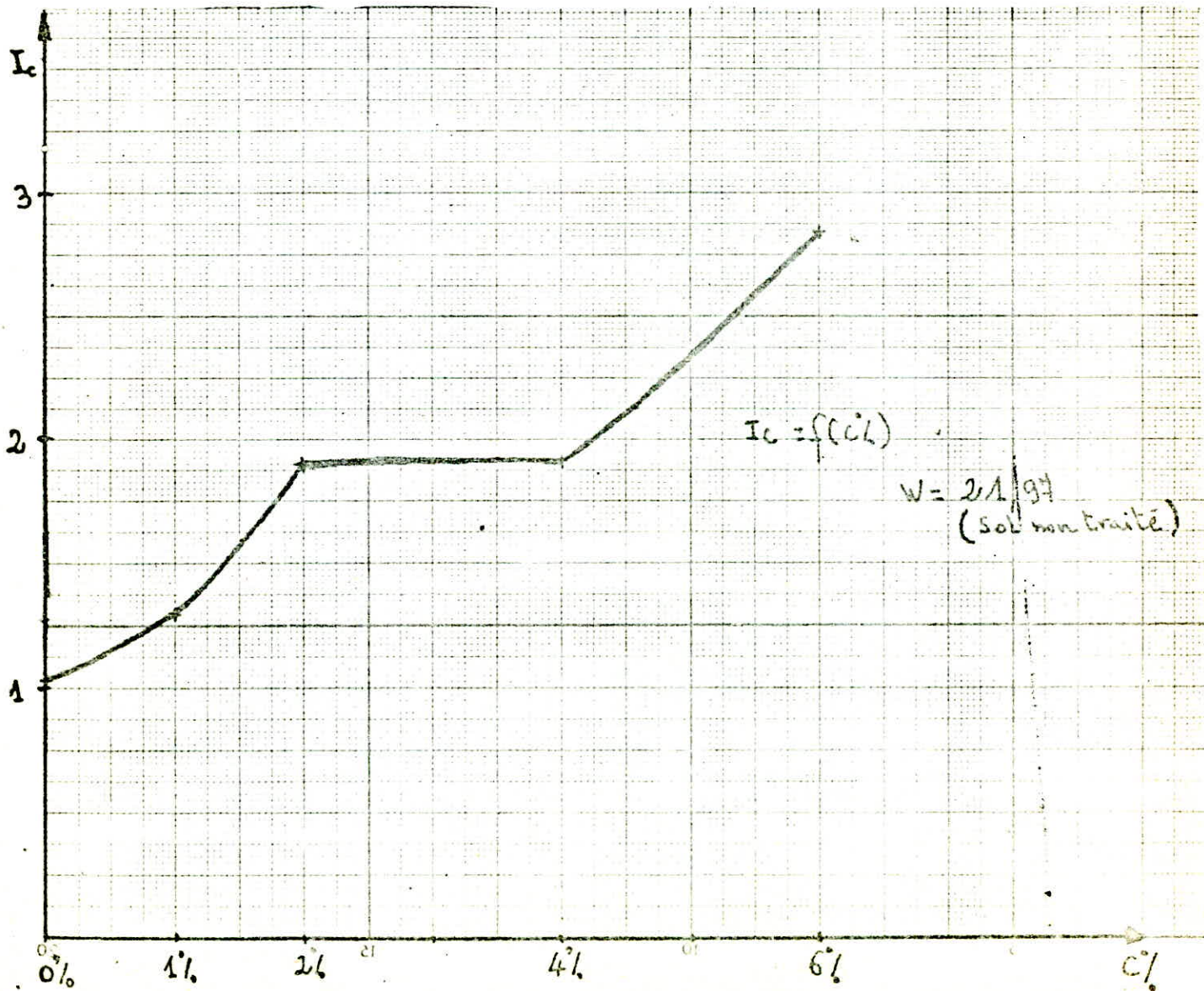
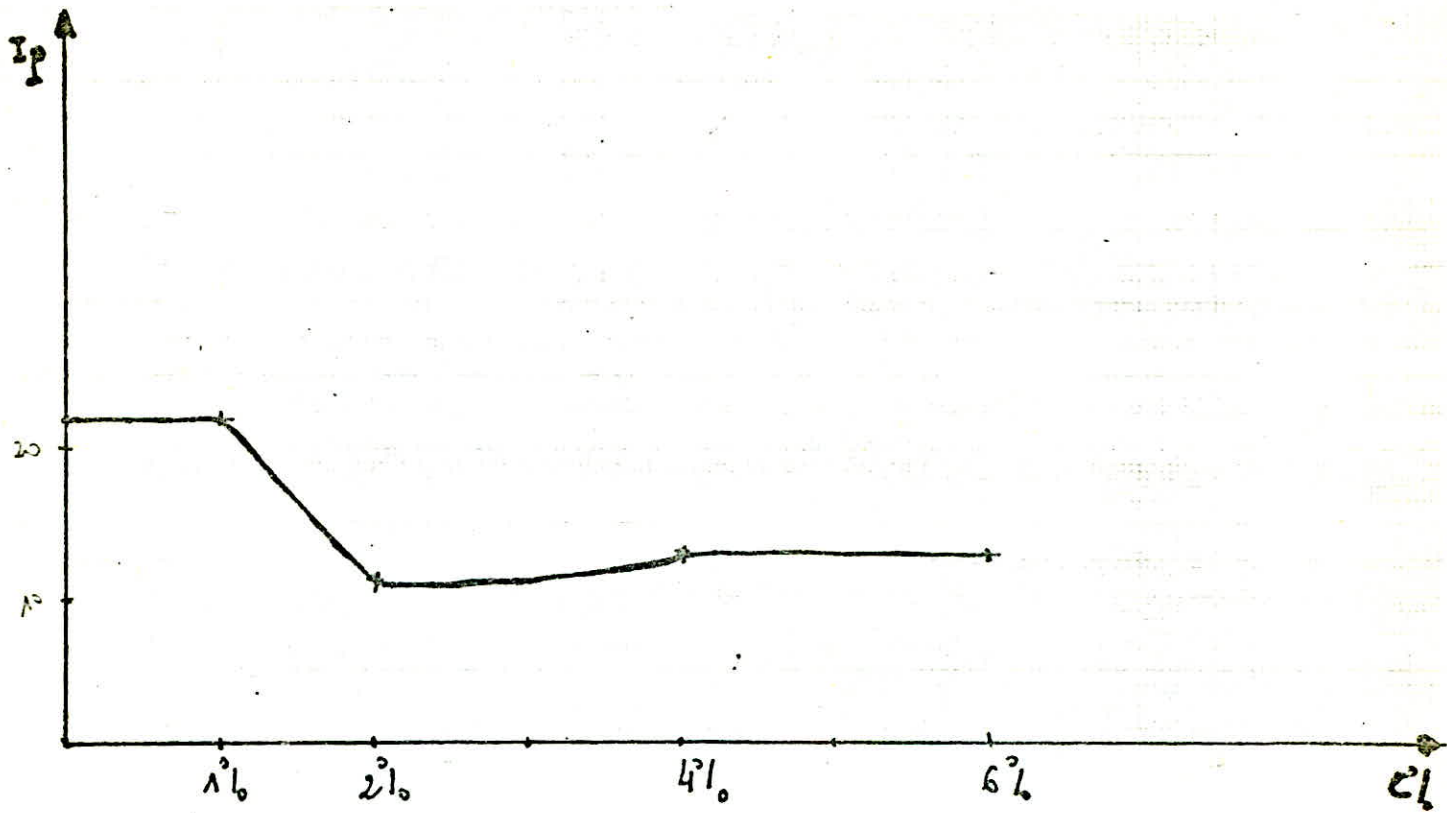
Observations sur les graphes :

En reportant les domaines de plasticité pour chaque teneur en chaux, on remarque des diminutions de ces domaines au fur et à mesure que les teneurs en chaux augmentent c'est-à-dire que le sol tend à être sableux (domaine de plasticité réduit).

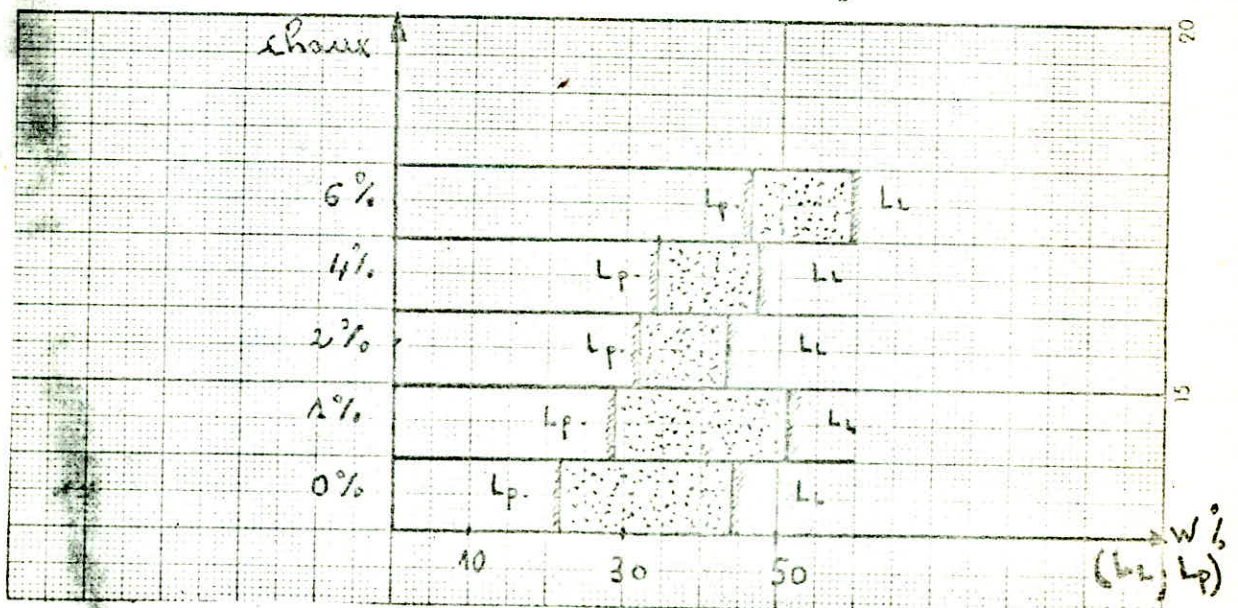
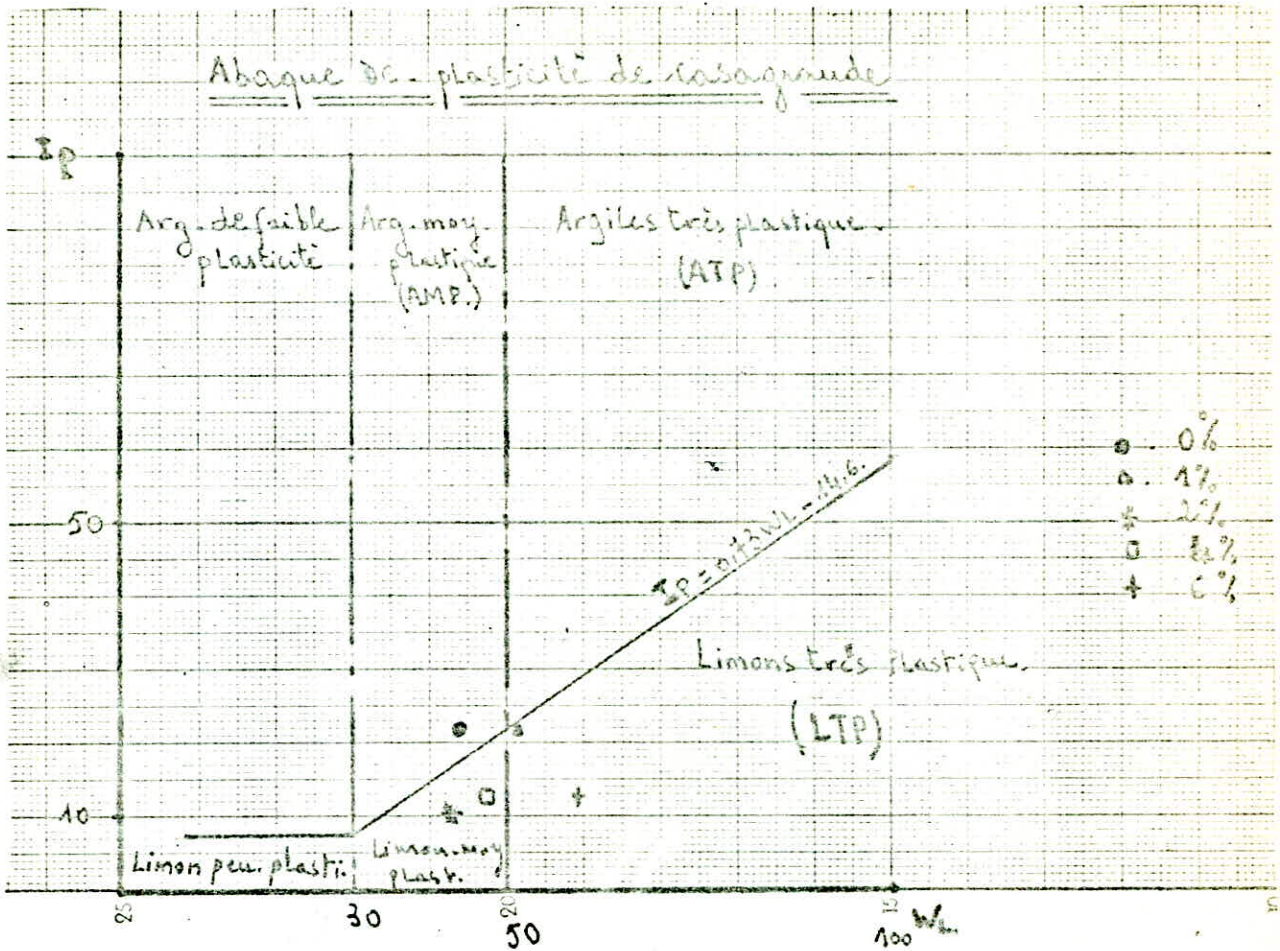
On remarque aussi que les limites de plasticité sont repoussées vers des humidités élevées.

./.





Abaque de plasticité de Casagrande



a) Définition

L'indice CBR (indice de portance) est un nombre sans dimension exprimant en pourcentage le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau étudié et dans un matériau type d'autre part.

L'essai étant effectué avec un appareillage normalisé et dans des conditions bien déterminées.

Cette notion d'indice portant est purement empirique. Elle permet d'évaluer les épaisseurs des couches des terrains qui doivent constituer la fondation d'une chaussée en fonction de la charge maximum par roue.

Au cours de notre étude, deux séries d'essai CBR ont été confectionnés à diverses teneurs en eau.

- Le CBR immédiat :

Quatre moules CBR pour chaque teneur en chaux compactée à l'énergie Proctor normale et poinçonnées immédiatement (essai préconisé par le RTR SETRA LCPC pour le traitement en remblai)

- Le CBR imbibé :

Quatre moules CBR pour chaque teneur en chaux à même énergie de compactage (Proctor normal). Immergés pendant 4 jours dans un bassin. Chaque éprouvette étant chargée à l'aide d'anneau de 4 kg 500 (Essai préconisé pour le traitement en couche de forme).

Tableau 1 - CBR (poissonnement immédiat) en fonction des teneurs en eau
W % : teneurs en eau de compactage

0 % chaux	W %	14 %	17,29	18,79	20,77
	CBR	23,42	13,43	11,14	4,86
1 % chaux	W %	16,26	17,48	19,47	20,94
	CBR	22,6	20	18,85	17,94
2 % chaux	W %	20,80	21,32	24,75	26,3
	CBR	18,8	17,4	11,4	8,85
4 % chaux	W %	16,9	19,2	23,8	24,7
	CBR	18,8	15,1	13,95	13,9
6 % chaux	W %	17,3	19,35	21,6	22,8
	CBR	19,9	18,2	17,4	17,2

Observation :

Après simple rajout de chaux, on remarque une évolution bien que très nette du CBR.

Tableau 2 - CBR (après immersion à 4 j) en fonction des teneurs en eau

0 % chaux	W %	17,15	19,05	21,37	22,2
	CBR	1,02	1,7	1,39	1,55
1 % chaux	W %	15,54	18,08	19,98	21,24
	CBR	5,33	5,9	9,3	8,86
2 % chaux	W %	19,68	22,09	22,88	26,01
	CBR	20	25,7	26,4	25
4 % chaux	W %	17,82	18,6	21,5	22,1
	CBR	17,4	25	32,6	33,5
6 % chaux	W %	18,2	18,87	19,95	22,87
	CBR	10,6	14,4	29,4	30,2

Observation :

Les valeurs obtenues dans ce tableau sont très significatives : on remarque le limon naturel est très sensible à l'eau ce qui fait chuter ces CBR énormément après ajout de chaux. On constate une amélioration très nette du CBR.

Interprétation des graphes :

b) CBR immédiat : f (W %)

L'allure des courbes nous renseigne sur la sensibilité du CBR immédiat à la teneur en eau (en effet plus il y a de chaux et plus la sensibilité diminue).

(1) Pour les remblais, les performances exigées au sol - chaux sont généralement exprimées par un indice CBR immédiat compris entre 5 et 15 (performance atteinte et parfois dépassée pour toutes les teneurs en chaux).

c) CBR imbibé : f (W %)

On remarque avec netteté l'évolution et l'amélioration très sensible de la portance du sol par simple ajout de chaux.

Le CBR = 25 (1) est largement dépassée pour 3 des 4 teneurs en chaux choisies ; une légère prédominance pour la teneur de 4 % qui nous donne l'optimum des CBR au voisinage de la teneur en eau à l'OPN (sol + 4 % de chaux).

Le CBR = 25 (1) après 4 jours d'immersion est souvent considéré comme un minimum pour les couches de forme traitées à la chaux.

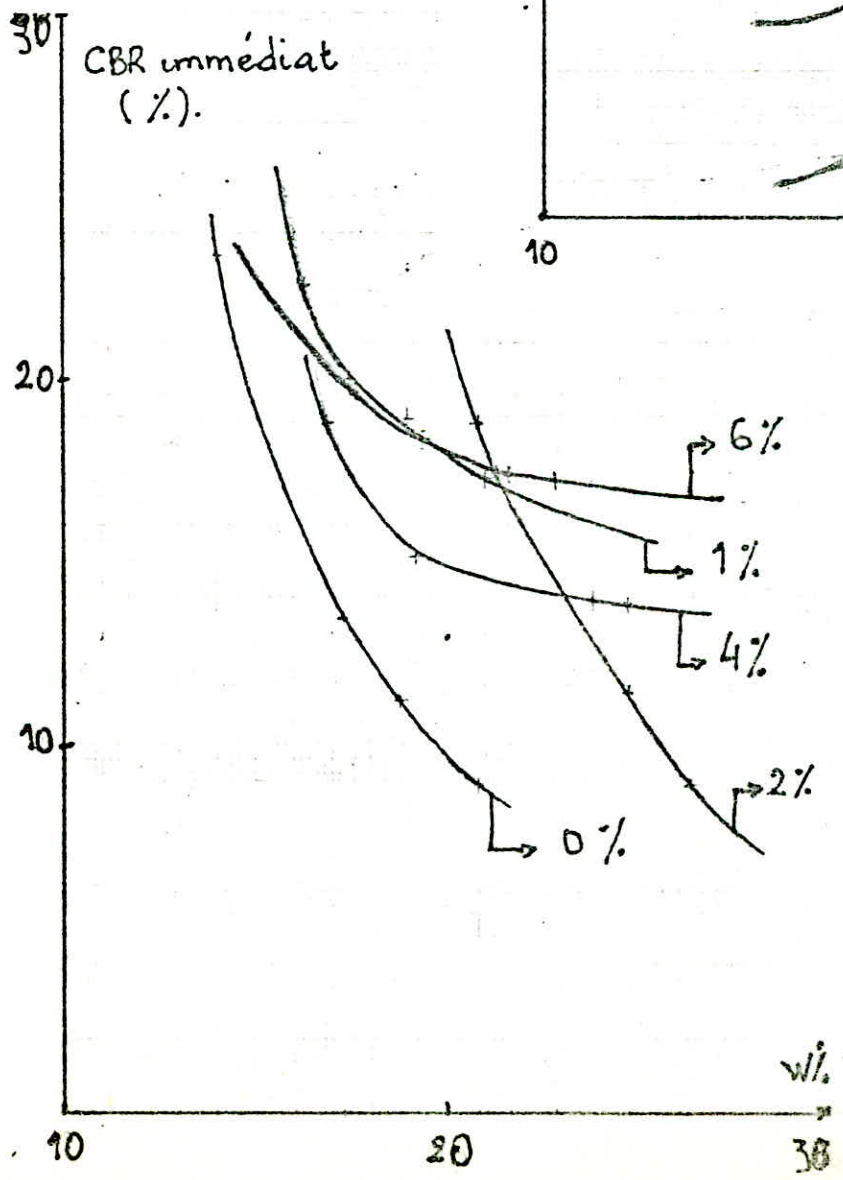
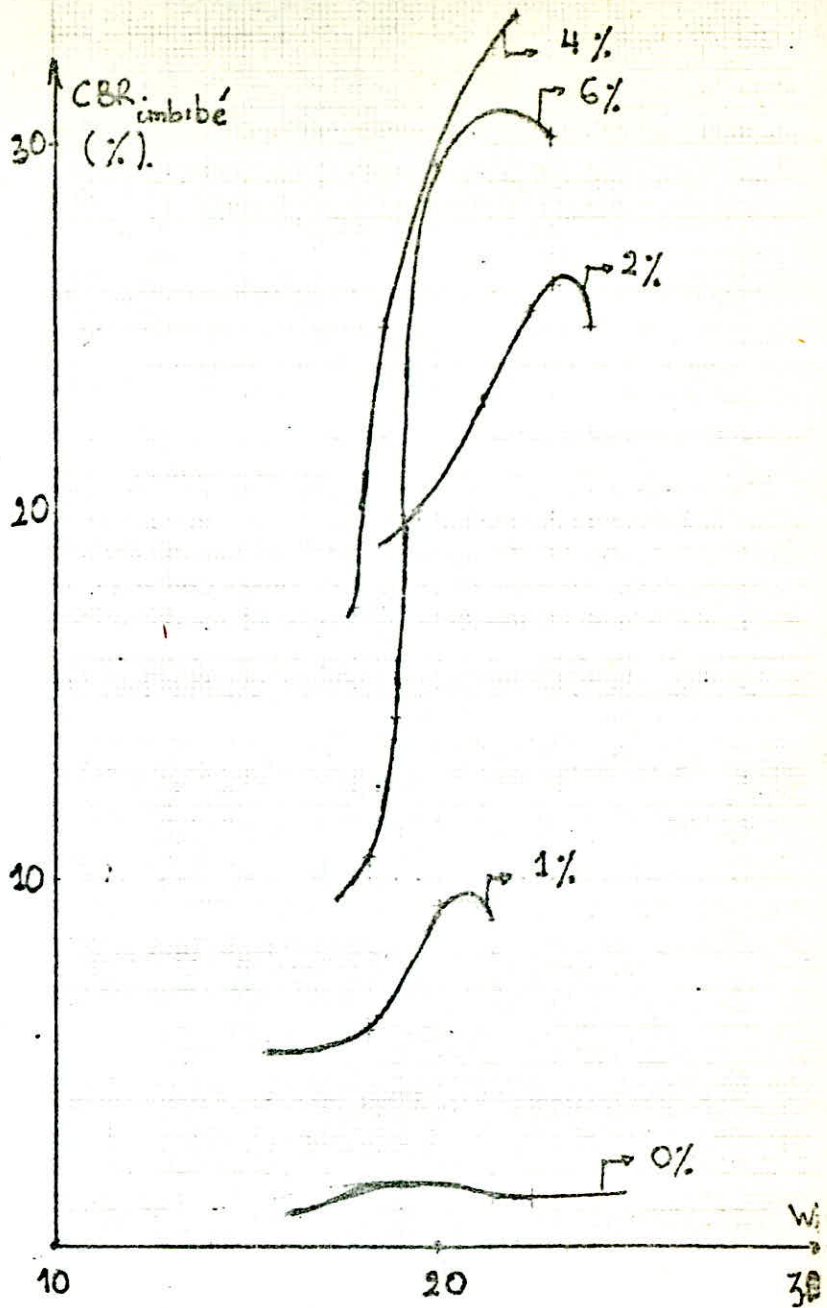
d) CBR imbibé : f (e %) (pour des teneurs en eau données)

On remarque que toutes les courbes possèdent un optimum aux environs de 1 % de chaux (CBR > 15) (pour toutes les W%).

e) CBR immédiat : f (e %) (pour des teneurs en eau données)

A une teneur en eau voisine des optimas Proctor (20 - 22 %), on obtient des CBR optimas (> 25) pour des teneurs en chaux entre 3 et 4 %.

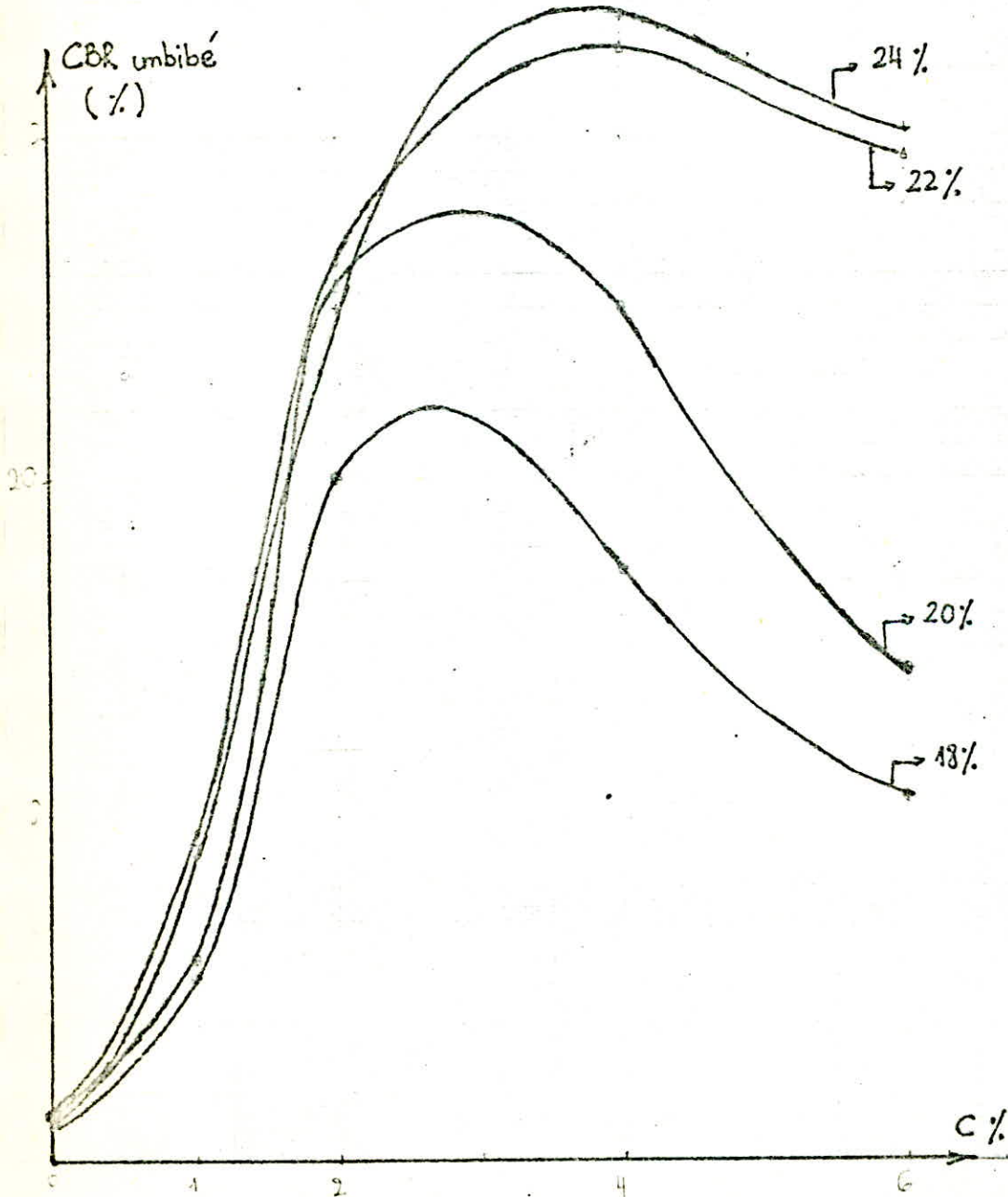
(1) La chaux dans les techniques routières (Syndicat National des Fabricants de Ciments et de chaux).



- d. imbibé 4j.

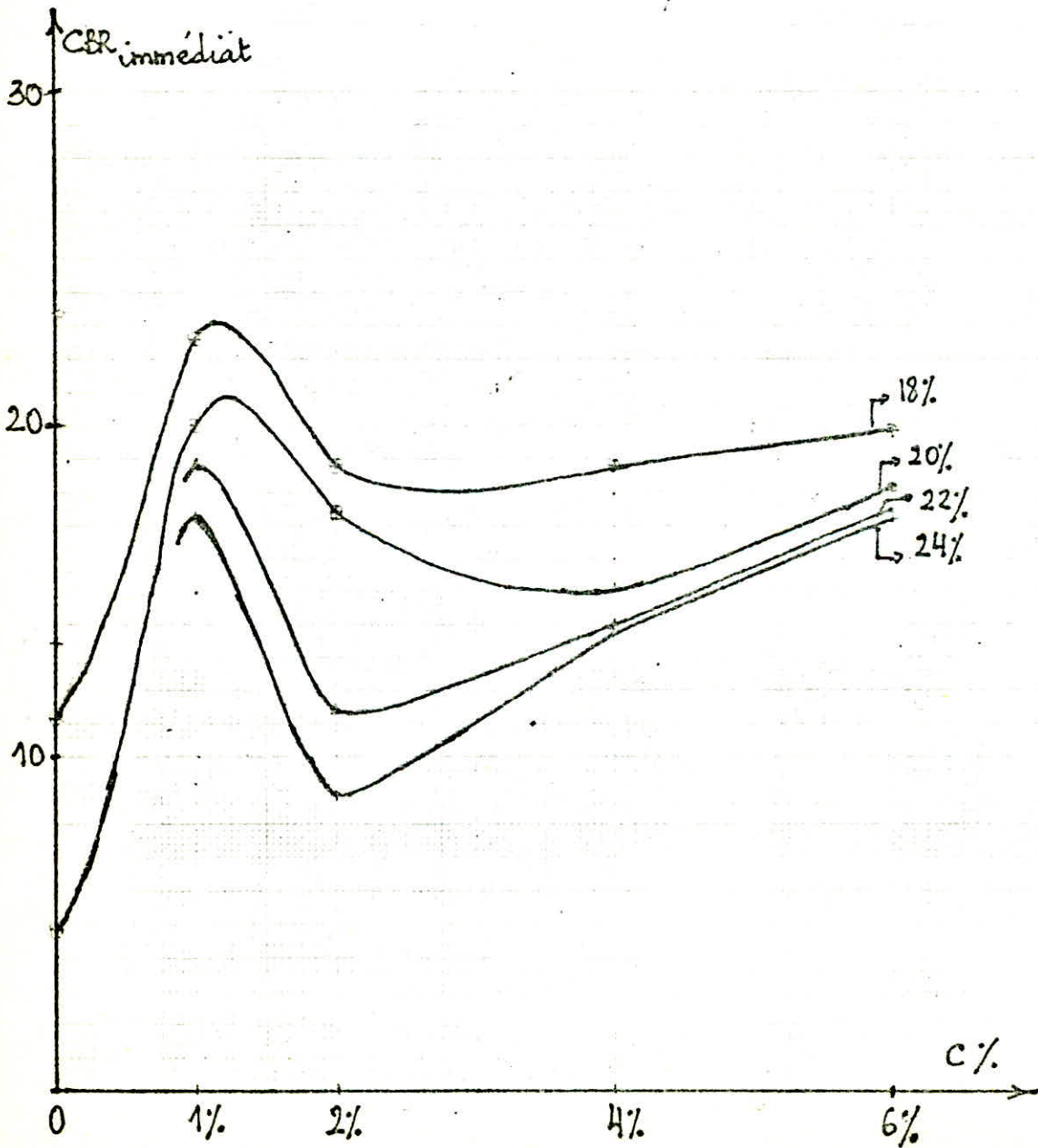
Teneur en eau fixée
w% donnée

18% - 20% - 22% - 24%

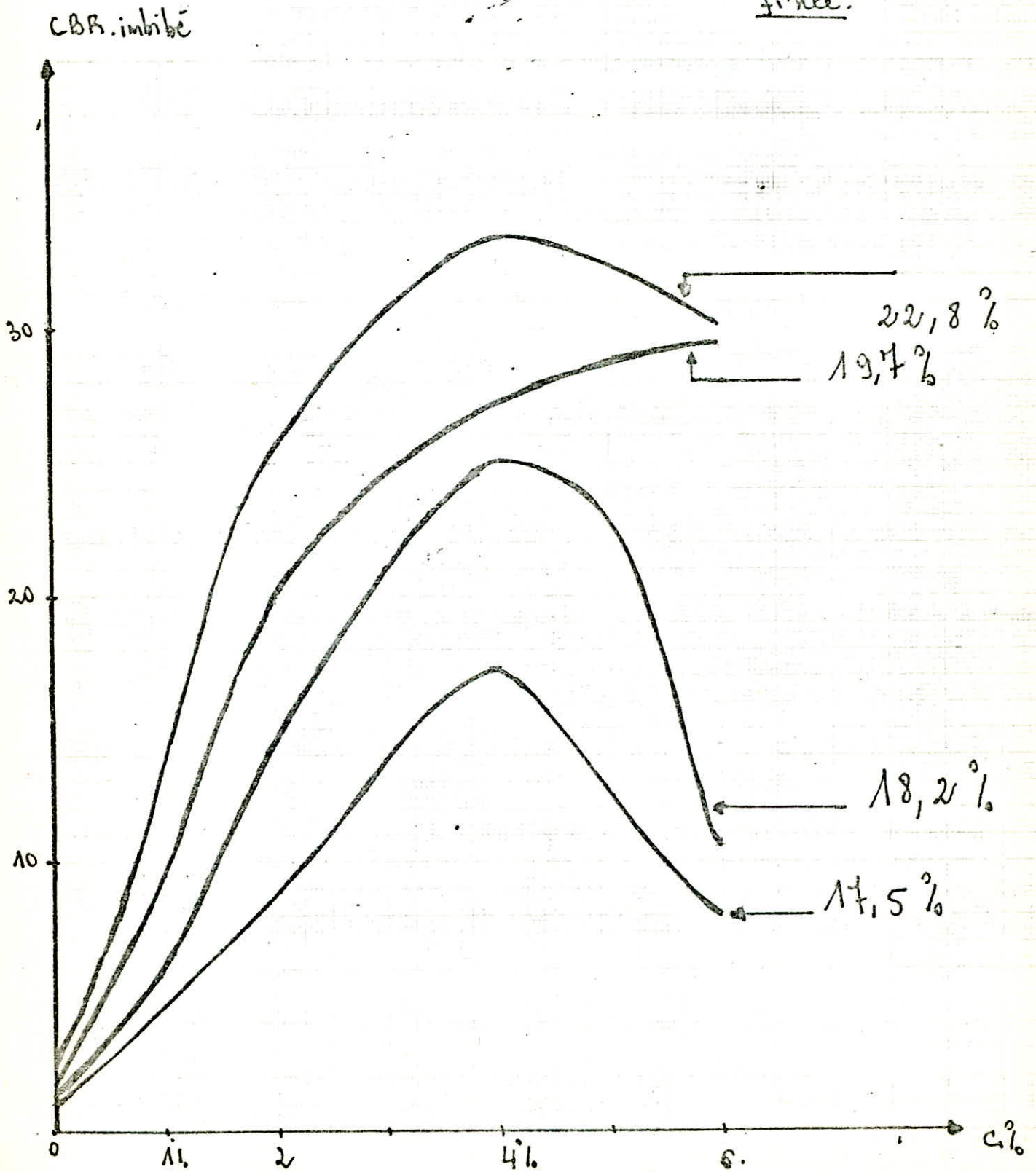


- e. Immédiat

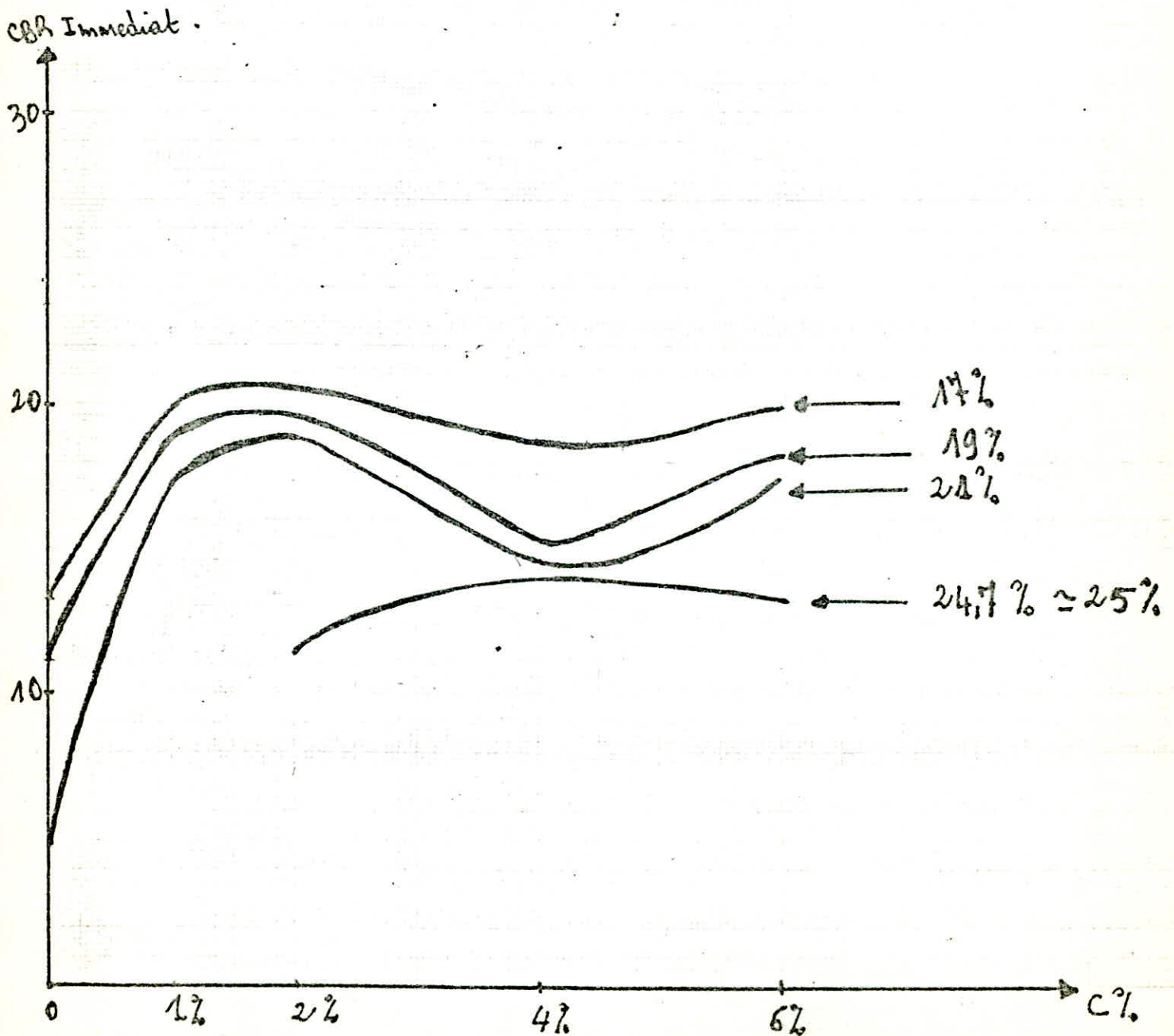
teneur en eau fixée.
w% donnée:
18% - 20% - 22% - 24%



- f. CBR. imbibé en fonction de la teneur en chaux.
Pour la teneur en eau de compactage
fixée.



- 9 - CBR Immédiat en fonction de teneurs en chaux.
pour les teneurs en eau de
compactage fixée.



h) CBR imbibé en fonction des teneurs en eau de poinçonnement

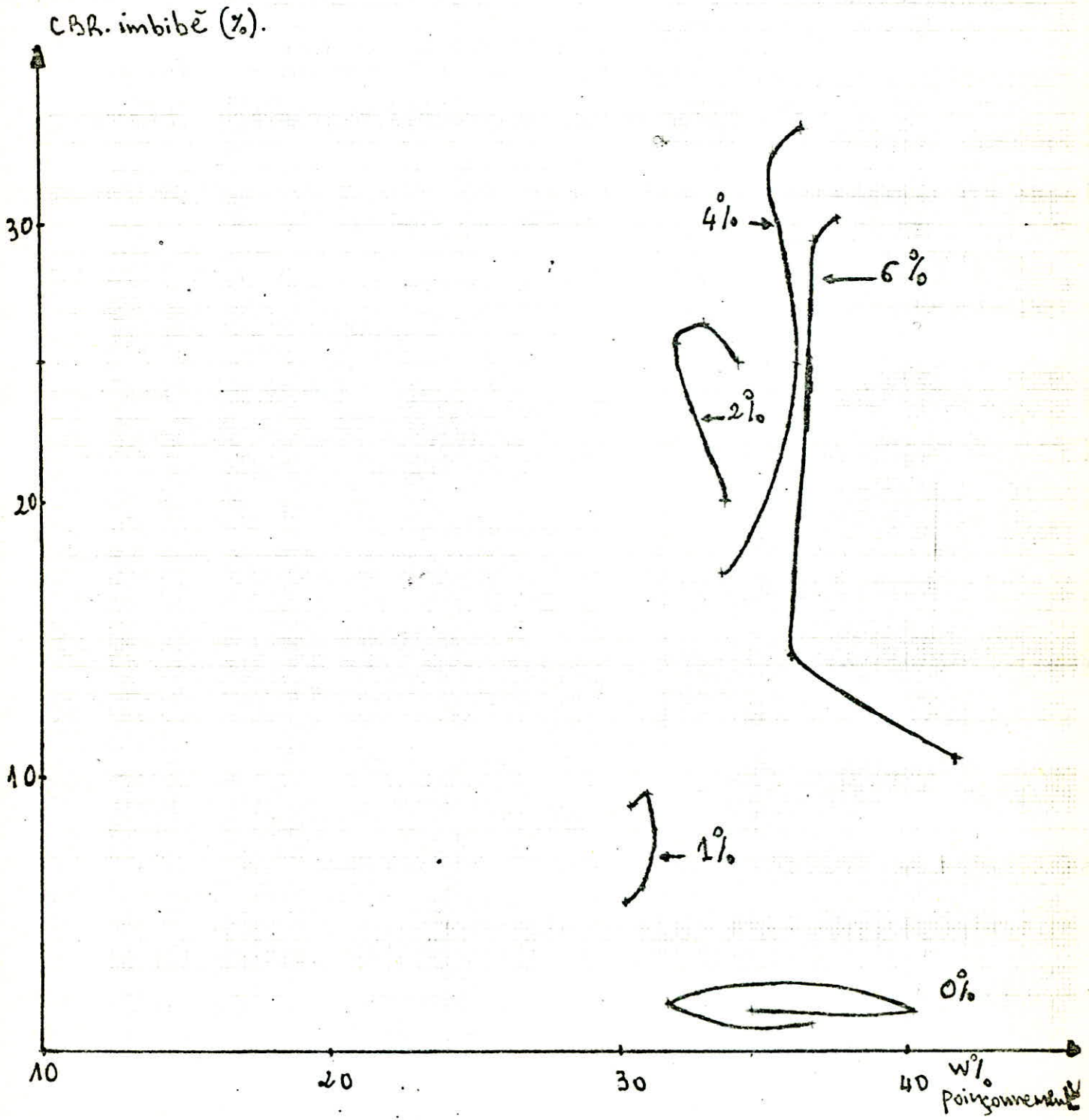
	W %	36,67	31,66	40,21	34,61
0 % chaux	CBR	1,02	1,7	1,39	1,55
	W %	30,09	30,82	30,93	30,43
1 % chaux	CBR	5,33	5,9	9,3	8,86
	W %	33,74	32,14	32,94	34,21
2 % chaux	CBR	20	25,7	26,4	25
	W %	33,57	36,24	35,39	36,40
4 % chaux	CBR	17,4	25	32,6	33,5
	W %	41,73	35,98	36,78	37,6
6 % chaux	CBR	10,6	14,4	29,4	30,2

Interprétation :

L'évolution des CBR est très nette pour les différentes teneurs en chaux par rapport au sol naturel (CBR très faible) malgré une humidité très élevée (30 à 40 %).

./.

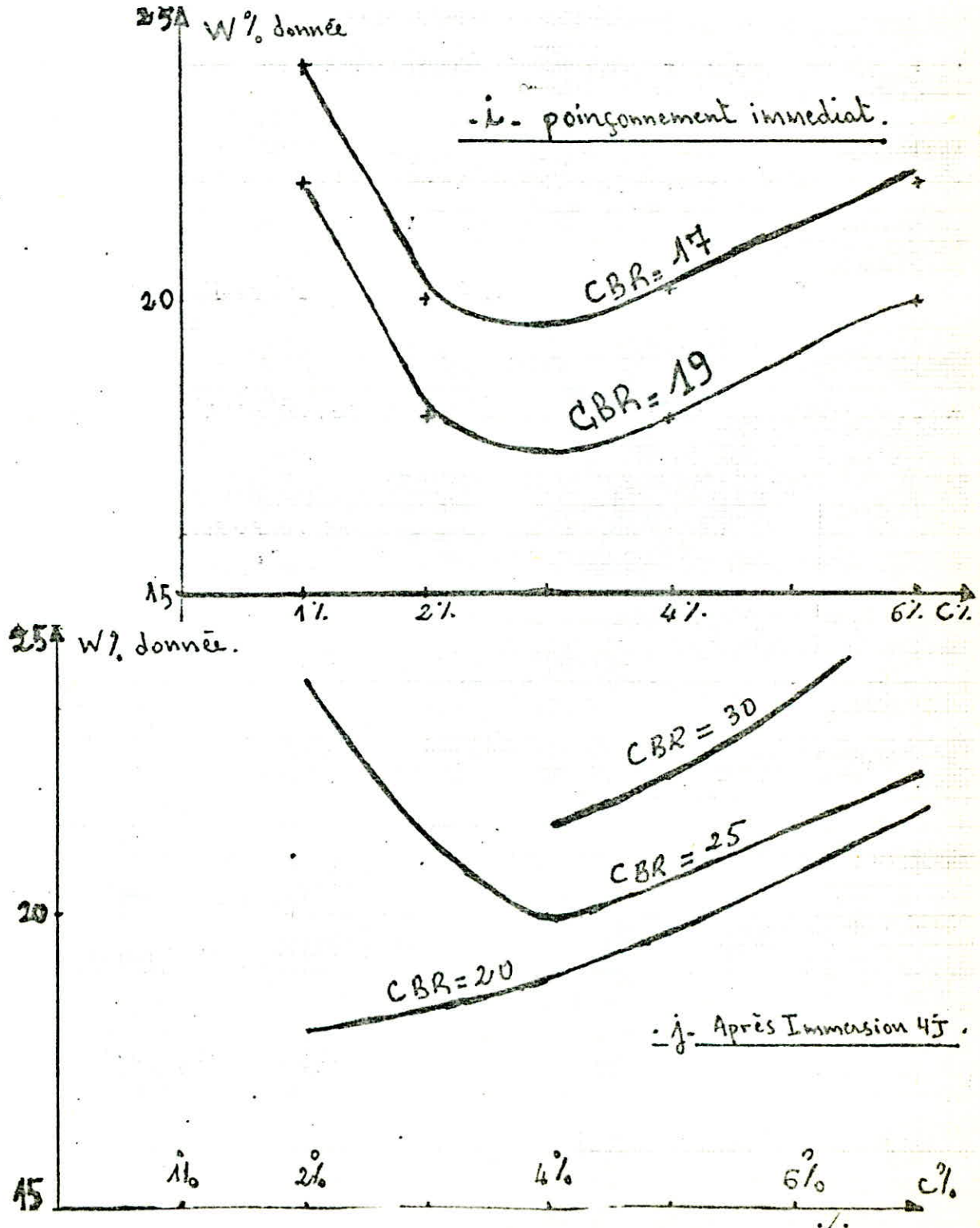
CBR. imbibé (4J) en fonction de teneur en eau
de Poinçonnement.



(i-j) - W données = f (e %) pour CBR immédiat et CBR imbibé fixes

Dans ces graphes, on a voulu visualiser les performances obtenues pour chaque teneur en chaux à des teneurs en eau données.

On remarque, par exemple, pour $W \% = 19$ on obtient un CBR de 20 pour 4 % de chaux pour le CBR imbibé.



6 - Variation des teneurs en eau

a) Teneurs en eau données en fonction des teneurs en eau de compactage

Pour l'immédiat

	W donnée	14	16	18	20
0 % chaux	W compactage	14	17,29	18,79	20,77
	W donnée	18	20	22	24
1 % chaux	W compactage	16,26	17,48	19,47	20,94
	W donnée	18	20	22	24
2 % chaux	W compactage	20,80	21,32	24,75	26,3
	W donnée	18	20	22	24
4 % chaux	W compactage	16,9	19,2	23,8	24,7
	W donnée	18	20	22	24
6 % chaux	W compactage	17,3	19,35	21,6	22,8

On remarque des abaissements des teneurs en eau plus ou moins réguliers pour toutes les teneurs en chaux (une anomalie cependant pour 2 % de chaux), ces abaissements étant dus à l'ajout de chaux.

b) Teneurs en eau données en fonction des teneurs en eau de compactage
(après 4 jours d'immersion)

W % données	0 % chaux W comp.	1 % chaux W comp.	2 % chaux W comp.	4 % chaux W comp.	6 % chaux W comp.
18	17,15	15,54	19,68	17,82	18,2
20	19,05	18,08	22,09	18,6	18,87
22	21,37	19,98	22,88	21,5	19,95
24	22,2	21,24	26,01	22,1	22,87

Les abaissements sont plus réguliers et plus nets.

c) Teneurs en eau de poinçonnement en fonction des teneurs en eau de compactage
(après 4 jours d'immersion)

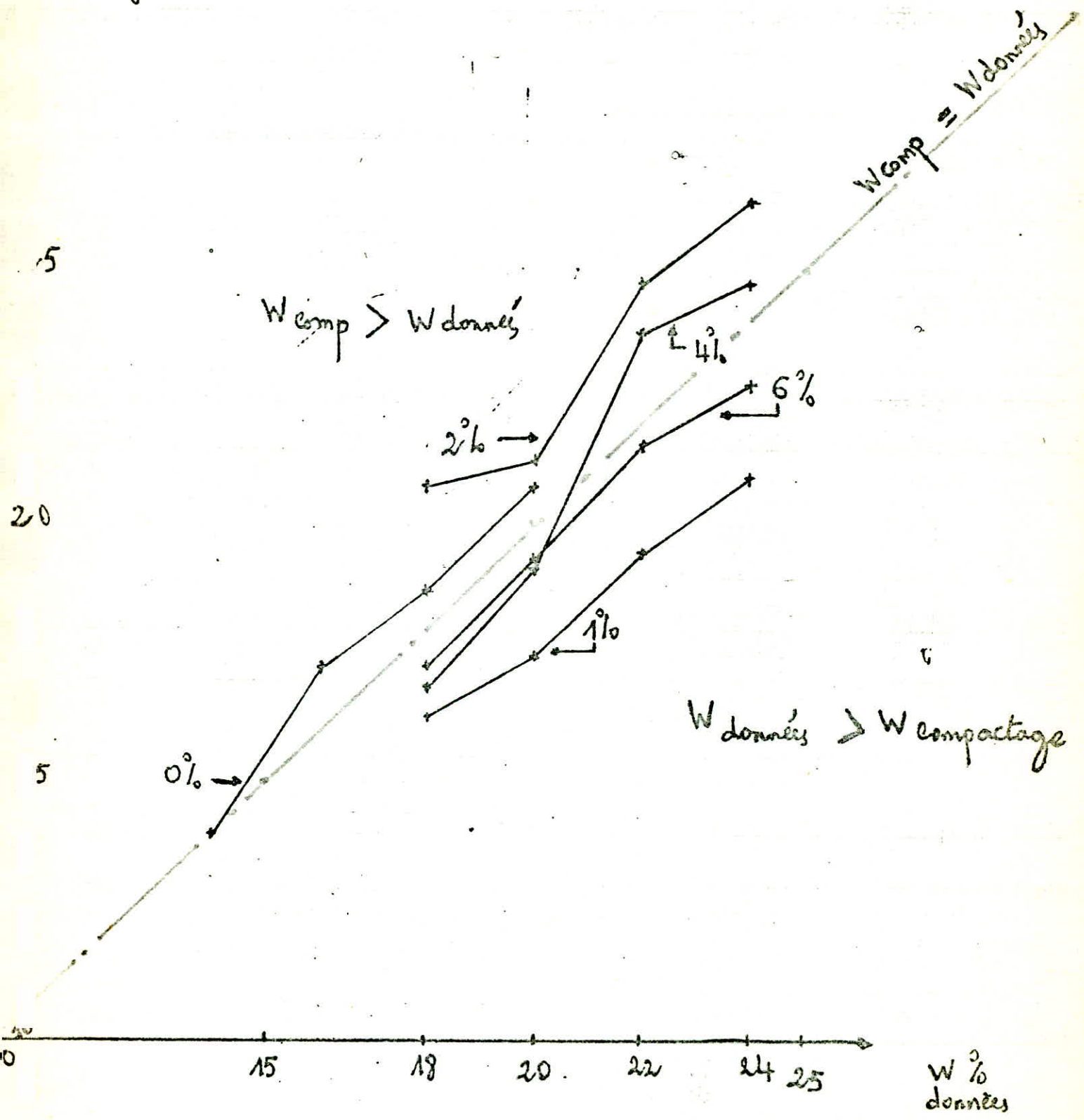
W comp.	17,15	19,05	21,37	22,2
0 % chaux				
W point.	36,67	31,66	40,21	34,61
W comp.	15,54	18,08	19,98	21,24
1 % chaux				
W point.	30,09	30,82	30,93	30,43
W comp.	19,68	22,09	22,88	26,01
2 % chaux				
W point.	33,74	32,14	32,94	34,21
W comp.	17,82	18,6	21,5	22,1
4 % chaux				
W point.	33,57	36,24	35,39	36,4
W comp.	18,2	18,87	19,95	22,87
6 % chaux				
W point.	41,73	35,98	36,78	37,6

Il y a eu augmentation des teneurs en eau due à l'imbibition à 4 jours, pour toutes les teneurs en chaux ce qui nous montre que les éprouvettes (sols + chaux) ont pris de l'eau sans pour cela qu'il y ait incidence néfaste sur le CBR (ce qui n'est pas le cas du sol naturel) d'où l'insensibilité à l'eau du sol + chaux.

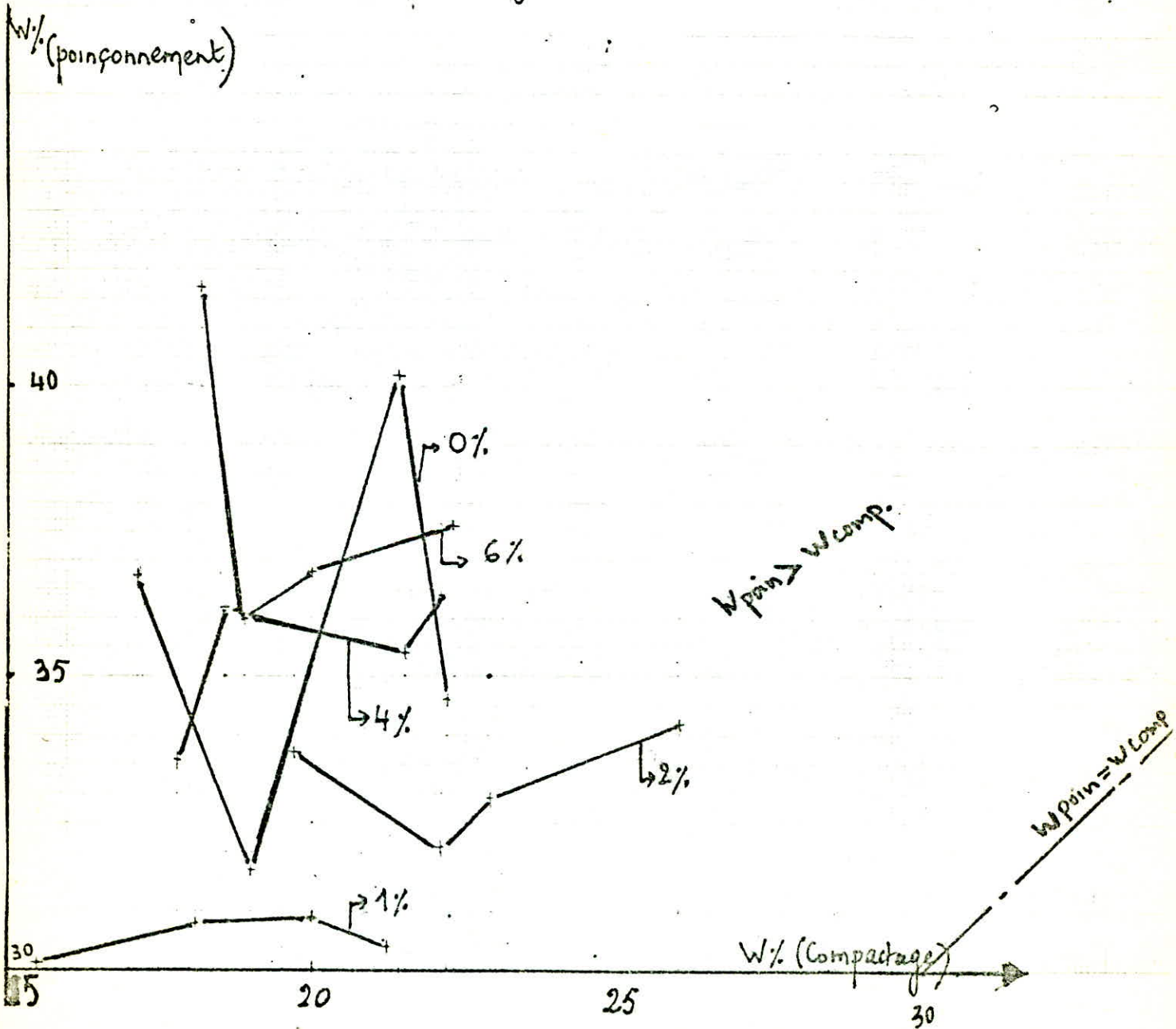
./.

immédiat.

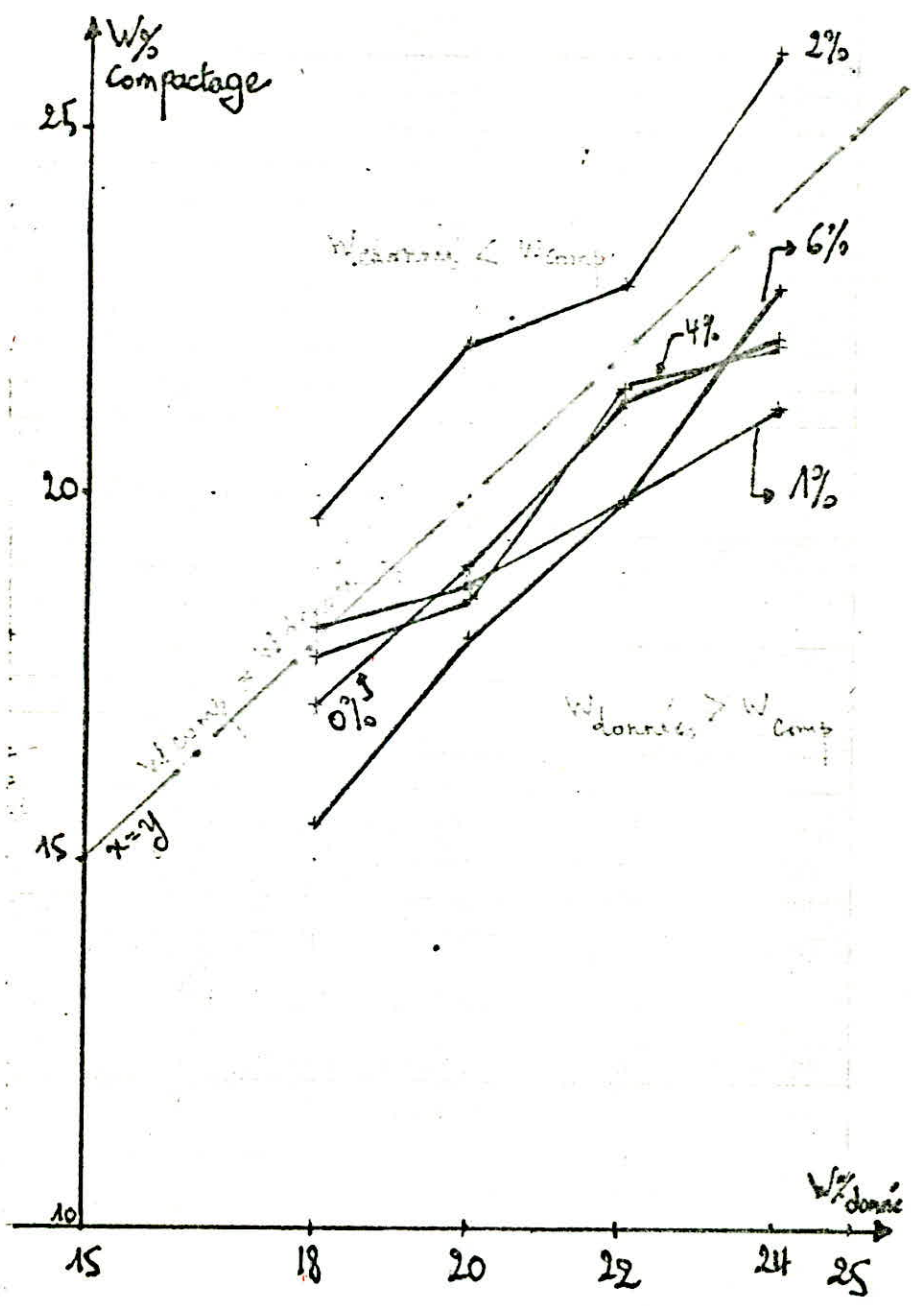
W %
compactage



Après 4 jours d'Immersion



Après Immersion de 4 jours



7 - Mesures de gonflement (en mm)

	W %	0 j	1 j	2 J	3 j	4 j
0 % chaux	18	0	4,579	4,743	4,800	4,852
	20	0	4,065	4,282	4,344	4,394
	22	0	3,430	3,631	3,714	3,756
	24	0	2,360	2,712	2,825	2,914
1 % chaux	18	0	2,715	2,725	2,725	2,732
	20	0	1,930	1,972	1,980	1,986
	22	0	1,955	1,972	1,980	1,984
	24	0	1,230	1,261	1,340	1,348
2 % chaux	18	0	1,060	1,050	1,050	1,050
	20	0	0,228	0,228	0,228	0,230
	22	0	0,710	0,708	0,708	0,710
	24	0	0,156	0,156	0,156	0,156
4 % chaux	18	0	1,108	0,960	0,960	0,962
	20	0	0,600	0,596	0,596	0,596
	22	0	0,374	0,362	0,362	0,362
	24	0	0,228	0,220	0,218	0,220
6 % chaux	18	0	1,364	1,234	1,234	1,238
	20	0	0,630	0,612	0,612	0,610
	22	0	0,214	0,212	0,212	0,212
	24	0	0,244	0,206	0,206	0,208

Remarque :

On constate que les valeurs lues sur les comparateurs chutent pour les divers ajouts de chaux.

Pour une même teneur en eau, les mélanges sol + chaux présentent une certaine stabilité des valeurs.

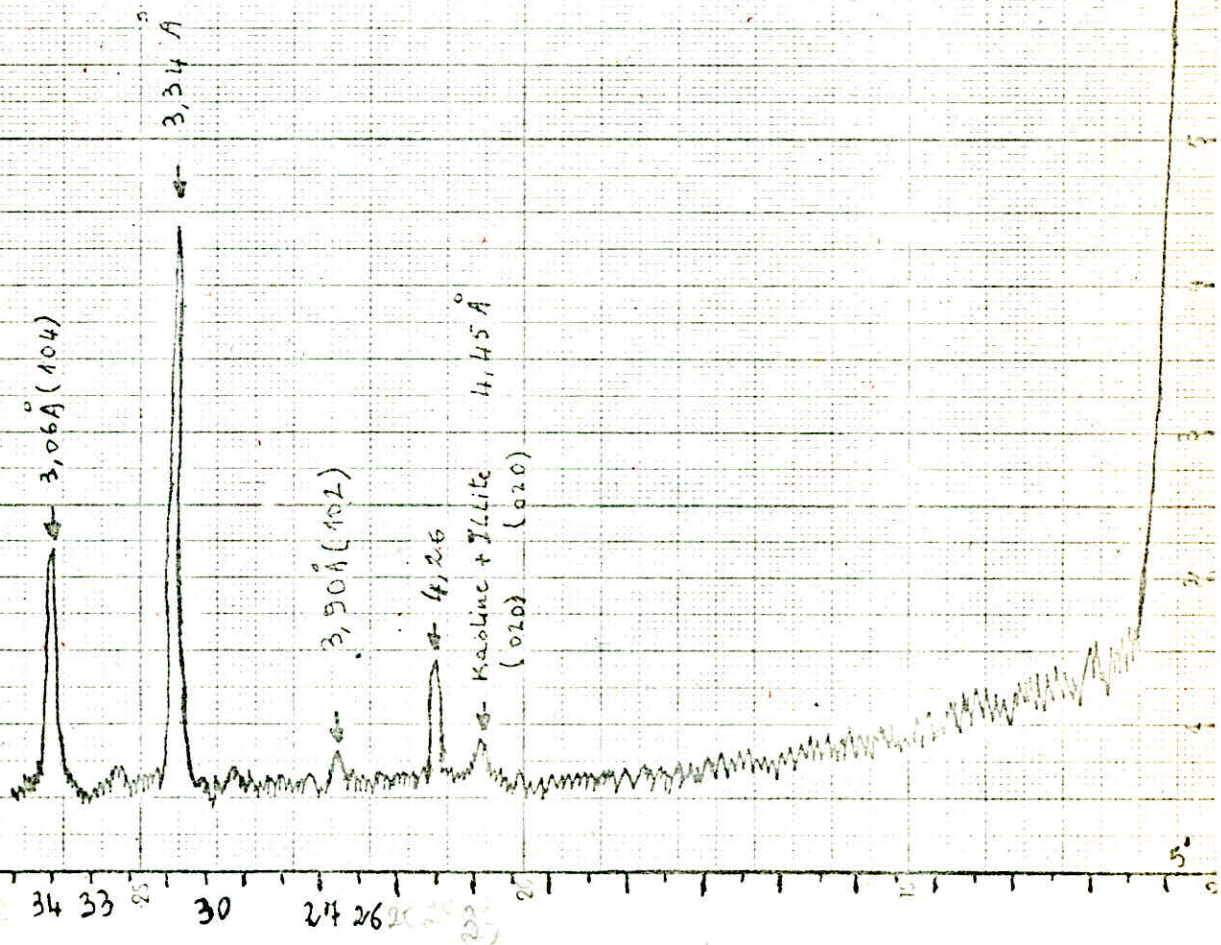
Cette stabilité étant due, à notre avis, à la fine pellicule de chaux entourant les grains du sol formant ainsi une gaine étanche qui empêche l'eau de s'infiltrer à l'intérieur de l'éprouvette (imbibition seulement sur les bords de l'éprouvette).

A notre avis, pour pouvoir affirmer que le sol traité est saturé, il faudrait au moins augmenter la durée d'imbibition (4 jours n'étant pas suffisants).

Il en est de même pour le sol naturel chez qui on ne remarque pas de stabilité de valeurs.

Rayt : Cobalt $K\alpha = 1,79\text{\AA}$
 Rég. KV. mA : 35KV . 10mA.
 Fen. entre : 1°
 Sore : $1/8$
 H.T. compt : 1135V
 Imp. min : $1 \cdot 10^4$
 Fr. stat : 2
 Discrim : /

N° Ech : /
 Etalon : /
 Vit. sciss : $1/4$ /min.
 pap : $1/8$ cm/mm
 pas à pas : /
 Temps comptage : /
 Nbre. inst : /
 Atten : /



8 - Incidence du traitement sur la structure cristalline du sol

- Diffraction aux Rayons X de l'échantillon sol + 6 % chaux

Afin d'essayer de caractériser l'effet à long terme d'un traitement à la chaux, un essai diffractométrique aux rayons X fut réalisé sur un échantillon sol + 6 % de chaux prélevé sur l'éprouvette CBR imbibé à 4 jours et laissé à 18 jours à l'air libre (l'échantillon broyé et tamisé à 100 μ).

. Interprétation des spectres

L'absence de réflexions à 10 Å et 7 Å des argiles provient de l'absence d'orientations de ces minéraux sur la plaquette en raison d'une structure granulaire due à la floculation après traitement.

Il y a apparition de nouvelles réflexions qui se situent au environ de 3,9 Å et 3,06 Å, ces nouvelles réflexions étant attribuées à la calcite (ou carbonates).

Calcite

H K L	d (Å)	I
1 0 2	3,86	12
1 0 4	3,033	100
0 0 6	2,845	3

Conclusion :

L'apparition des nouveaux pics est dû à une carbonatation du mélange (sol + chaux), on pourrait dire que l'illite est peu réactive car après 20 jours le matériau a peu évolué (absence de silicates et d'aluminates de calcium qui sont les résultats à long terme du traitement à la chaux).

./.

9 - Conclusion

a) Remarques sur les essais

- Le choix s'est porté sur le Proctor normal car étant préconisé par le RTR "Recommandations pour Traitement des Sols fins à la chaux" (août 72) et aussi par la méthodologie d'étude au Laboratoire établie par le LTFC, ayant ainsi une base d'étude pour notre travail.
- On a rencontré des problèmes de détermination de la teneur en eau réelle du mélange sol + chaux car on a procédé pour la mesure de la perte de poids par étuvage, ce qui nous donne des valeurs de la teneur en eau inférieure à la valeur réelle ceci est dû d'après Pierre PERRET (Thèse de Doctorat d'Etat INSA de Rennes) : "qu'au cours de la dissiccation la chaux fixe le gaz carbonique atmosphérique, pour éviter cette erreur systématique la mesure est effectuée à l'abri de l'air".
- Lors du malaxage, on a constaté que la chaux agglomérait les grumeaux sans pénétrer à l'intérieur ce qui ralentissait la réaction sol - chaux, ceci est dû, à notre avis, aux palettes du malaxeur (mauvais cisaillement des grumeaux).

b) Conclusion

En analysant les courbes CBR imbibé et CBR immédiat du sol naturel, on constate que ces sols ont une forte résistance à sec qui disparaît par l'action de l'eau (voir graphes CBR immédiat = $f(W \%)$ et CBR imbibé $f(W \%)$).

Puis si on analyse les courbes CBR imbibé du mélange sol + chaux on constate que la résistance augmente par conséquent le liant rend le sol moins sensible à l'eau.

La capacité des sols non cohérents repose sur le frottement des grains entre eux, si ce frottement est trop faible, les sollicitations du trafic provoquent des déformations et des tassements.

Ce qui manque en frottements doit être compensé par de la cohésion, celle-ci s'obtient dans notre cas au moyen de liants par cimentation et collage des grains du sol.

La dose de chaux a relativement peu d'incidence sur l'amélioration immédiate du sol (optimum du CBR immédiat atteint à 1 % quelque soit les teneurs en eau qu'on s'est fixées dans notre étude). Tandis que les effets à long terme CBR imbibé à 4 jours augmentent avec la dose de chaux jusqu'à atteindre une limite de 4 % au delà de laquelle (6 % de chaux) les indices de portance chutent.

L'amélioration immédiate des propriétés géotechniques produite par la granulation du sol sous l'action de la chaux et de l'assèchement qui en résulte, rend utilisable les sols limoneux qui seraient mis en décharge sans ce traitement.

L'intérêt des effets à long terme de la chaux pour la construction routière est évident : les sols + chaux à dose élevée (> 4 %) pourraient assumer une fonction structurelle dans la chaussée en tant que couche de forme.

ESSAIS IN SITU

I - PRESENTATION DE LA PLANCHE D'ESSAI EXPERIMENTALE	p61
II - CONFECTION DE LA PLANCHE D'ESSAI EXPERIMENTALE	p61
A - Diverses étapes et matériels utilisés	
1 - Décapage	p61
2 - Nivellement et mesures sur fonds de terrassement	p62
a) Description du Gamma Densimètre TROXLER	
b) Etalonnage du Gamma Densimètre TROXLER	
c) Mesures de γ_d sur fond de terrassement	
3 - Epanchage	p66
a) Etalonnage de l'épandeur	
b) Epanchage proprement dit	
4 - Malaxage	p67
5 - Compactage	p68
- Contrôle du compactage	
B - Quelques remarques	p70
III - EVALUATION DU CER IN SITU	p71
IV - ESSAIS DE PLAQUES	
1 - Réalisation des Essais	p72
2 - Résultats	p73
a) $EV_2 = f(C\%)$	
b) $K = f(C\%)$	
V - DEFLEXIONS	
1 - Mesure de déflexion	p74
2 - Remarques sur la validité des mesures	p74
3 - Commentaires sur les résultats obtenus	p75

VI - CORRELATION ENTRE LES ESSAIS

1 - Interprétation des essais de plaques	p 76
a) Méthode	
b) Résultats	
2 - Choix d'une épaisseur de couche traitée	p 77
3 - Interprétation des mesures de déflexion	p 78
4 - Corrélation EBR - Module de déformation	p 79.

ESSAI IN SITU

I - PRESENTATION DE LA PLANCHE D'ESSAI EXPERIMENTALE

Après une étude détaillée au Laboratoire et afin de voir le comportement in Situ du traitement de la chaux suivant les divers pourcentages retenus, une planche d'essai expérimentale a été confectionnée sur le site de l'Aéroport Houari BOUMEDIENNE.

Une section de 750 m² a été retenue sur une épaisseur de 30 cm environ. Les dimensions arrêtées sont fonction des divers pourcentages de chaux : cinq bandes de trois mètres disposées l'une à côté de l'autre sur une largeur totale de quinze (15) mètres (la bande de 0 % de chaux servant de planche témoin).

Divers essais de mesures ont été programmés :

- Mesure de déflexion (à l'aide du déflectographe Lacroix)
- Mesure de coefficient de WESTERGARD (à l'aide d'essai de la plaque)
- Mesure de W %, γ_d , γ_h (à l'aide du TROXLER).

II - CONFECTION DE LA PLANCHE D'ESSAI

Les opérations fondamentales du traitement à la chaux sont l'épandage de la chaux et son incorporation au sol au moyen d'un engin malaxeur.

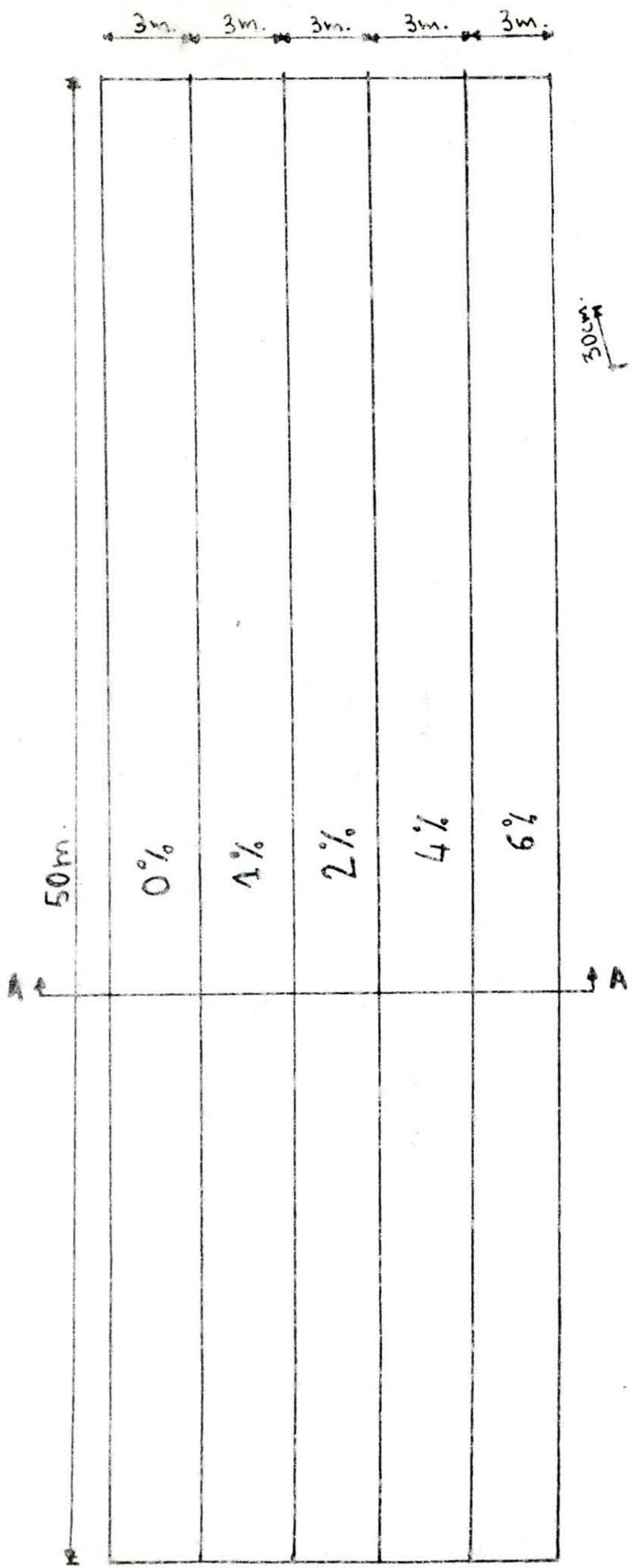
La phase finale est toujours le compactage du sol - chaux après un temps de repos.

A - Diverses étapes et matériels utilisés

1) Décapage

L'opération de décapage consistait initialement à atteindre la profondeur à traiter de 0,30 à 0,80 m (profondeur retenue expérimentalement).

./.



- COUPE - A - A

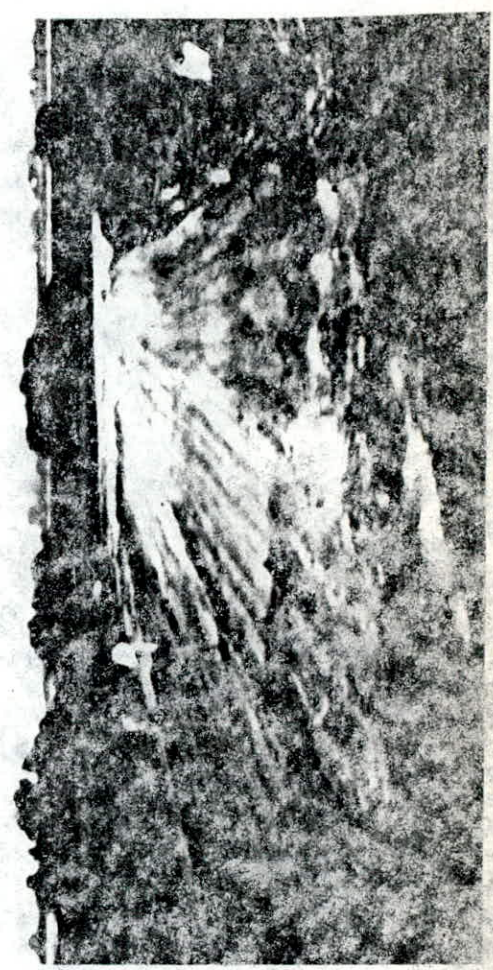
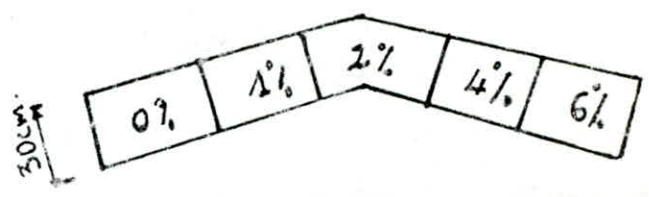


Planche d'essai après traitement
(Photo ci-dessus)

Après avoir décapé sur 30 cm un simple contrôle de la présence de matières organiques (forte odeur de moisie caractéristique des matières organiques) et de plus l'hétérogénéité du sol, nous ont amené à augmenter la profondeur de décapage jusqu'à atteindre 0,70 m, profondeur à laquelle on note une faible présence de matière organique (odeur plus ou moins neutre).

Le décapage a été fait à l'aide d'un scraper (photo n°1).

2 - Nivellement et mesures sur fond de terrassement (photo n° 2)

Pour que la couche traitée soit d'épaisseur uniforme et réglée aux niveaux et pentes convenables, on fait passer la niveleuse (photo n°2a)

a) Description du Gamma-Densimètre TROXLER

Principe : Le principe de fonctionnement du Gamma-Densimètre TROXLER est basé sur l'émission de rayonnements (Neutrons, Gammas).

Cet appareil est équipé d'un capteur d'impulsions dûes aux chocs des rayonnements avec la matière. Ces impulsions sont ensuite comptées au Geiger qui affiche les valeurs voulues ($W\%$, γd , $\gamma h...$)

Schéma descriptif de l'appareil

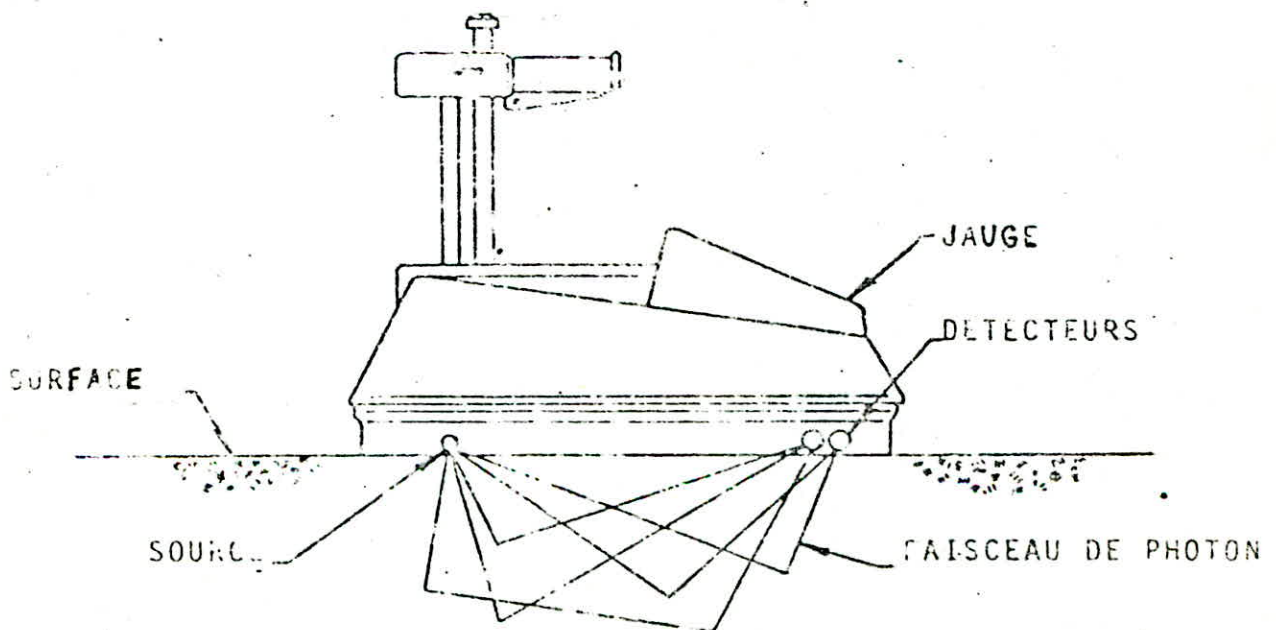


Figure 9-4 - GEOMETRIE DE RETRODIFFUSION DENSITE

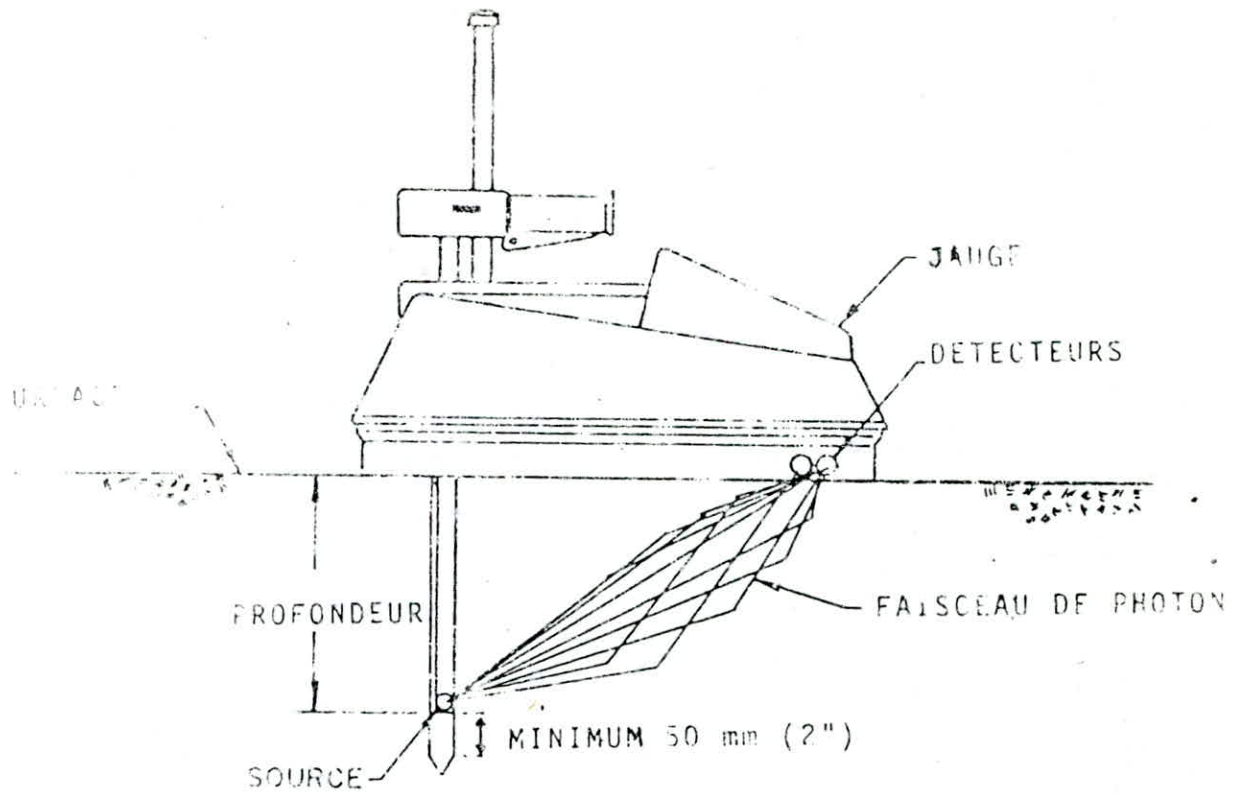


Figure 10-2 - GEOMETRIE DE TRANSMISSION DIRECTE DENSITE

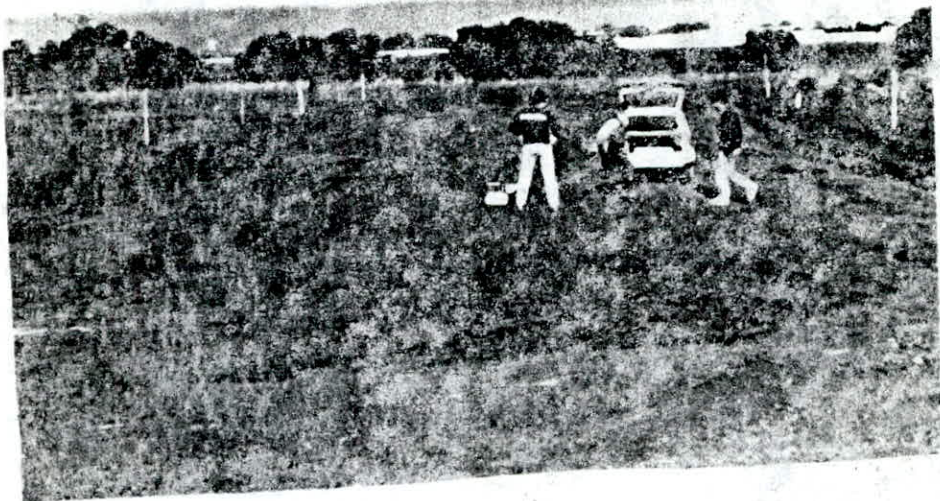


Photo n°2 : Mesures Sur Fond de Terrassement
(à L'aide du TROXLER).

b) Etalonnage du Gamma-Densimètre

Calcul du coefficient K de correction d'humidité pour TROXLER 3411.B

1er Point de mesure

Etuve

TROXLER WBS : -
W 2" : 18,0 %
W 4" : 18,3 %
W 6" : 17,2 %
WTR₁ moyenne : 17,83 %

Wet₁ = 13,04 %

2ème Point de mesure

Etuve

TROXLER WBS : -
W 2" : 17,0 %
W 4" : 18,9 %
W 6" : 17,0 %
WTR₂ moyenne : 17,63 %

Wet₂ = 15,5 %

3ème Point de mesure

Etuve

TROXLER WBS : -
W 2" : 19,3 %
W 4" : 19,8 %
W 6" : 20,1 %
WTR₃ moyenne : 19,73 %

Wet₃ = 18,55 %

4ème Point de mesure

Etuve

TROXLER WBS : -
W 2" : 19,8 %
W 4" : 19,2 %
W 6" : 19,0 %
WTR₄ moyenne : 19,33 %

Wet₄ = 14,5 %

5ème Point de mesure

Etuve

TROXLER WBS : -
W 2" : 23,2 %
W 4" : 22,2 %
W 6" : 22,5 %
WTR₅ moyenne : 22,63 %

Wet₅ = 18 %

Les coefficients K de correction seont calculés à partir de la formule :

$$K_i = \frac{Wet_i - Wtr_i}{100 + Wtr_i} \times 1000 \quad (i \text{ variant de } 1 \text{ à } 5)$$

$$K_1 = -40,65$$

$$K_2 = -18,10$$

$$K_3 = -9,86$$

$$K_4 = -40,48$$

$$K_5 = -37,76$$

$$K = -29,37$$

c) Mesures de γ_d sur fond de terrassement

Avant de procéder au traitement proprement dit, il est important de connaître l'état du sol (humidité, densité). A cet effet, on procède à des mesures au TROXLER sur le fond de terrassement.

Décapage 0,70 m mesures γ_d sur fond de terrassement

Points	profondeur cm	d	W %	d	référence OPN	compacité %
1	20	1,967	28,6	1,529	1,63	93,8 %
		1,969	28,1	1,537		94,3 %
		1,962	28,9	1,523	18,8	93,4 %
2	20	2,112	19,5	1,768	1,66	106,5 %
		2,113	18,6	1,782		107,3 %
		2,115	19,8	1,765	17,3	106,3 %
3	20	1,966	26,9	1,549	1,63	95,0 %
		1,955	28,2	1,524		93,5 %
		1,967	27,8	1,539	18,8	94,4 %
4	20	1,954	21,5	1,608	1,63	98,6 %
		1,956	20,8	1,619		99,3 %
		1,951	21,4	1,607	18,8	98,6 %

Remarque : 2 familles de sol rencontrées

- a) les points 1, 3 et 4 : argile brune avec fort pourcentage de fines
cest l'échantillon n° 1 (0,30 - 0,80)
profondeur de décapage 0,70 m

b) le point 2 : profondeur de décapage (0,90 - 1,00)
 argile jaune avec présence graveleuse
 c'est l'échantillon 2-3 (1,50 - 1,70)

c) moyennes (points 3, 1, 4)

$$W \% = 25,8$$

$$\gamma_d = 1,559 \text{ t/m}^3$$

$$C \% = 95,6 \%$$

3 - Épandage

a) Étalonnage de l'épandeuse

Le type d'épandeuse utilisée est une épandeuse volumétrique.

On procède à un étalonnage de cette épandeuse comme suit :

- Étaler une bâche de 1 m² :
- Épandre la chaux et peser la quantité épandue sur la bâche.

La correction du débit s'effectue par tours à la manivelle.

Le dosage restant constant quelle que soit la vitesse d'avancement de l'épandeuse.

Le taux d'épandage à réaliser est calculé par la formule suivante :

$$\text{Taux (kg/m}^2\text{)} = \frac{H \times \gamma_d}{100} \times C \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} \gamma_d = 1,6 \text{ t/m}^3 \\ h = 0,30 \text{ m} \end{array}$$

Où h : épaisseur de la couche de sol à traiter

γ_d : son poids spécifique apparent sec (kg/m³)

c : dosage en chaux prévu en pourcentage du poids de sol sec

Tableau donnant les taux d'épandage

C %	Valeurs théoriques (kg/m ²)	valeurs réelles (kg/m ²)	C' %
1 %	4,8	4,6	0,96
2 %	9,6	11,25	2,34
4 %	19,2	18,2	3,8
6 %	28,8	28,9	6,02

C % pourcentage de chaux théorique (par rapport au poids sec du sol)

C' % pourcentage de chaux correspondant aux taux d'épandage réels

Épandage proprement dit :

L'épandage de la chaux se fait directement sur fond terrassement (photo n° 3).

4 - Malaxage

La chaux épanchée est incorporée au sol par un engin malaxeur (photo 4, 5)
Type BOMAG MPH 100 dont les caractéristiques sont les suivantes : (1)

largeur de travail	profondeur de malaxage	diamètre à l'extérieur des dents	nombre de dents	vitesse du rotor	caractéristiques particulières	vitesse de travail
2	0,45	1,22 m	70	150 - 180 tr/mn	*sécurité coordonnée entre rotor et avancement dents clavetées à changement rapide	4 km/h

Son rendement pour notre sol : ($I_p = 22$).

I_p	liant	Nbre moyen de passes	Epaisseur de malaxage	m ² /h par passes de malaxage
21-30	chaux	3 à 4	15	1 280
			20	1 150
			25	1 030
			30	900
			35	770

Dans notre cas, la profondeur de malaxage étant de 30 cm ce qui donne 4 passes de l'engin.

(1) référence : "présentation du BOMAG Stabilisateur du sol MPH 100" par KOEHRING.

5 - Compactage

Après le malaxet et avant le compactage, la couche de sol chaux est laissée exposer à l'action asséchante du soleil et du vent (photo n°6).

Le compactage s'est effectué à l'aide d'un orthopactor P5 à pneus sculptés caractérisé par une charge maximum de 5 t par roue (ce qui le classe en P₂ suivant le RTR - fascicule 3).

Contrôle du compactage

Extrait de la recommandation RTR (fascicule 3) "Compactage des Remblais et couche de forme"

Sol A₂ (1) Q/S = 0,035
couche de forme e = 0,30 : $n = \frac{e}{Q/S} = 8$ passes

avec $\frac{Q}{S}$ (m) = $\frac{\text{volume du sol compacté pendant un temps donné}}{\text{surface balayée par le compacteur pendant le même temps}}$

e (m) = épaisseur de couche

(1) remarque : notre sol étant de classe A₃ (I_p = 22) se rapprochant de A₂ (10 < I_p < 20) n'ayant pas de spécification.

Sur le nombre de passes en couche de forme pour les sols A₃, on a opté pour celles de A₂.

Le contrôle du compactage s'est effectué à l'aide du Gamma Densimètre TROXLER en se basant sur les CPN obtenus au Laboratoire et sur n = 8 passes (sol naturel A_{3m}).

Tableau donnant les W %, γ_d en fonction de n :

	Nombre de passes	γ_d (t/m ³)	W %
6 % de chaux	6	1,403	20,6
	8	1,414	20,8
	Nombre de passes	γ_d (t/m ³)	W %
4 % de chaux.	6	1,407	21,4
	8	1,422	22,65

	Nombre de passes	γ_d (t/m ³)	W %
2 % de chaux	6	1,383	24,55
	8	1,523	22,05

	Nombre de passes	γ_d (t/m ³)	W %
1 % de chaux	4	1,405	25,2
	6	1,433	22,35
	8	1,412	22,3

	Nombre de passes	γ_d (t/m ³)	W %
0 % de chaux	2	1,634	23,25
	6	1,688	21,2
	8	1,713	20,6

Remarque : pour 0 % de chaux, l'OPN est atteint pour seulement 2 passes du compacteur ; il faut rappeler que cette planche n'a pas été remaniée par malaxage comme les autres. Le sol a déjà subi un certain compactage par les engins de terrassement qui ont procédé au décapage.

Tableau donnant les compacités après traitement en fonction des nombres de passes de compacteur

C	Nombre passes	γ_d (t/m ³)	référence OPN γ_d/W	compacité (%)
6 %	6	1,403	1,42 /	98,8
	8	1,414	/ 21,5	99,6
4 %	6	1,407	1,426 /	98,67
	8	1,422	/ 20,5	99,7
2 %	6	1,383	1,434 /	96,44
	8	1,523	/ 22,1	106,2
1 %	4	1,405	1,47 /	95,58
	6	1,433	/	97,48
	8	1,412	20	96,05
0 %	8	1,713	1,63/18,8	105,09

Remarque : on remarque qu'on obtient de bonnes compacités (en références OPN) pour 8 passes du compacteur et ceci pour tous les pourcentages de chaux, ce qui confirme notre choix pour le nombre de passes ($n = 8$).

B - QUELQUES REMARQUES

- L'étalonnage de l'épandeur étant très empirique d'où difficulté d'obtention des valeurs théoriques du dosage en chaux.

Pour obtenir une bonne approximation, il faut pour cela faire beaucoup de mesures ce qui entraînent un gaspillage de chaux.

- Le choix de plusieurs bandes à diverses teneurs en chaux a causé des difficultés à obtenir une pente convenable pour l'évacuation de l'eau.

- On pourra conclure que le BOMAG MPH 100 est très approprié pour la stabilisation des sols A_3 à la chaux et ceci au vu de la granulation obtenue après malaxage (4 passes de l'engin).

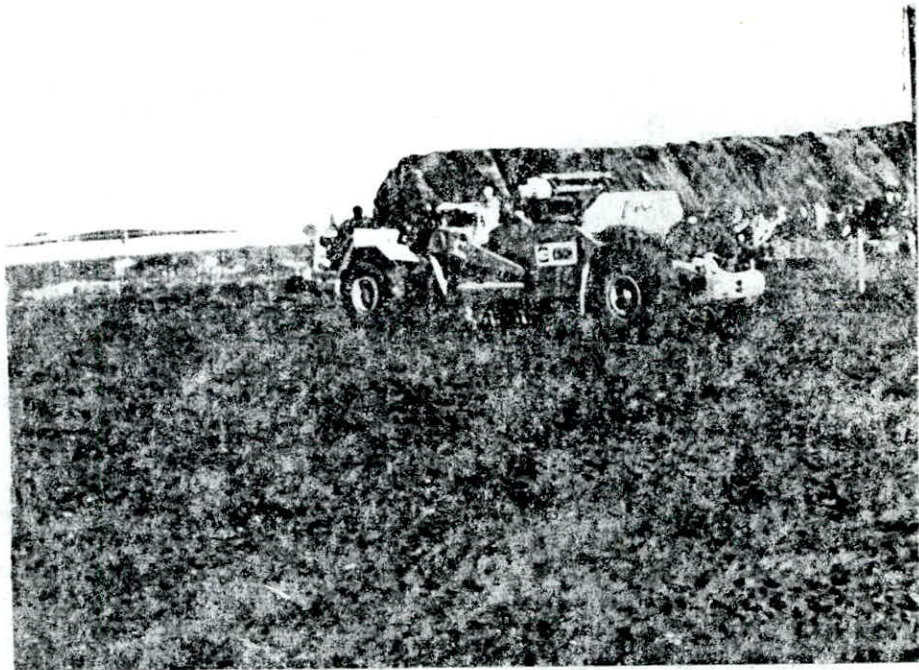
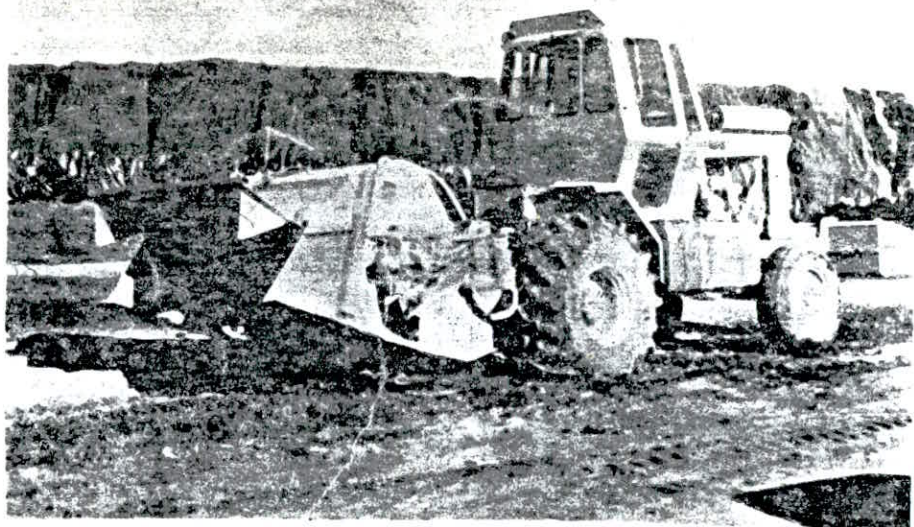


Photo n° 1: Décapage de la terre végétale à l'aide d'un Scraper.



Photos 5 et 4 : Malaxeur (BOMAG MPH 100).
(Photo 5 : Vue de près des dents clavetées)

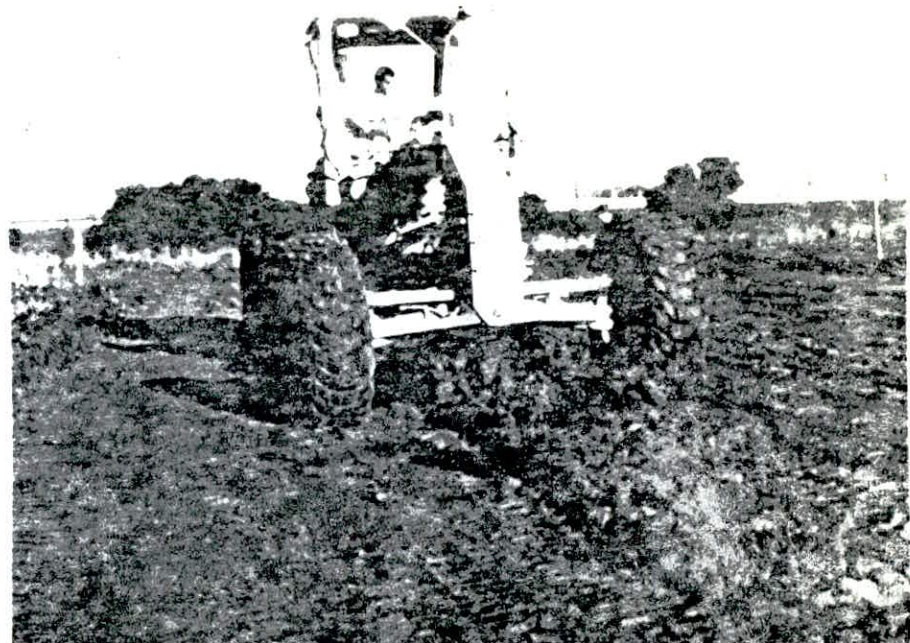
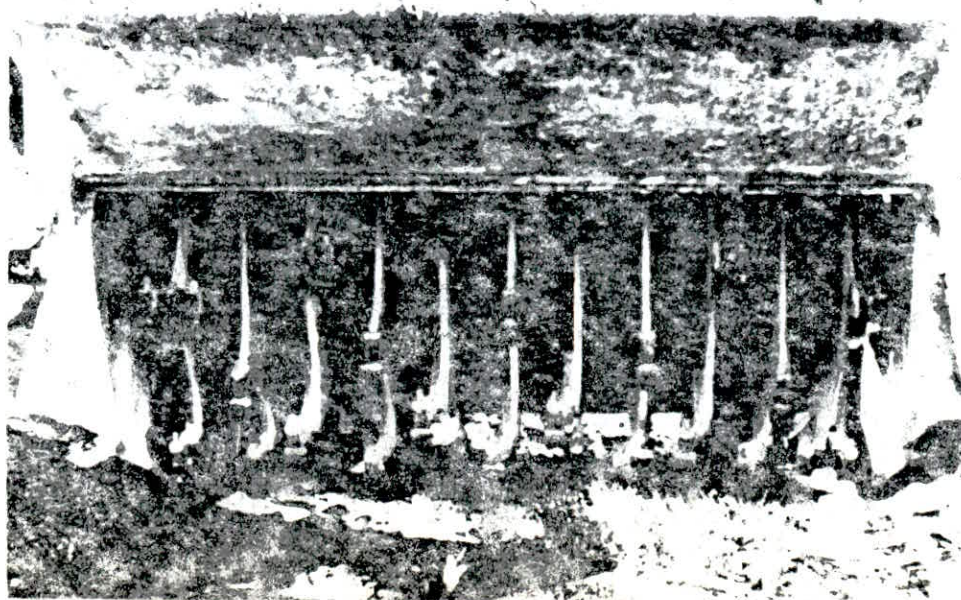
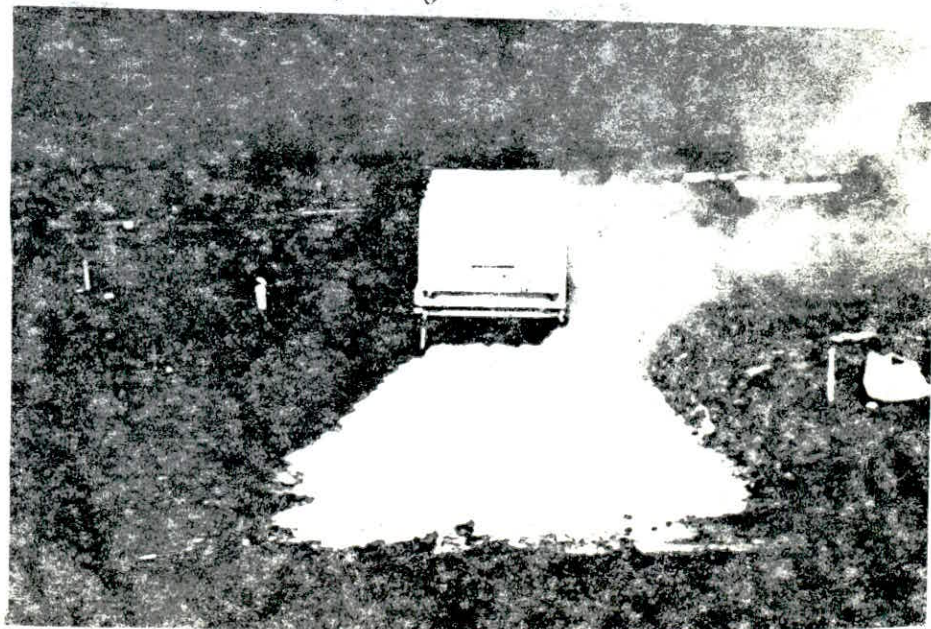


Photo 2-a : Nivellement après décapage

Photo n°3 : Epandage de la chaux.



III - EVALUATION DU CBR IN SITU

A partir des essais de laboratoire, on peut estimer les valeurs du CBR in Situ.

Fonds de terrassement

Les mesures effectuées, avant le traitement du sol, ont donné en moyenne :

$$W = 25,8 \%$$
$$\gamma_d = 1,56 \text{ t/m}^3$$

D'après les courbes de Proctor et CBR imbibé, on aurait dans ce cas un CBR d'environ 1 %.

Bande d'essai à 1 %

En moyenne $\gamma_d = 1,42 \text{ t/m}^3$
et $W = 22,3$

Le CBR correspondant serait égal à 8 %.

Bande d'essai à 2 %

Les mesures, après 8 passes d'engin, ont donné en moyenne :

$$\gamma_d = 1,52 \text{ t/m}^3$$
$$W = 23$$

soit un CBR prévu in Situ de 26 %

Bande d'essai à 4 %

A 8 passes, les caractéristiques moyennes sont :

$$\gamma_d = 1,42 \text{ t/m}^3$$
$$W = 22,6$$

Le CBR est de l'ordre de 33 %

Bande d'essai à 6 %

$$\gamma_d = 1,41 \text{ t/m}^3$$
$$W = 20,8$$

soit CBR de 28 % estimé in Situ.

Toutes ces valeurs sont reportées sur la courbe de la planche 1.

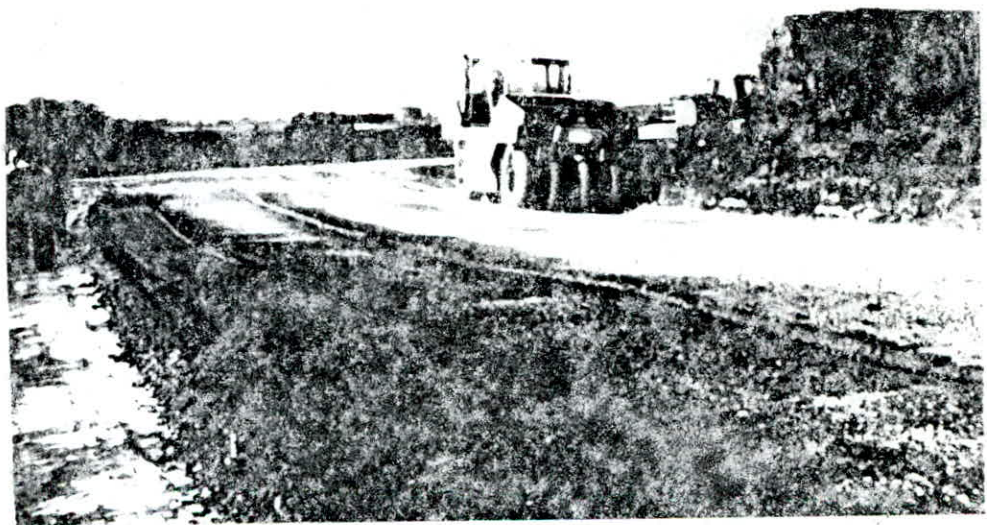
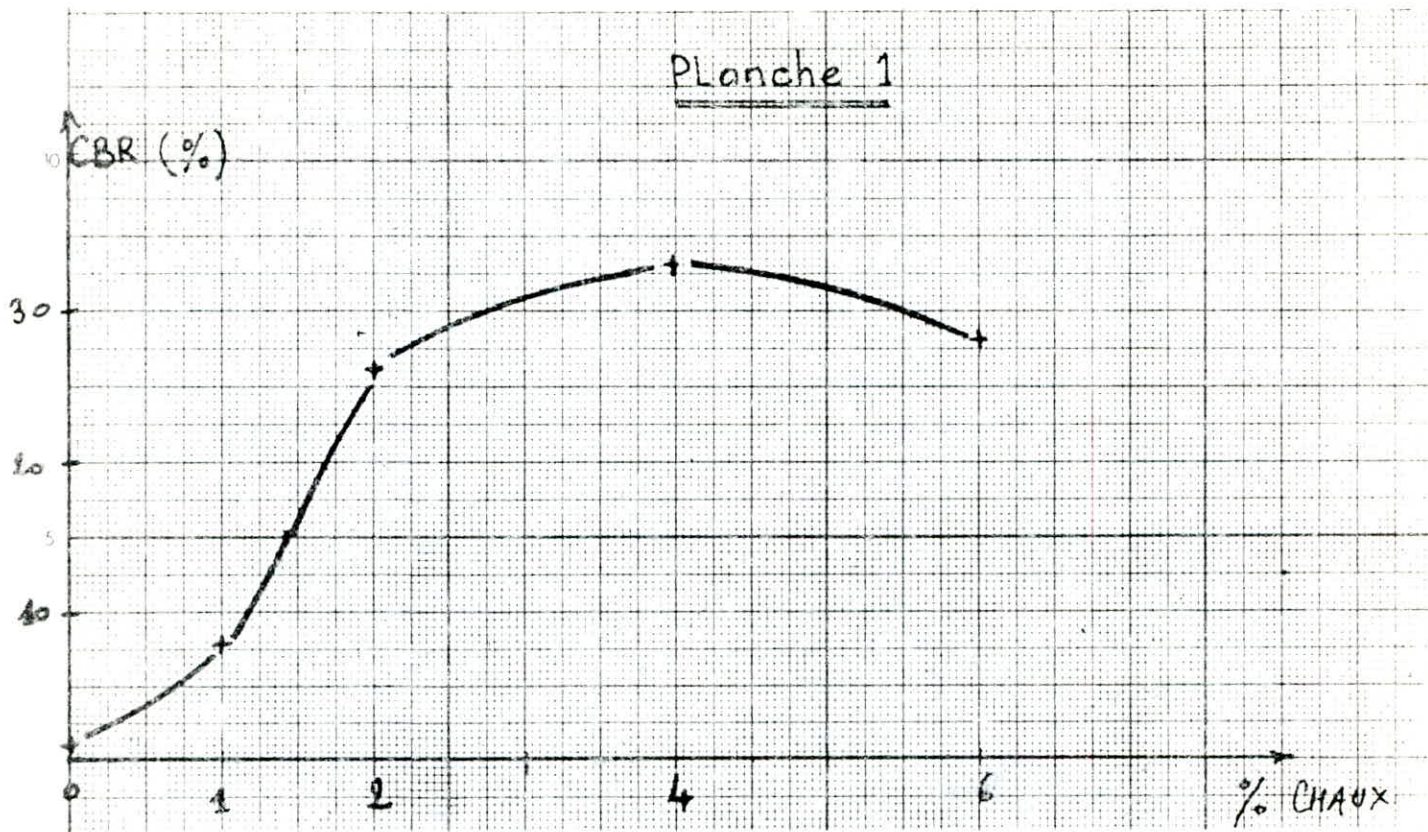


Photo n°6: Compactage des bandes traitées à la chaux.

IV - ESSAIS DE PLAQUES (Photo n° 7)

1 - Réalisation des Essais

Nous avons procédé à deux types d'essais :

Premier type (LCPC)

Plaque de 60 cm de diamètre.

Chargement à 2,5 bars, déchargement et de nouveau chargement à 2 bars.

On note la première déflexion d_1 et la seconde d_2 (en mm)

Deux modules sont alors calculés :

$$EV_1 = \frac{1125}{d_1} \quad \text{et} \quad EV_2 = \frac{900}{d_2}$$

Ces expressions sont tirées de la formule

$$EV = \frac{(1 - \nu)^2}{d} Cf \cdot q \cdot a$$

q = pression en bars

$Cf = 2$ pour une plaque souple

$Cf = \frac{\pi}{2}$ pour une plaque rigide

$\nu = 0,5$

a = rayon de la plaque

On admet que le module élastique du sol est EV_2 en bars.

Il est d'usage de calculer le rapport $K = \frac{EV_2}{EV_1}$

Le choix de la lettre K est d'ailleurs malencontreux. Ce coefficient est souvent confondu avec le module de réaction de Westergaard. Ici ce rapport témoigne d'un bon compactage lorsqu'il est inférieur à 2.

Deuxième type

Plaque de 75 cm

Chargement cyclique à 0,7 bar

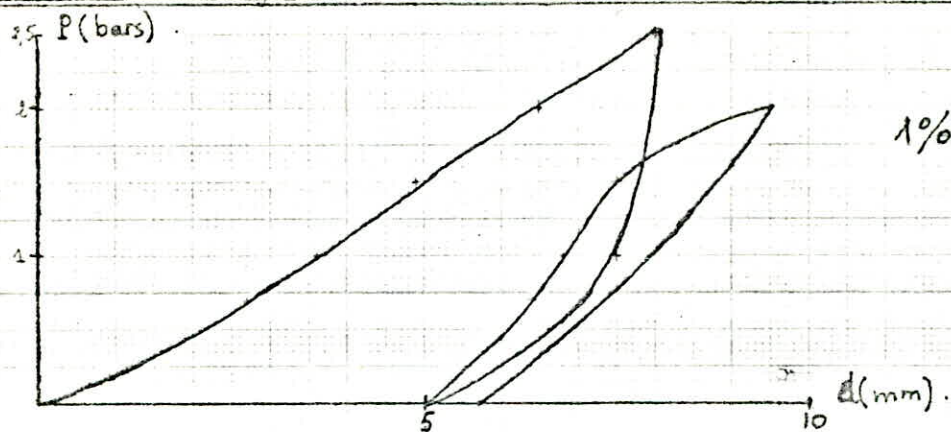
La déflexion obtenue au 2ème ou 3ème cycle est égale à d (en cm)

Le module de réaction de Westergaard est $K = \frac{0,7}{d}$

Le module K est ici en bars/cm.

Ø 60 cm.

25

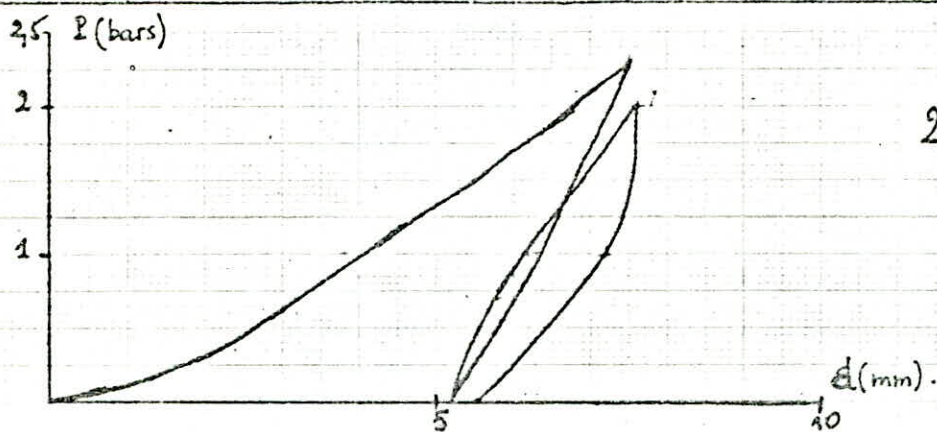


1%

$$EV_1 = 140$$

$$EV_2 = 200$$

$$k = 1,43$$

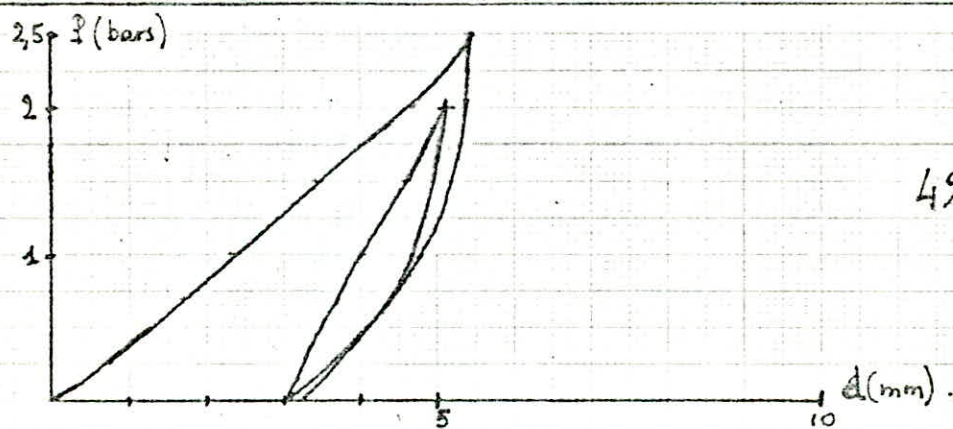


2%

$$EV_1 = 130$$

$$EV_2 = 367$$

$$k = 2,8$$

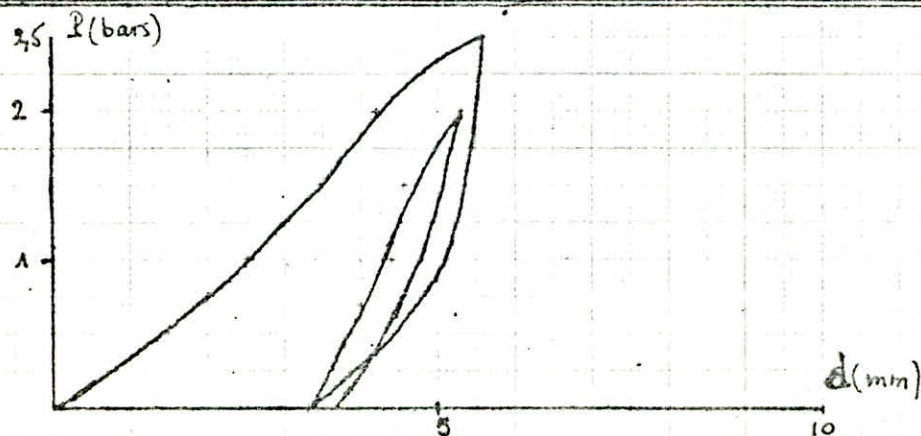


4%

$$EV_1 = 209$$

$$EV_2 = 431$$

$$k = 2,06$$



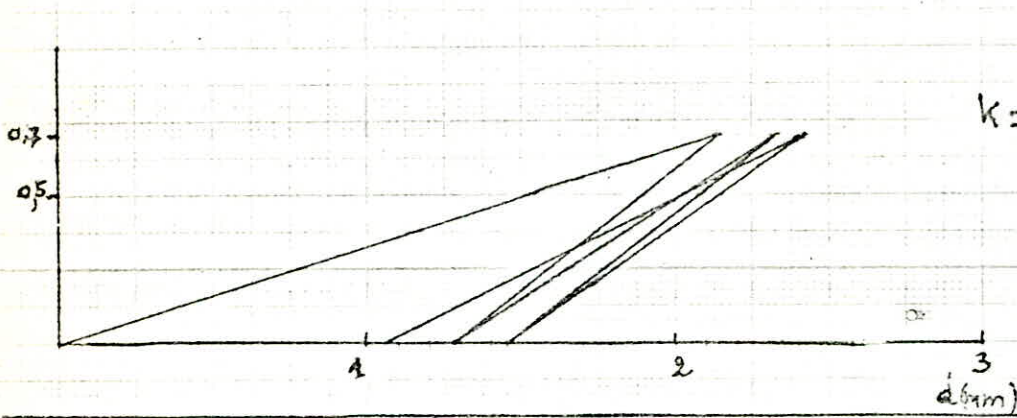
6%

$$EV_1 = 203$$

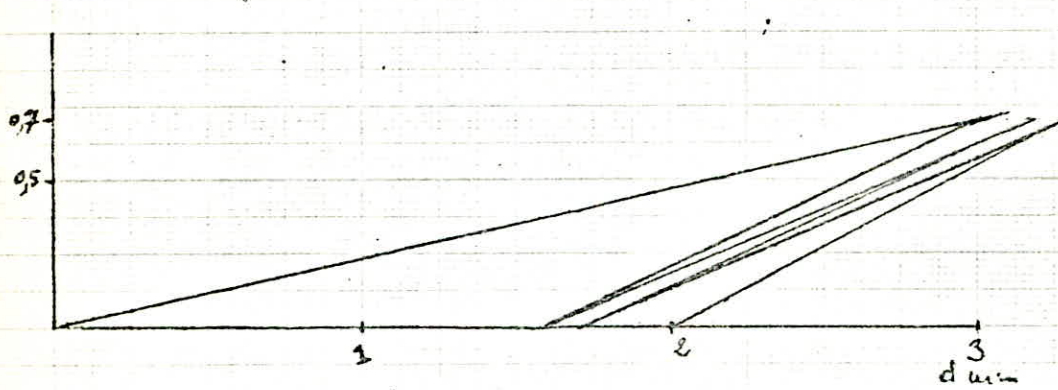
$$EV_2 = 431$$

$$k = 2,12$$

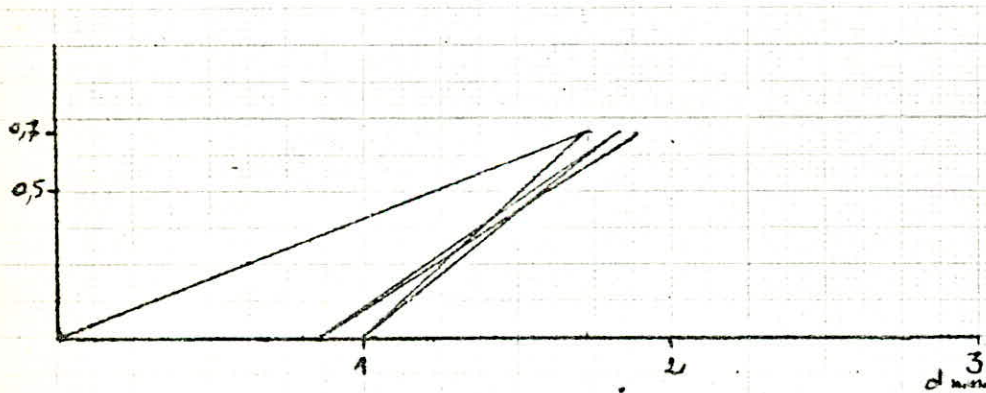
$\phi 75 \text{ cm.}$



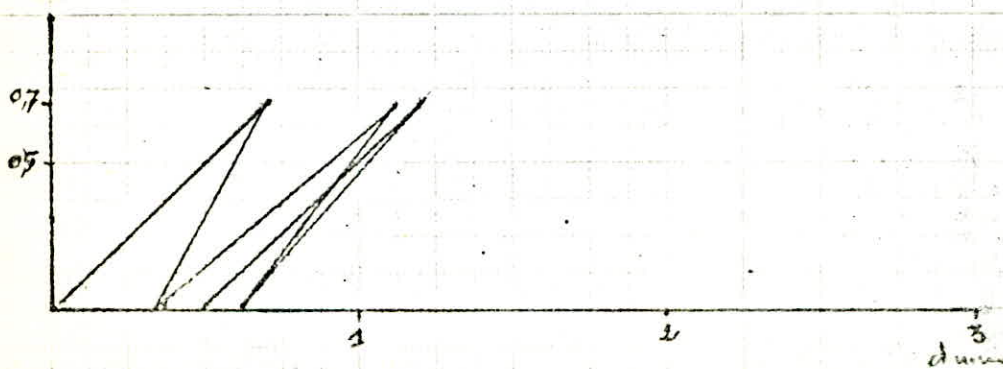
$$K = \frac{0,7}{0,253 - 0,128} = 6,67$$



$$K = \frac{0,7}{0,317 - 0,158} = 4,4$$



$$K = \frac{0,7}{0,188 - 0,086} = 6,86$$



$$K = \frac{0,7}{0,112 - 0,034} = 8,97$$

Pour chaque bande, il n'a été possible de faire qu'un seul essai de chaque type, faute de temps. La météo n'a d'ailleurs pas permis de renouveler ces essais comme nous l'aurions voulu pour apprécier l'évolution dans le temps.

La bande non traitée était impraticable par le camion utilisé pour appliquer une charge sur la plaque. Il a d'ailleurs failli s'y enliser.

Nos essais, n'étant pas assez nombreux, doivent être utilisés avec prudence. Ils permettent cependant de comparer les portances des sols traités à différentes teneurs en chaux.

2 - Résultats

. Plaque de 60 cm de diamètre

Teneur en chaux (%)	1	2	4	6
EV ₂ (bars)	200	367	431	431

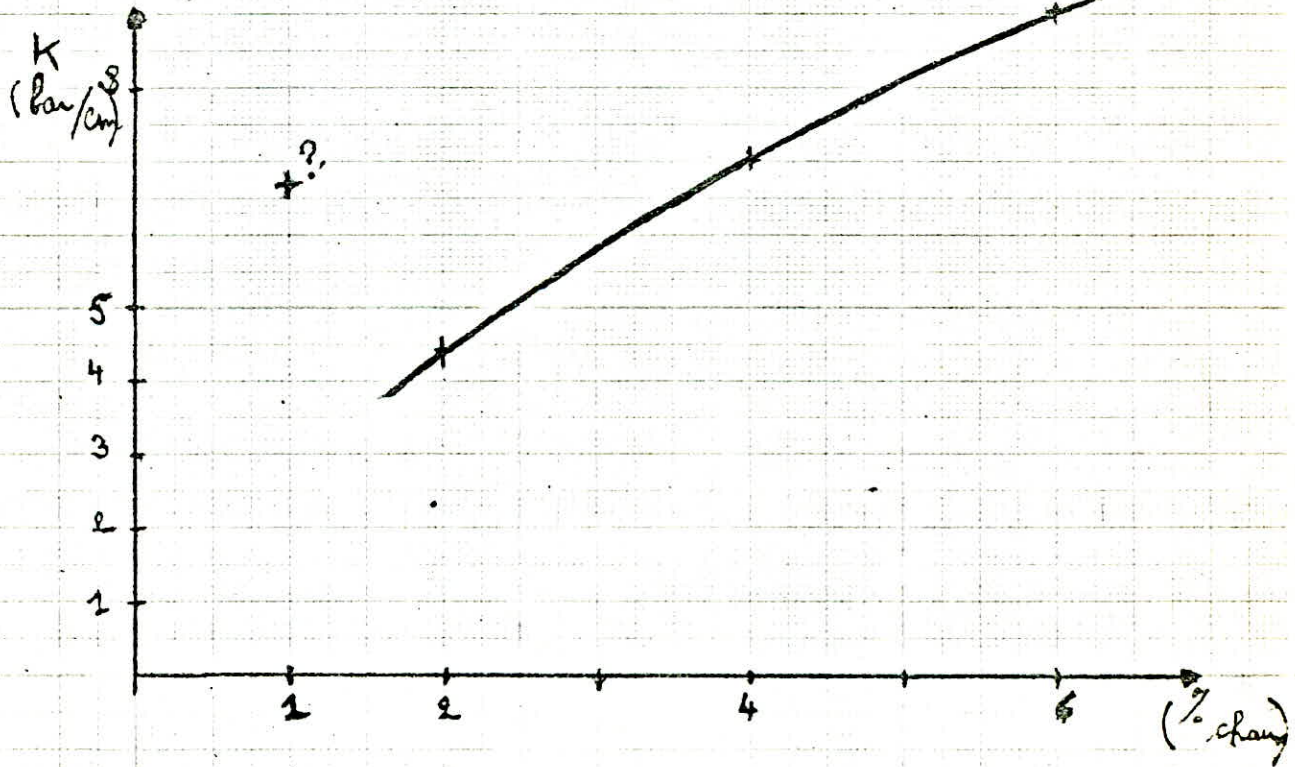
. Plaque de 75 cm de diamètre

Teneur en chaux (%)	1	2	4	6
K (bars/cm)	6,7	4,4	7	9

Ces valeurs ont fait l'objet de deux graphes dans la planche 2.

Pour 1 %, le module de réaction 6,7 semble plutôt anormal.

Planche 2



V - DEFLEXIONS (Photo n° 8 et 9)

1 - Mesures de déflexion

Le déflectographe Lacroix est couramment utilisé en Algérie pour l'auscultation du réseau routier. C'est une des tâches confiées au L.N.T.P. On appelle déflexion la déformation de la chaussée au passage d'un essieu de 13 tonnes. L'essieu est constitué de quatre roues : 2 fois 2 roues jumelées. La déflexion est mesurée entre les deux roues de chacun des jumelages.

Sur route, le camion déflectrographe roule à droite de la chaussée, le jumelage droit, très près du bord de la partie revêtue, provoque les déflexions de rive, le jumelage gauche les déflexions de l'axe. Ces appellations sont valables pour une chaussée de 7 m. Elles sont utilisées néanmoins pour des plateformes de n'importe quelle dimension.

2 - Remarques sur la validité des mesures

Les mesures de déflexion sont rarement réalisées sur des chaussées non revêtues. Au même titre que l'essai de plaque, cet essai voudrait apprécier le module de déformation du sol ou d'un corps de chaussée.

Sur une chaussée revêtue, l'effort est transmis au corps de chaussée par le revêtement (module élevé). Sur un sol naturel non traité, les pressions sont appliquées par les empreintes des deux roues du jumelage. Le passage du camion laisse des traces, des arrières même peu profondes et la mesure de la déflexion se fait sur le bourrelet entre les deux roues. L'effet de poinçonnement l'emporte sur le terrassement, les déflexions sont donc estimées puisqu'il y a refoulement du sol à l'emplacement de mesure.

La mesure de déflexion nécessite que la surface soit à peu près plane. Or, la planche d'essai présente des dénivellés importants. Ceux-ci étaient inévitables. Nous avons voulu que l'épaisseur du sol traité soit constante.

Puisque le sol support était de portance très inégale, malgré un terrassement de décapage irréprochable, les teneurs en eau présentent des écarts importants d'un point à l'autre, le sol réagissant différemment selon la quantité de chaux ajoutée, il aurait été surprenant d'obtenir une surface plane de planche d'essai. Par conséquent, le chariot de support des palpeurs n'était pas stable sur le terrain, ceux-ci ont quelquefois décollé du sol rendant toute mesure impossible.

Lors de l'essai, la bande non traitée était trop plastique pour pouvoir y rouler. Pour la raison évoquée ci-dessus, il a été très difficile pour le chauffeur de maintenir le déflectrographe selon l'axe des planches.

3 - Commentaires

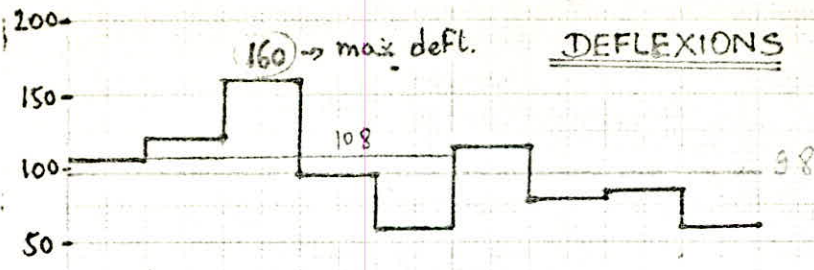
On trouvera les valeurs obtenues sur la planche ci-jointe. En ordonnées verticales, on peut lire la déflexion en centième de MM. En abscisse, la distance parcourue par le camion sans échelle particulière (une mesure tous les 3 m environ).

Les mesures les plus représentatives ont été obtenues dans les premiers mètres (camion à peu près dans l'axe des planches).

Compte tenu de toutes les remarques faites plus haut concernant la validité des mesures, on retiendra les valeurs suivantes en fonction de la teneur en chaux.

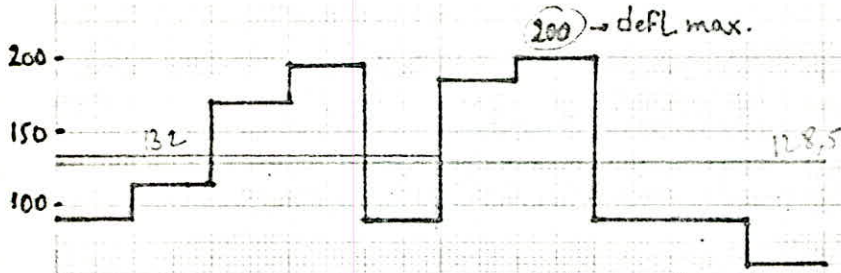
Teneur en chaux	déflexion en centième de mm
1 %	200
2 %	135
4 %	122
6 %	108

Signalons que le maximum exigé pour une plateforme de sol naturel serait de 200 mm/100 d'après la RTR (déjà citée). Au delà, on recommande de traiter le sol.

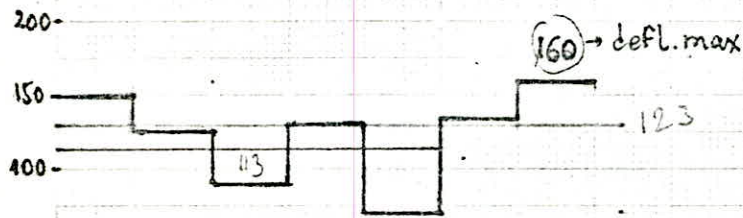


PASSE 1 ROUE D.
67.

(34 m)

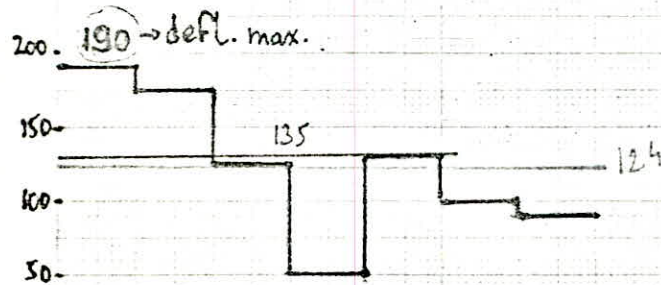


PASSE 1 ROUE G
49.

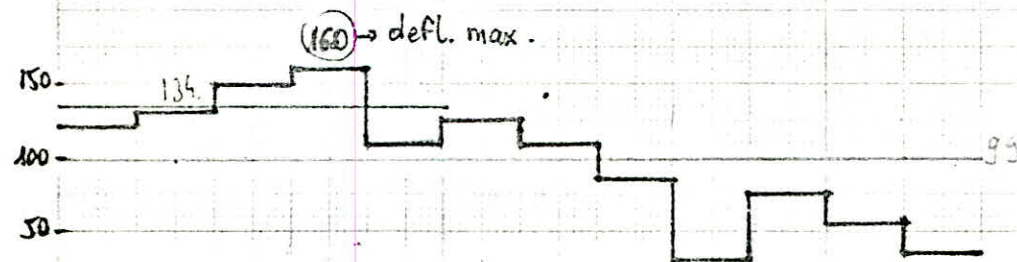


PASSE 2 ROUE D
49.

(24 m)

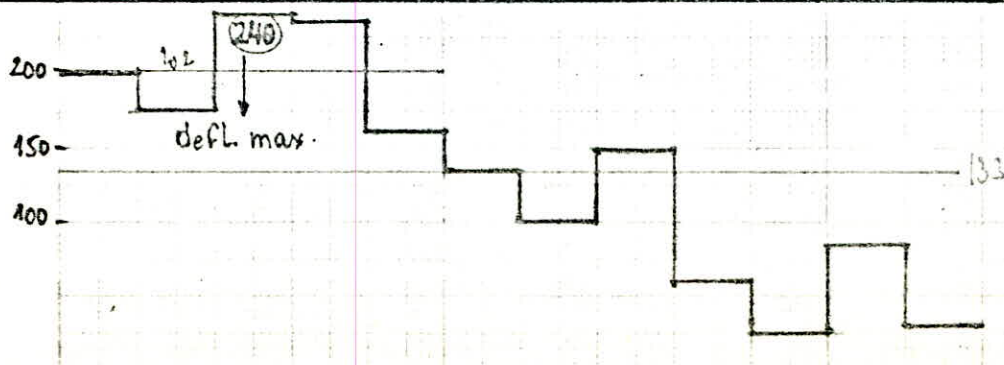


PASSE 3 ROUE G
29.



PASSE 4 ROUE D
27.

34 m



PASSE 4 ROUE G
17.

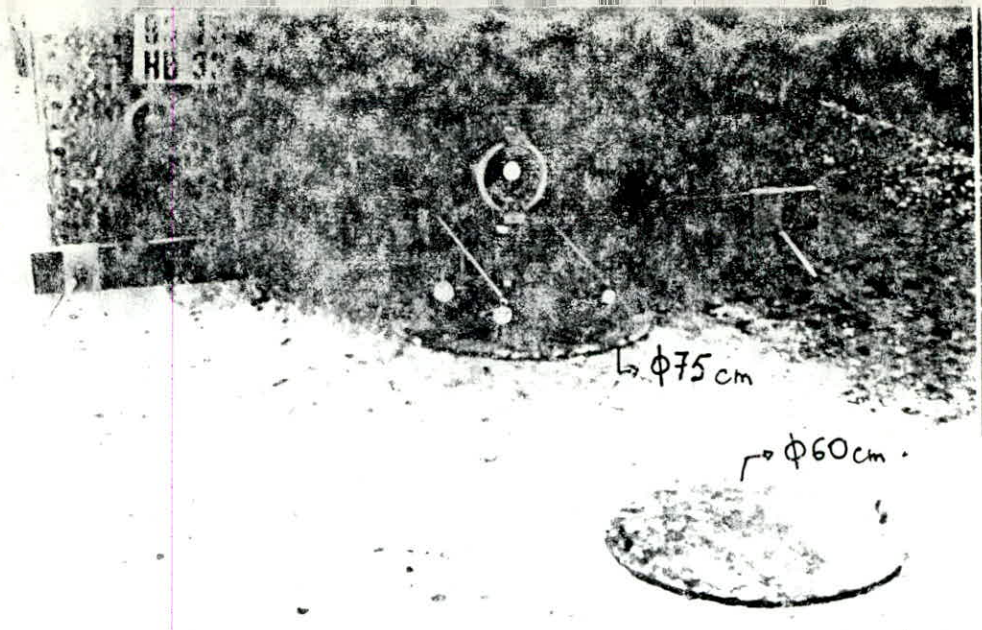


photo n°7 : Essais à la plaque.

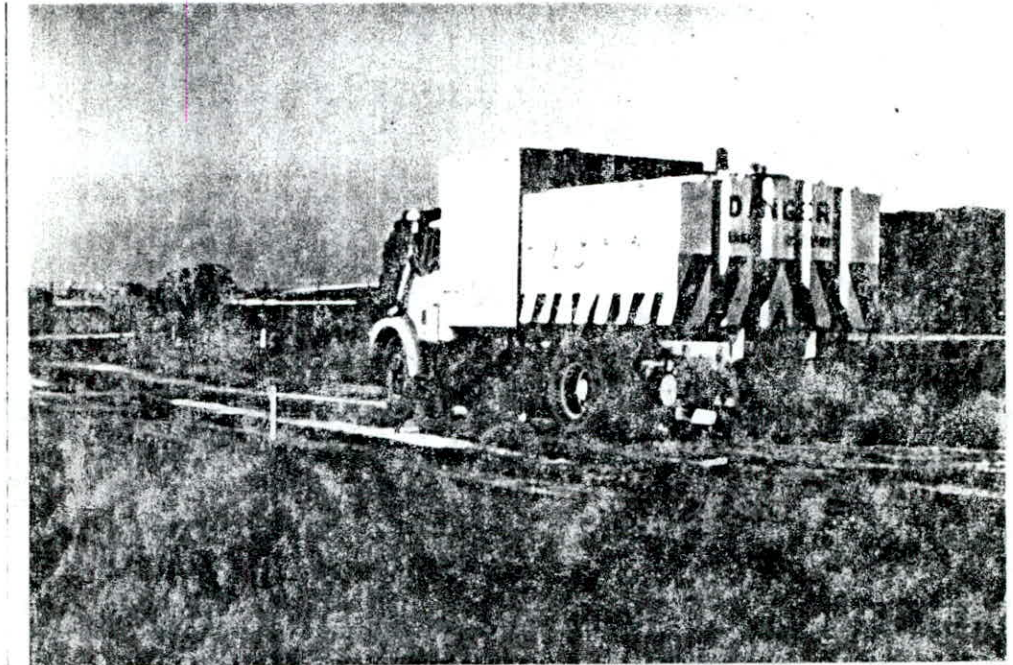


Photo n°8 : Le Deflectographe Lacroix

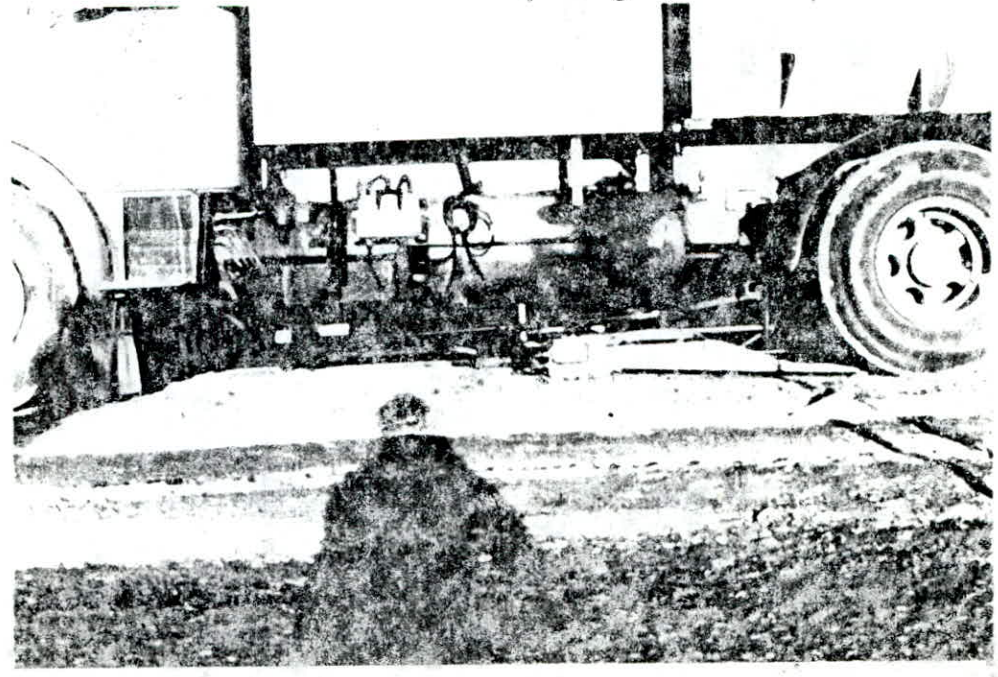


Photo n°9 : Dispositif de mesure de la deflexion

VI - CORRELATION ENTRE ESSAIS

1 - Interprétation des essais de plaque

a) Méthode

Les modules mesurés à la plaque de 60 cm ou à celle de 75 cm sont fonction des performances du mélange sol + chaux mais aussi de l'épaisseur de la couche traitée. L'importance de l'épaisseur dans la détermination du module est fonction du rapport épaisseur/rayon de la plaque.

Il existe des abaques calculés par ODEMARK qui permettent de calculer la déflexion d'une plaque chargée appliquée sur une couche de sol rapportée sur le terrain naturel.

Les paramètres utilisées sont la charge, le rayon de la plaque, les modules E_1 de la couche de sol et E_2 du terrain naturel. Les formules de PALMER et BARBER (Bulletin de liaison du LCFC n°125), introduites en calculatrice programmable, permettent de se dispenser des abaques et d'effectuer rapidement de nombreux essais.

b) Résultats

Connaissant l'ordre de grandeur du module E_2 (environ 100 bars), l'épaisseur de la couche (30 cm), la déflexion obtenue aux essais de plaque "d" on peut par tâtonnement en déduire E_1 et ceci dans les deux essais à dimension et charge différentes.

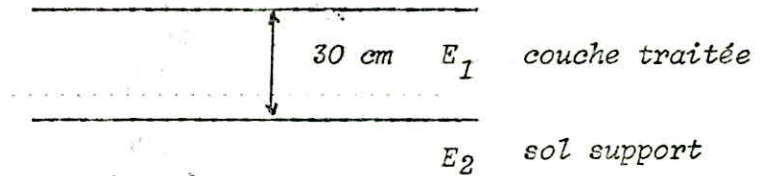
On a obtenu les résultats suivants :

diamètre 60 cm

chaux	d	E_2	E_1
1 %	4,5 mm	100 bars	880 bars
2 %	2,45 mm	100 bars	5249 bars
4 %	2,09 mm	100 bars	8350 bars
6 %	2,09 mm	100 bars	8350 bars

diamètre 75 cm

chaux	d	E ₂	E ₁
1 %	1,45 mm	287 bars	881 bars
2 %	1,59 mm	74 bars	5256 bars
4 %	1,02 mm	114 bars	8349 bars
6 %	0,78 mm	170 bars	8336 bars



Pour la plaque \varnothing 60, on s'est fixé E₂ à 100 bars

Cette valeur était celle obtenue par l'entreprise lors d'essai de plaque sur sol naturel.

D'autre part avec le CBR = 1 estimé in Situ, on peut en déduire

$$E = K.CBR \quad \text{avec } K = 100 \text{ pour CBR inférieur à } 10 \\ \text{et } K = 50 \text{ au delà}$$

$$\text{soit } E = 100 \times 1 = 100 \text{ bars}$$

(formule retenue par le LCPC pour les sols supports)

On a donc calculé E₁ avec E₂ = 100.

Pour la plaque \varnothing 75, on a pris E₁ tel que calculé ci-dessus et on en a déduit E₂ du sol support. Les valeurs de module du sol obtenues sont tout à fait admissibles.

2 - Choix d'une épaisseur de couche traitée

On peut utiliser les formules de PALMER et BARBER pour voir l'influence de l'épaisseur de la couche traitée sur le module obtenu à la plaque.

./.

En définitive, on peut poser le problème ainsi :

Pour un pourcentage donné de chaux, sur quelle épaisseur faut-il traiter pour obtenir un certain module, par exemple 500 bars.

Les calculs ont été faits avec les modules suivants $E_2 = 100$ bars
et E_1 (1 %) = 880 bars
 E_1 (2 %) = 5250 bars
 E_1 (4 %) = 8350 bars.

On a tracé deux familles de courbes :

- . Module apparent EV_2 (plaque 60 cm $q = 2$ bars)
- . Module de réaction K (plaque 75 cm $q = 0,7$ bar)

On peut lire sur ces courbes que si on désire obtenir un module EV_2 de 500 bars, il faut soit 150 cm de sol traité à 1 % de chaux, soit 43 cm de sol traité à 2 %, soit 35 cm de sol traité à 4 %.

De même pour obtenir un module de réaction de 8 bars/cm, il faut soit 150 cm de sol traité à 1 % de chaux, soit 47 cm de sol traité à 2 %, soit 39 cm de sol traité à 4 %.

3 - Interprétation des mesures de déflexion (planches 3 et 4)

Les abaques bicouche du programme ALIZE III du LCPC permettraient d'estimer les modules E_1 de la couche traitée ou E_2 du sol support. La planche 100 donne le produit de la déflexion à l'autre jumelage (en centième de mm) par le module E_2 en fonction du rapport E_1/E_2 et pour différentes épaisseurs de couche traitée.

En optant pour $E_2 = 100$ bars, une déflexion comme celle obtenue pour 6 % de chaux, de 108 mm/100. $E_2 \times d = 10\ 800$

Sur l'abaque pour $h = 30$ cm, on obtient par extrapolation des courbes : $E_1/E_2 = 2\ 000$ soit $E_1 = 200\ 000$ bars ce qui est certainement impossible.

En prenant les valeurs de module calculées pour les essais de plaque
 par exemple: $E_2 = 100 \text{ bars}$ $E_1 = 8350 \text{ bars}$ $E_1/E_2 = 83,5$

$$E_2 \times d = 29\ 000 \quad \text{soit } d = 290 \text{ mm}/100$$

ou bien $E_2 = 100 \text{ bars}$ $E_1 = 880 \text{ bars}$ $E_1/E_2 = 8,8$

$$E_2 \times d = 58\ 000 \quad \text{soit } d = 580 \text{ mm}/100.$$

Ces valeurs sont beaucoup plus conformes à la réalité. Nous avons déjà écrit que les déflexions étaient sous-estimées pour les raisons invoquées plus haut.

4 - Correlation CBR Module de déformation

La formule $E = K.CBR$ ne paraît pas adaptée aux sols traités à la chaux.

Avec E en bars - CBR en % $K = 100$ pour CBR < 10
 $K = 50$ pour CBR > 10

On aurait avec les CBR évalués in Situ à partir des densités et teneurs en eau :

Teneurs en chaux	CBR	$E = K.CBR$	E_2 calculé
0 %	1	100	100 (mesuré)
1 %	8	800	880
2 %	26	1300	5249
4 %	33	1650	8350
6 %	28	1400	8350

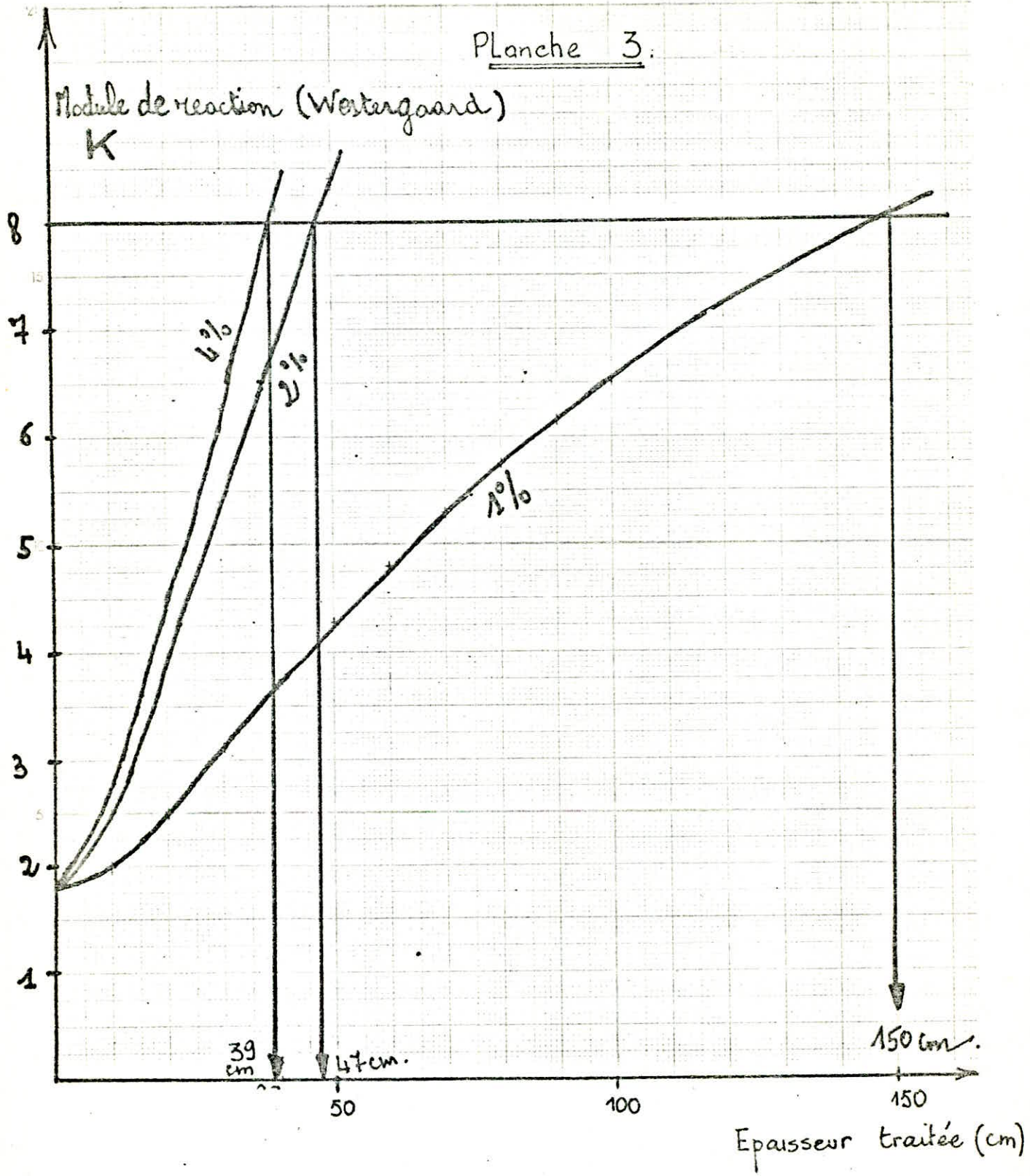
Si cette formule reste valable pour un sol naturel, elle se révèle trop pessimiste pour les sols traités.

Nous pensons que si l'essai CBR permet une optimisation du pourcentage de chaux, il ne permet pas d'en déduire les modules des sols traités en place. Les essais de traction sur éprouvettes cylindriques (essai brésilien) seraient plus adéquats.

./.

Planche 3.

Module de réaction (Westergaard)
K



Chaux 1 %

$$E_1 = 880$$

$$E_2 = 100$$

$$a = 0,75/2$$

K

$h = 10$	2
$h = 20$	2,51
$h = 30$	3,1
$h = 40$	3,7
$h = 50$	4,27
$h = 60$	4,8
$h = 70$	5,29
$h = 80$	5,74
$h = 90$	6,15
$h = 100$	6,53
$h = 150$	8,07

Chaux 2 %

$$E_1 = 5250$$

$$E_2 = 100$$

$$a = 0,75/2$$

K

$h = 10$	2,49
$h = 20$	3,88
$h = 30$	5,39
$h = 40$	6,91
$h = 50$	8,40

Chaux 4 %

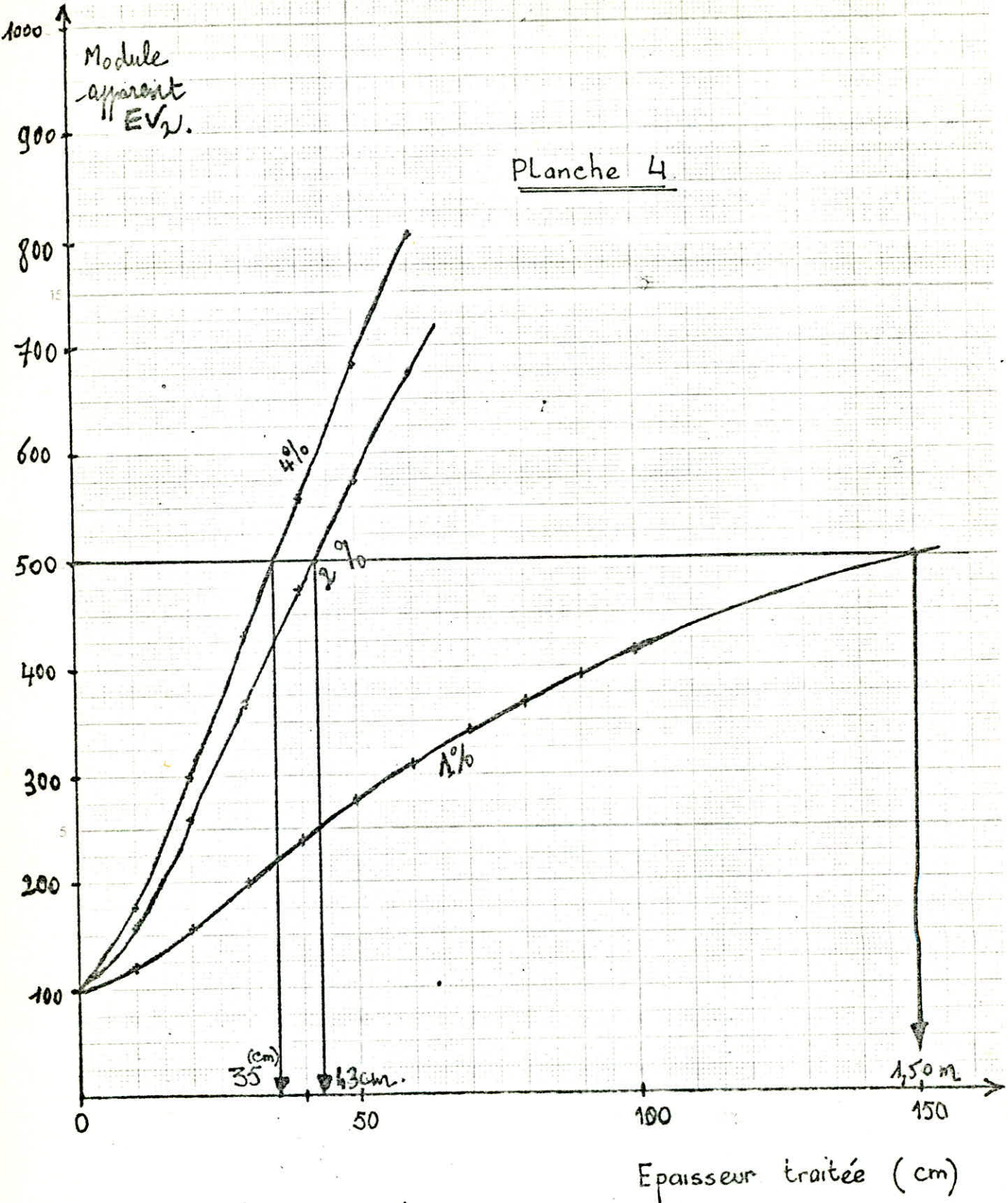
$$E_1 = 8350$$

$$E_2 = 100$$

K

$h = 10$	2,71
$h = 20$	4,43
$h = 30$	6,27
$h = 40$	8,11

Planche 4



Chaux 1 %

$$E_1 = 880$$

$$E_2 = 100$$

$$a = 0,30$$

$$h_1 = 0,30$$

200 bars

	EV_2
$h = 0,10$	118,5
$h = 0,20$	157,6
$h = 0,40$	240,2
$h = 0,50$	277,0
$h = 0,60$	310,3
$h = 0,70$	340,4
$h = 0,80$	367,6
$h = 0,90$	392,3
$h = 1,0$	414,8
$h = 1,50$	502,3

Chaux 2 %

$$E_1 = 5250$$

$$E_2 = 100$$

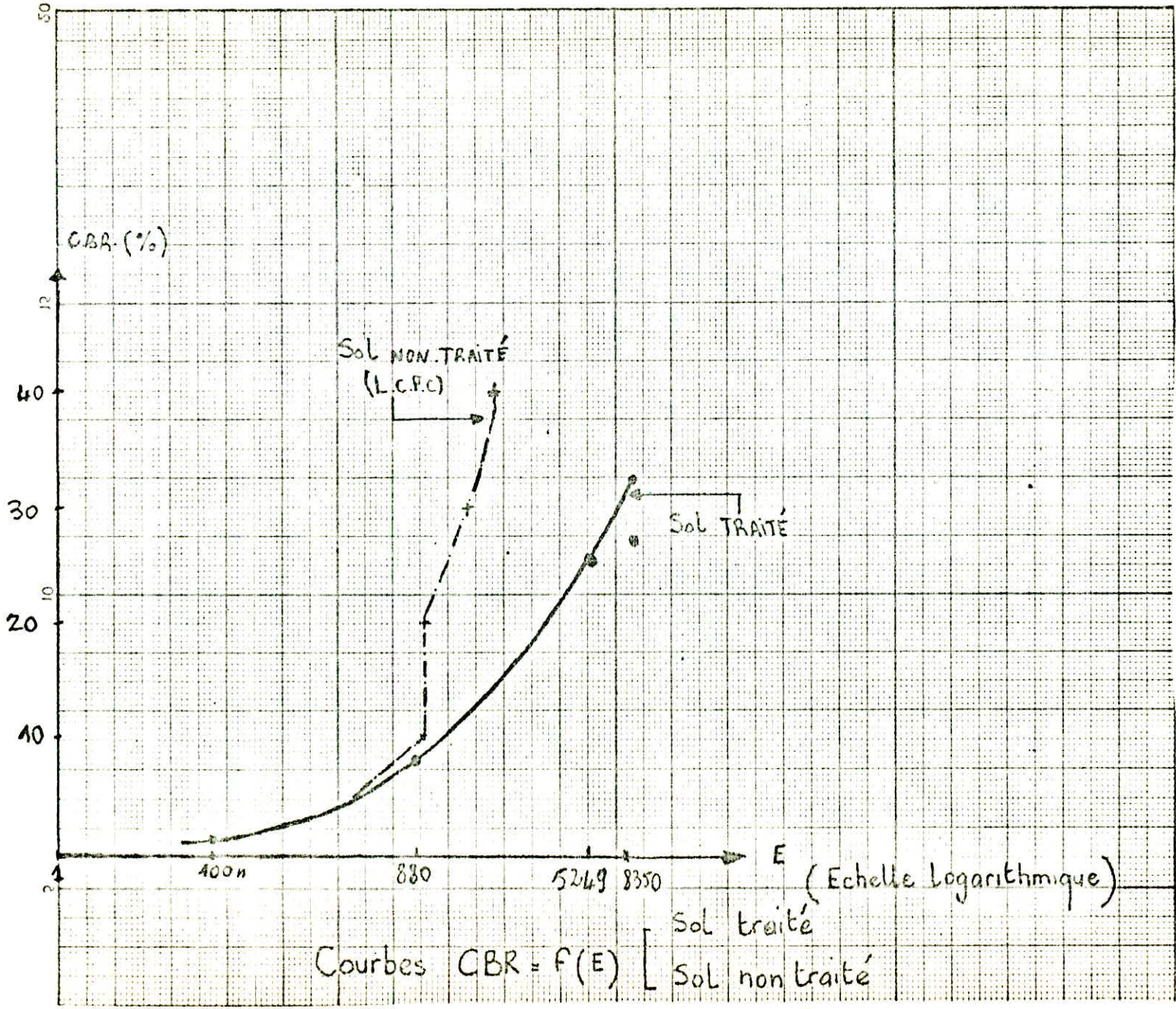
$h = 0,1$	158
$h = 0,2$	260
$h = 0,3$	367
$h = 0,4$	472
$h = 0,5$	573,9
$h = 0,6$	671,7

Chaux 4 %

$$E_1 = 8350$$

$$E_2 = 100$$

$h = 0,1$	175,1
$h = 0,2$	300,6
$h = 0,3$	430,4
$h = 0,4$	558,4
$h = 0,5$	683,3
$h = 0,6$	804,7

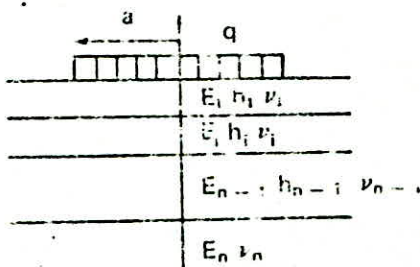


Courbes CBR = F(E) [Sol traité
Sol non traité

CAS DU MULTICOUCHE :

Formule de Palmer et Barbet généralisée [4]

- La charge sur la chaussée est schématisée par une pression uniforme q appliquée sur une aire circulaire de rayon a .
- La chaussée est composée de $n - 1$ couches horizontales d'épaisseur h_i , de module d'Young E_i et de coefficient de Poisson ν_i , tous égaux à ν qui surmontent un massif semi-infini de caractéristiques mécaniques E_n et ν .



La déflexion au centre de la charge est donnée par :

$$v_0 = \frac{2qa(1 - \nu^2)}{E_n} \left[\frac{1 - E_n/\bar{E}}{\left(1 - \left[\frac{h_1 + \dots + h_{n-1}}{a}\right]^2 \cdot \left[\frac{\bar{E}}{E_n}\right]^{2,3}\right)^{1/2}} + \frac{E_n}{\bar{E}} \right] \quad (4)$$

avec :

$$\bar{E} = E_n \left[\frac{h_1 + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} + \dots + h_{n-1} \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} \right]^3 \quad (4a)$$

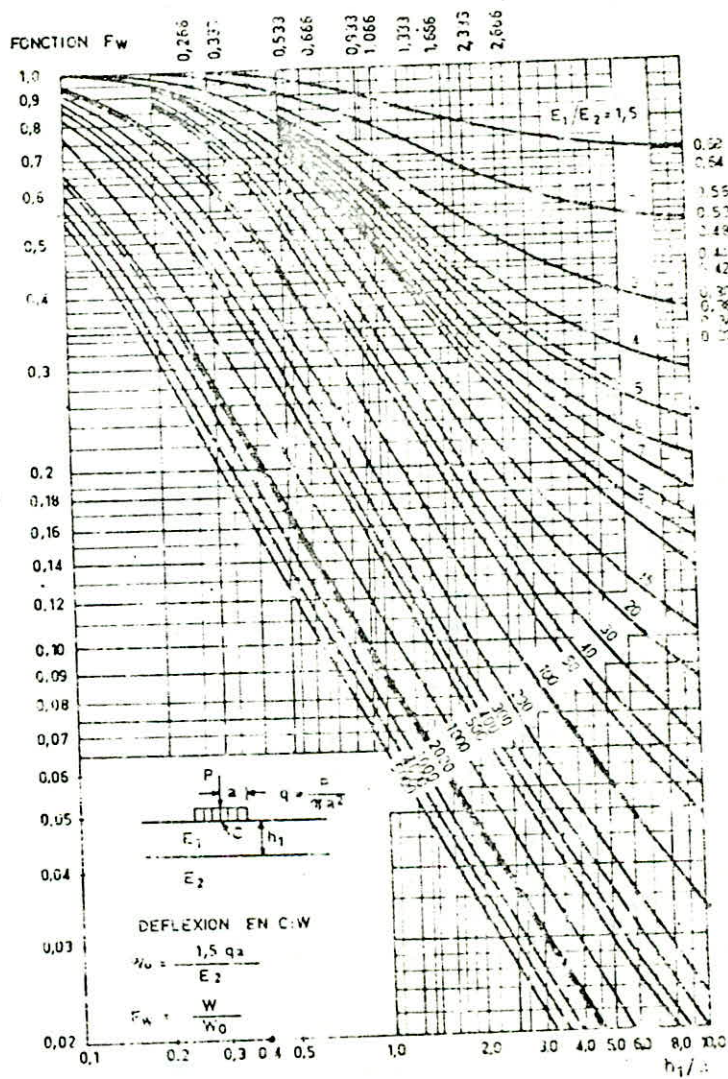
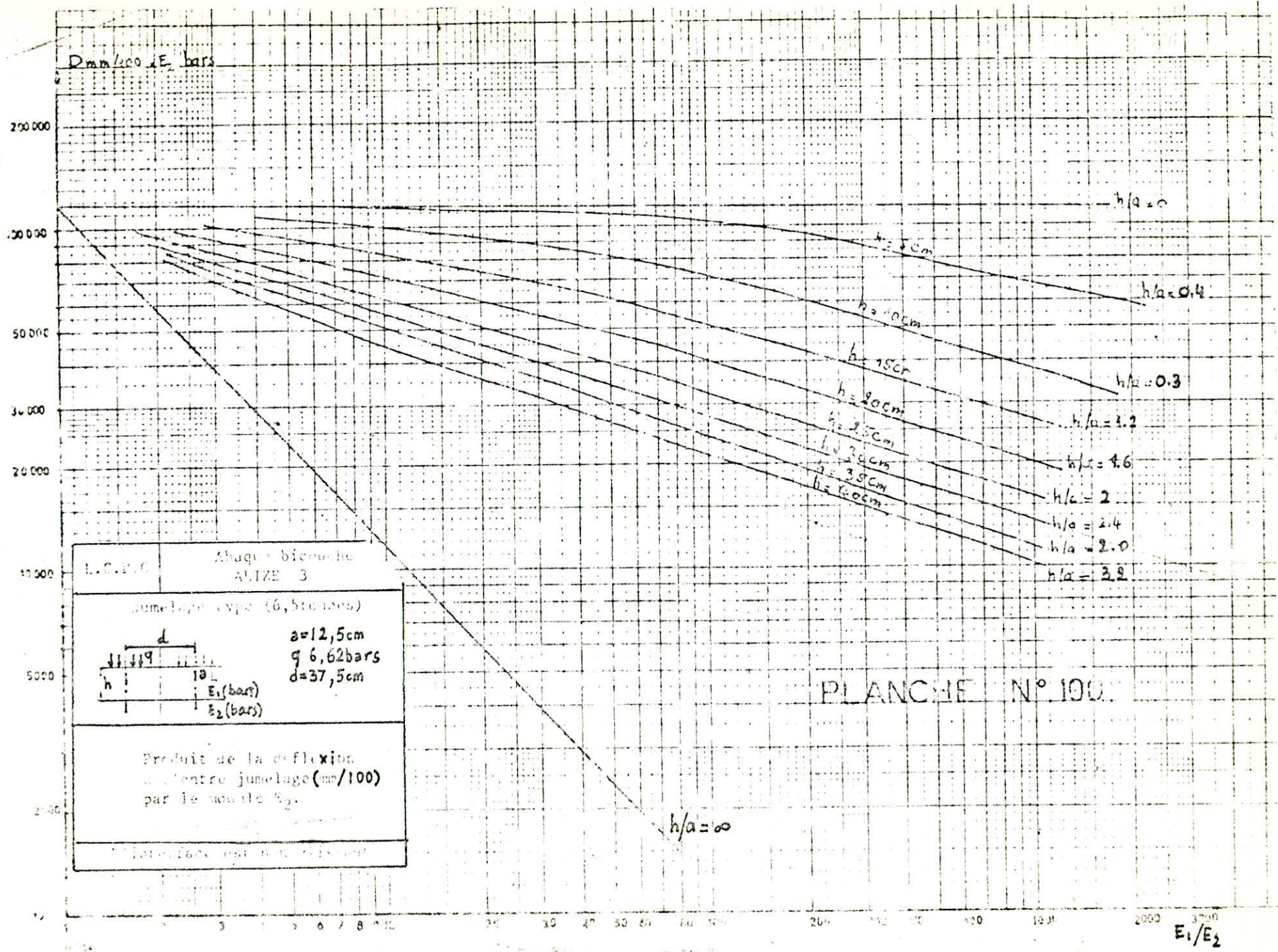


FIG. VI.10. — Abscisse d'O.emark pour le calcul de la déflexion dans une monocouche sur un sol homogène.



CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSION GÉNÉRALE

Pour les sols non traités, le dimensionnement de la chaussée peut se faire à partir des CBR (Normes Américaines).

Alors que pour les sols traités, on remarqué que l'essai CBR était peu significatif pour pouvoir conclure sur le dimensionnement de la chaussée (cf. 3ème partie $CBR = f(E)$).

Donc pour les sols traités, pour pouvoir dimensionner la chaussée il est nécessaire de confectionner une planche d'essai expérimentale et procéder à des essais de plaque (Module de Réaction K).

Néanmoins l'étude des CBR au Laboratoire nous donne le pourcentage de chaux à utiliser sur le chantier (taux de chaux optimal de 4 % obtenu au Laboratoire se retrouve sur la planche d'essai).

Il faudrait noter que l'essai CBR étant empirique ne nous donne qu'un bref aperçu sur les performances que pourrait atteindre les sols traités à la chaux, pour cela des essais de résistance à la compression simple nous paraissent plus significatifs bien que n'étant pas préconisés par le RTR.

Les performances atteintes par l'ajout de chaux sur le sol étudié (argile Illitique) dont à notre avis plutôt réduites (l'Illite étant une argile peu réactive) mais une étude des effets à long terme avait sans aucun doute donné des résultats plus performants. Une autre argile (Montmorillonite par exemple) aurait réagi plus rapidement en donnant des résultats meilleurs (le travail de LEROUX dans "Traitement des argiles à la chaux" le souligne bien).

Lors de la confection de la planche d'essai expérimentale, il n'y avait pas lieu de compacter le sol naturel (bande à 0 % de chaux) car ce compactage n'eut aucun effet sur sa portance (aucune mesure n'a été faite sur cette bande car une petite pluie a rendu impraticable cette partie de la planche)

Pour diminuer l'erreur sur l'évaluation des teneurs en eau après traitement, il aurait mieux fallu prendre la teneur en eau par rapport au sol + chaux (la chaux étant un matériau sec ajouté).

En conclusion, l'amélioration par traitement des sols fins à la chaux est bien mise en évidence par notre étude bien que n'étant qu'une ébauche sur un domaine qui peut être développé par d'autres études plus approfondies. Le traitement des sols à la chaux pourrait être développé vue l'importance du nombre de zones touchées par ce genre d'opération dans le nord du pays.

La chaux étant le matériau principal du traitement, pour promouvoir ce genre de traitement en Algérie, il faudrait encourager l'implantation d'usines de chaux qui viendront renforcer une production assez limitée dans notre pays.

Les sites de matériaux susceptibles d'être utilisés en couche de forme et remblai sont déjà surexploités, que ce soit en tout venant, en sable ou en tuff. Dans la région d'Alger, on ne sait plus où jeter les matériaux de déblai argileux ou marneux difficile à réutiliser. L'intérêt énorme du traitement à la chaux réside dans la possibilité d'améliorer les sols jugés inaptes et de conserver les bons matériaux à d'autres usages (couches de fondation, couches drainantes, graves bitumes ou liton...). Ceux-ci viendront, probablement eux aussi à manquer et il n'est pas interdit d'imaginer que dans un proche avenir, on devra aussi penser à les remplacer par des matériaux traités.

(I-) N N E X E

MODIFICATION DES TENEURS EN EAU.

(Explication.)

1	-	Expérience	-----	p 1
2	-	Résultats	-----	p 1
3	-	Hypothèses retenues.	-----	p 2
4	-	Vérification des hypothèses.	-----	p 2
		a)	Expérience n° 1	
		b)	Expérience n° 2	
		c)	conclusion.	
5	-	Détermination d'1 coefficient de diminution des teneurs en eau. "K".	-----	p 3

MODIFICATIONS DES TENEURS EN EAU. (Explication).

Aux vus des modifications de teneurs en eau après ajout de chaux et malawage on a dans un premier temps, voulu connaître, la teneur en eau de la chaux :

1) Expérience : On met à l'étuve à 50 °c 1 kg de chaux après 48 h environ on constate une augmentation notable du poids; le même phénomène se répète après passage à l'étuve à 100 °C.

2) Résultats.

On a noté la variation de poids de la chaux en fonction du temps pour deux échantillons (gamelle 1 et 2) .

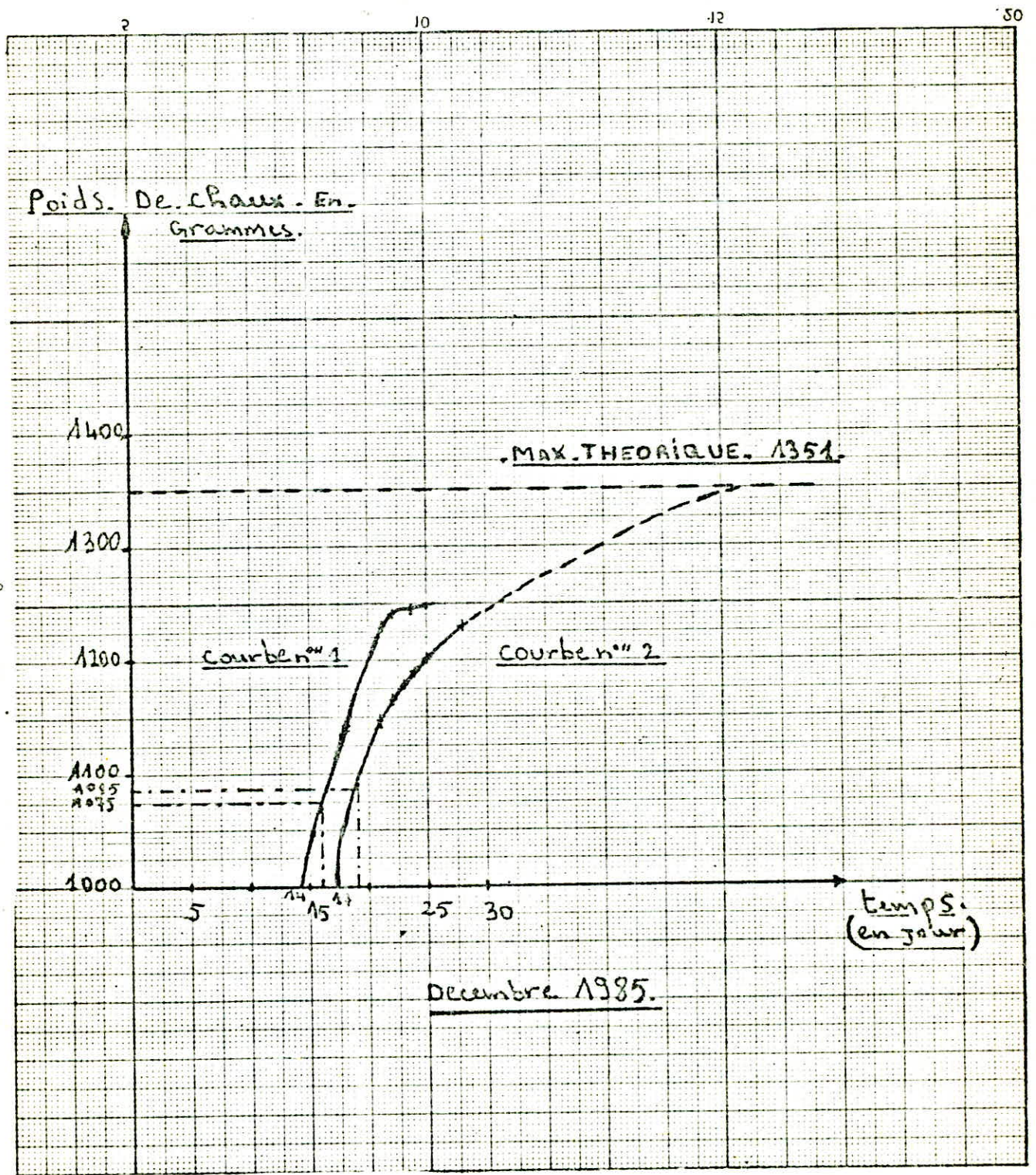
Première gamelle :

		P.H	P.T		T. (° C)
17/12/85	11 h	1743	743	1000	50 °C
21/12/85	11 h 15	1890	743	1147	50 °C
22/12/	9 h 30	1905	"	1162	50 °C
22/12	17 h	1510	"	1167	100 °C
23/12	11 h	1924	"	1181	100 °C
23/12	15 h	1926	"	1183	"
24/12	9 h 30	1935	"	1192	"
24/12	15 h 26	1938	"	1195	"
25/12	8 h 52	1947	"	1204	"
28/12	16 h 50	1974	"	1231	"

{ P.T. Poids de la tare.
P.H. " humide
T : Température.

Deuxième gamelle :

14/12	16 h	1814	814	1000	50 °C
18/12	16 h	1957	"	1143	50 °C
21/12	11 h 15	2045	"	1231	50 °C
22/12	9 h 30	2055	"	1241	50 °C
22/12	17 h	2054	"	1240	100 °C
23/12	11 h	2057	"	1243	100 °C
23/12	15 h	2058	"	1244	100 °C
24/12	9 h 27	2058	"	1244	100 °C
24/12	15 h 27	2060	"	1246	100 °C
25/12	8 h 52	2060	"	1246	100 °C

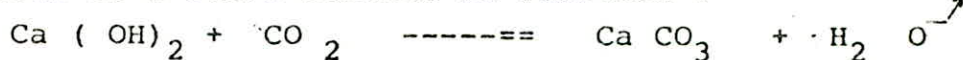


3) Hypothèses retenues.

Les variations de poids du matériau chaux peuvent s'expliquer de 2 façons :

a) la chaux utilisée n'est pas totalement éteinte au contact de l'air humide, elle fixe les molécules d'eau et augmente de poids (phénomène d'extinction de la chaux).

b) Un phénomène de mécarbonatation se produit à l'intérieur de l'étuve suivant la réaction :



4) Verification des hypothèses :

Deux expériences ont été faites.

Expérience 1.

Expérience 2.

Expérience n° 1

On a mis 50 g de chaux dans un système adiabatique (thermos). on ajoute de l'eau on rebouche et à l'aide d'un thermomètre on mène l'élévation de température, après une attente d'1/2 heure. On constate que la température ne varie pas.

On observe plutôt une légère diminution de la température dû à l'ajout d'eau. ===== la chaux est bien éteinte.

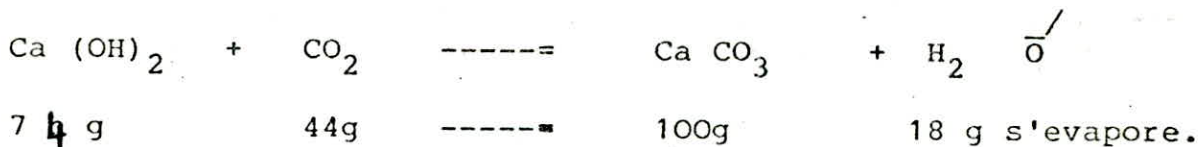
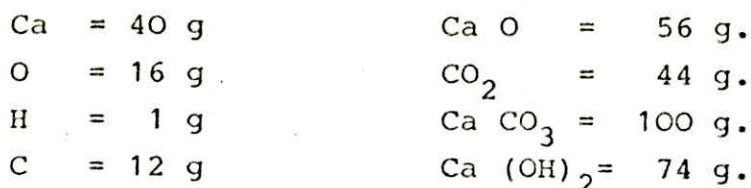
Expérience n° 2

On a procédé à une vérification simple on met 1000 g de chaux à l'étuve sous vide (c'est à dire sans présence de CO₂). On constate après 48 h à une température de 100 °C que le poids ne change pas.

c) Conclusion.

La deuxième expérience est très concluante on pourrait donc attribuer l'augmentation du poids à une carbonatation de la chaux.

Ce phénomène se produit suivant la réaction :



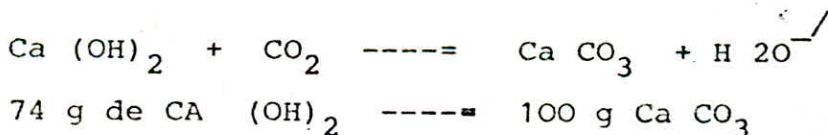
Soit 1000 g de Ca (OH)₂ ----- 1351 g de CaCO₃.

5) Détermination d'un coefficient de diminution des teneurs.

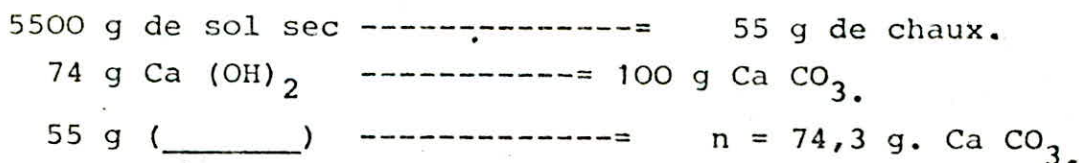
Il existe une récarbonatation de la chaux ce qui a une répercution sur les teneurs en eau.

Parmis le problème déjà citer sur la mesure de la teneur en eau on essayera d'établir un coefficient de diminution "K " qui tient compte de l'erreur systématique commise vu la mesure des teneurs en eau lorsqu'on procède par etuvage normal, donc on ne peut éviter le phénomène de récarbonatation.

- Calcul du coefficient "K".



pour 1 % de chaux :



pour 18 % d'eau : ----- 5500 g ----- 330 g d'eau.

55 Ca (OH) ₂
390g H ₂ O
5500 g Sd Sec.

6545 g

743 Ca CO ₃
Og H ₂ O
5500g.

5574,3g.

après etuvage
48 h.

$$6545 - 5574,3 = \underline{\underline{970,7 \text{ g d'eau.}}}$$

Remarque : ici on presume qu'après 48 h d'etuvage H₂O s'évapore totalement et que Ca (OH)₂ se transforme en Ca CO₃ totalement. La réaction à le temps et le CO₂ nécessaire pour se réaliser.

$$\begin{array}{l} 990 \text{ g} \quad \text{-----} = 18 \% \text{ H}_2 \text{ O.} \\ 970,7 \text{ g} \quad \text{-----} = \underline{\underline{n = 17,65 \%}} \end{array}$$

On constate que lors de la mesure on a des valeurs inférieures à ceux qu'on devait trouver. Cette erreure (recarbonatation de la chaux) pouvait être évité par un autre moyen de mesure de teneur en eau.

Seulement pendant 40 h on remarque selon (gamelle 1 et 2) que la chaux éteinte n'a pas le temps de se recarbonater.

à t : 48 h :

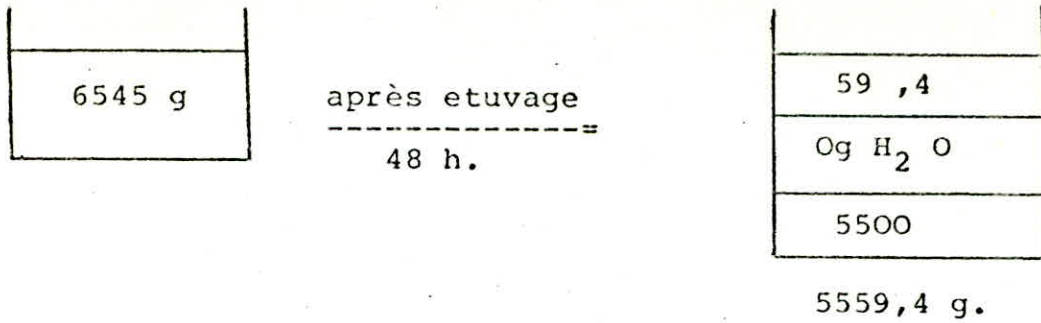
Courbe n° 1 ----- = 1075 g
Courbe n° 2 ----- = 1085 g.

$$\frac{1085 + 1075}{2} = 1080 \text{ g.}$$

pendant 48 h on a une augmentation de 80 g.

1000 g Ca (OH)₂ ----- = 1351 g réaction complète.
après 48 h. 1000 g Ca (OH)₂ ----- = 1080 g.
74 g ----- = n = 79,92 g.

pendant 48 h. -----= 74 g Ca (OH)₂ -----= 79,9 g de Ca CO₃
 55 g Ca (OH)₂ -----= 59,4 g de Ca CO₃



6545 - 5559,4 = 985,6 g d'eau.

⇒ 17,92 %

pour 2 % chaux :

5000 g -----= 100 g (:chaux)
 74 g Ca (OH)₂ -----= 79,9 g Ca CO₃ .
 100 g Ca (OH)₂ -----= n = 108 g Ca CO₃.



6000 - 5108 = 892 g

⇒ 17,84 %

pour 4 % chaux :

5000 g -----= 200 g
 74 g Ca (OH)₂ -----= 79,9 de Ca CO₃ .
 200 g -----= X = 216 g.



6100 - 5216 = 884 g. ⇒ 17,68 %

Pour 6 % chaux :

$$\begin{array}{rcl} 5000 \text{ g} & \text{-----} & 300 \text{ g} \\ 74 \text{ Ca (OH)}_2 & \text{-----} & 79,9 \text{ de Ca CO}_3 \\ 300 \text{ g} & \text{-----} & \text{sc} = 324 \text{ g.} \end{array}$$

$$\boxed{6200 \text{ g}} \quad \text{-----} \quad \boxed{5324}$$

$$6200 - 5324 = 876 \text{ g.}$$

pour 18 %

Récapitulatif :

1 %	-----	=	17,92 %
2 %	-----	=	17,84 %
4 %	-----	=	17,68 %
6 %	-----	=	17,52 %

$\boxed{17,52 \%}$

Pour 20 % : même procédé

1 %	-----	=	19,92 %
2 %	-----	=	19,84 %
4 %	-----	=	19,68 %
6 %	-----	=	19,52 %

Pour 22 %

1 %	-----	=	21,92 %
2 %	-----	=	21,84 %
4 %	-----	=	21,68 %
6 %	-----	=	21,52 %

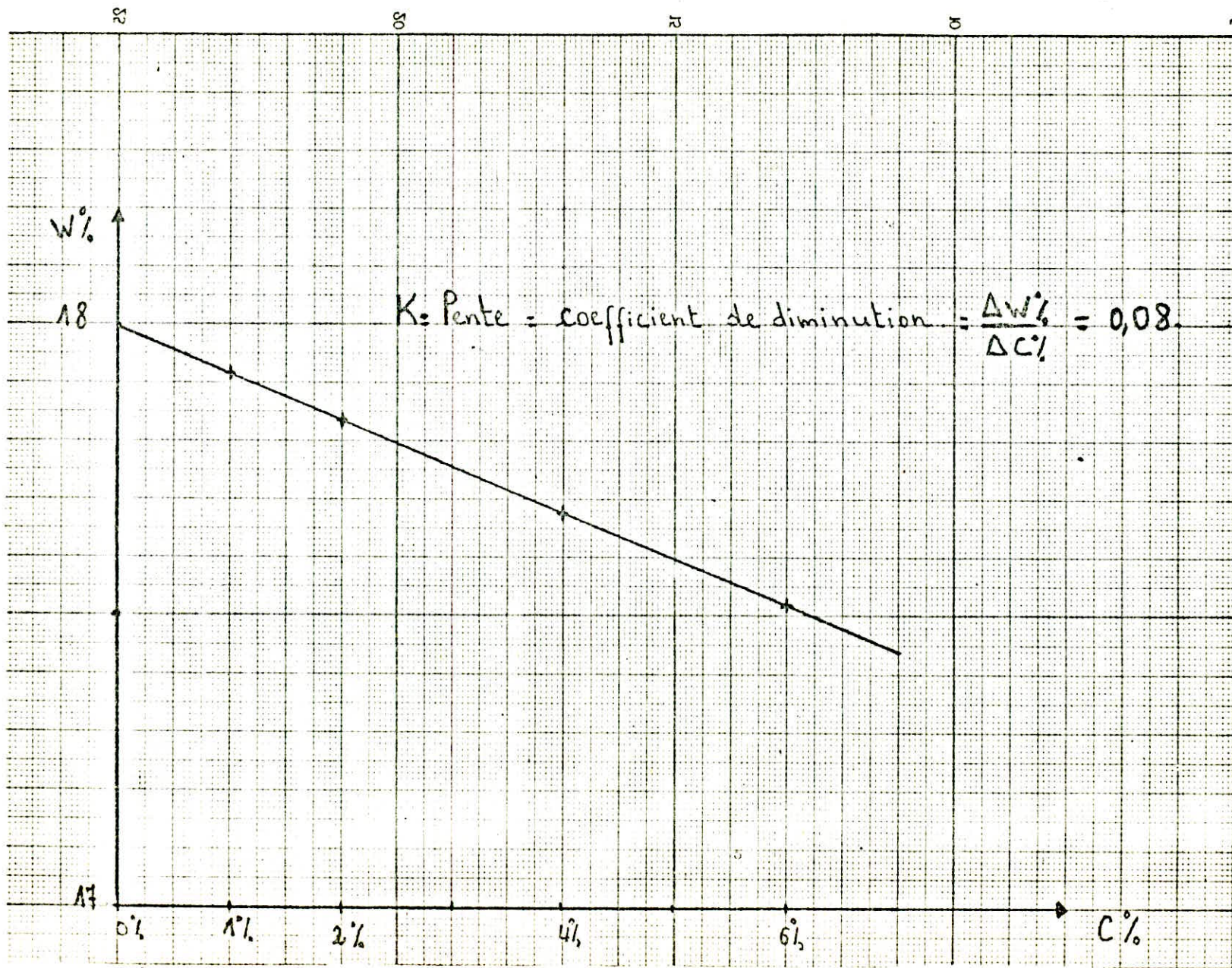
Pour 24 %

1 %	-----	=	23,92 %
2 %	-----	=	23,84 %
4 %	-----	=	23,68 %
6 %	-----	=	23,52 %

on constate pour toutes les teneurs en eau on a la même pente
on trace un graphe exple pour 18 % ou a "K".

pour 0 % on suppose qu'à 18 % après etuvage ou a 18 % (qu'il
n'existe pas d'autre phénomène qui rentre en jeu).

$$K = 0,08$$



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Recommandation pour le traitement en place des sols à la chaux (SETRA-LCPC Août 1972)
- Recommandation pour les terrassements routiers (RTR) (SETRA - LCPC).
- 2° - Utilisation des sols en remblai et en couche de forme (Janvier 1976).
- 3° - Compactage des remblais et des couches de forme (Janvier 1976)
- 4° - Contrôle de l'exécution des remblais et des couches de forme (Octobre 1981)
- La chaux dans les techniques routières (syndicat des fabricants de ciments et de chaux).
- Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées TERRASSEMENTS ROUTIERS (1983).
- Rapports du laboratoire des travaux publics du Centre (LTPC):
 - Rapport N° 1 : Traitements des sols à la chaux
essais de laboratoire (21 Mars 1981)
 - Rapport N° 2 : Stabilisation des sols du puit. 14 à la chaux
de saida résultats partiels (25 Mai 1982).
 - Rapport N° 3 : Etude de stabilisation à la chaux résultats après
183 jours.
 - Rapport N° 4 : Influence de la variabilité du sol sur le dosage
en chaux (12 Juin 1984).
 - Rapport N° 5 : Résultat partiel du calage des essais accélérés
(Décembre 1984).

- Cours pratiques de mécaniques des sols Tome 1
(J. Costet, G. SANGLERAT)
(Editions DUNOD)

- Construire en terre (par le CRATERRE)
(Editions Alternatives Collection An Architecture)

- La technique Routière de Wegentechnik 1 (1975)
(Revue trimestrielle de l'Association permanente des
congrès Belges de la Route)
Editée en collaboration avec le centre de Recherches Routières

- Contribution à l'Etude de la stabilisation des sols fins à la
chaux : Etude globale du phénomène et applications
Thèses de Doctorat d'Etat de Monsieur Pierre Perret
I.N.S.A de Rennes 1977

- Article de William LAMBE "Stabilisation des sols"
contenu dans LEONARDS "Fondation" à la page 397 Editions DUNOD 1968.

- "Stabilisation des terres et les mécanismes physico-chimiques liés
à la cristallisation à froid"
Communication par Dominique PRIN et Jean - Claude CUBAUD

- Les essais de portance "Essai CBR"
(Rapport du LNTPB)

- "Traitements des sols argileux par la chaux"
de A. LEROUX (Assistant section "Mécanique des Roches". Dépar-
tement des sols laboratoire central)

- Bulletin de liaison du laboratoire Routier des ponts et chaussés
n° 40 (Septembre - Octobre 1969)

- "Une Expérience de traitement du limon de Beauce avec de faibles dosages de chaux vive" par P. BRAULT bulletin de liaison des ponts et chaussées n° 60 (Juillet - Août 72)
- "Les chaux - Classification et terminologie" par F. CHOQUET et J. HUET
Revue des matériaux de construction n° 706 (Mars 77)
- Réunion d'Ingenieurs "Matériaux de Construction" Edition Eyrolles, collection des cours de l'école chez soi
- Travail de fin d'Etudes de M. KARA MOSTEFA - KAMEL (E.N.I.P) Intitulé "Traitement des sols fins à la chaux applications actuelles et perspectives de Developpement en Algérie" Année 83-84
- Essai à la plaque (Modes Opératoires du Laboratoire Central des ponts et chaussées)
Editions DUNOD
- Mesure et exploitation de la deflexion (Octobre 1982)
Rapport du LNTPB (L.T.P.C)

