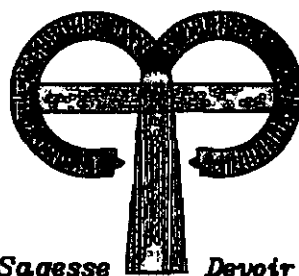


REPUBLIQUE DU SENEGAL



GC. 1227

Ecole Polytechnique de Thiès
Département de Génie Civil.

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception

TITRE: Etude du Phénomène de la Tôle Ondulée
sur les pistes en tout-venant latéritique.

AUTEUR: *Nicéphore Omer* ATTAKPA

DIRECTEUR: *Massamba* DIENE, *Ph.D*

Juin 90

<< Vous êtes arrivés à ce
Résultat par voie
Scientifique ou par
Expérience ? >>

TCHECOV

A mes parents,
A ma bien aimée,
A tous ceux qui ont
fait de moi ce que
je suis aujourd'hui.

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

Je ne saurais assez remercier Monsieur Massamba DIENE, Professeur à l'Ecole Polytechnique de Thiès, Directeur de ce projet, pour ses précieux conseils et son assistance soutenue malgré ses lourdes charges de Chef de Département. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de :

- Monsieur Cheikh Tidiane MBOUP, Technicien du Laboratoire de Mécanique des sols, pour ses fréquentes interventions au niveau de mes essais de laboratoire et pour la disponibilité dont il a fait montre lorsqu'il s'était agi de faire des prélèvements sur des pistes.
- Monsieur Joseph SAMBOU, des Services des Travaux Publics de Thiès pour les renseignements qu'il m'a fournis sur le réseau routier de la région pour avoir accepté de coordonner l'exécution des tronçons d'essai que nous avons ensemble localisés.
- Monsieur Moustapha SOULE, Directeur des Routes et Ouvrages d'Art à Cotonou (République du Bénin) pour ses précieux documents.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

La tôle ondulée est un phénomène qui affecte fréquemment les routes non revêtues des régions tropicales et singulièrement les régions arides. Son éradication pose des problèmes et la plupart des Services des Travaux Publics se contentent d'un grattage régulier des zones affectées. Cette pratique a pour conséquence, la diminution de l'épaisseur de la chaussée et l'utilisation d'importantes quantités de matériaux lors du rechargement.

Le but de ce projet est d'étudier différents tronçons de pistes affectées par le phénomène de la tôle ondulée, d'analyser les caractéristiques des matériaux utilisés et de proposer des méthodes correctives pouvant contribuer à éviter l'apparition d'une telle source d'inconfort et d'insécurité.

Si la plupart de nos pistes ne sont pas construites avec des matériaux stabilisés pour améliorer leur résistance à l'usure, aux chocs et diminuer leur susceptibilité à la tôle ondulée, ce n'est sûrement pas parce que la théorie de la stabilisation des matériaux utilisés dans la construction des superstructures routières est une notion nouvelle ou encore moins, une notion que les ingénieurs ne maîtrisent pas. Cela est sans nul doute dû à la limitation du budget alloué à de telles opérations. Nous nous proposons donc, considérant tout ce qui précède, d'évoquer la nécessité de la stabilisation des matériaux dans la construction des routes non revêtues n'ayant pas atteint le seuil de bitumage. La conséquence de l'adoption d'une telle attitude est bien entendu la suppression de la tôle ondulée pour une longue échéance.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

	Pages
Remerciements	i
SOMMAIRE	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	v
Liste des symboles et abréviations	vi
INTRODUCTION	1

PREMIERE PARTIE :

LE PHENOMENE DE LA TOLE ONDULEE

CHAPITRE 1

BREF APERCU SUR LES LATERITES

1.1	Définitions	3
1.2	Importance des Latérites	3

CHAPITRE 2

LE VEHICULE ET SA DYNAMIQUE SUR LA CHAUSSEE

2.1	Le véhicule automobile schématisé	6
2.2	Cisaillement sous pneumatique :	
	Actions horizontales.....	13
2.2.1	Pseudo-glissement	14
2.2.2	Avance élastique	16
2.2.3	Effet abrasif du pneumatique	18
	2.2.3.1 Pulvérisation du sol	18

2.2.3.2 Déplacement du sol	19
----------------------------------	----

CHAPITRE 3

SITUATION DU PHENOMENE DE LA TOLE ONDULEE

3.1 Observations	20
3.2 Analyse du phénomène	22
3.2.1 Théorie du tourbillon d'air	23
3.2.2 Théorie des ondes stationnaires	23
3.2.3 Théorie des tassements différentiels	25
3.2.4 Théorie des effets d'arrachement	29

CHAPITRE 4

ESSAIS DE LABORATOIRE

4.1 Observation des pistes	32
4.2 Analyse granulométrique	35
4.3 Les limites d'Atterberg	43

CHAPITRE 5

INTERPRETATION DU PHENOMENE DE LA TOLE ONDULEE

5.1 Diagnostic de la "maladie"	45
5.2 Proposition d'un profil granulométrique	

DEUXIEME PARTIE :

LA STABILISATION

INTRODUCTION	47
--------------------	----

CHAPITRE 6

LA STABILISATION

6.1 Description des procédés de stabilisation retenus	49
6.1.1 Le traitement au ciment Portland	49
6.1.2 La stabilisation mécanique	50
6.2 Essais de laboratoire	50
6.2.1 Analyse granulométrique	51
6.2.2 Essai Proctor modifié	53
6.2.3 Essai de compression simple	55
6.2.4 Essai de traction	67
6.3 Estimation des caractéristiques de cisaillement	67
6.4 Interprétation des caractéristiques de cisaillement ...	74

CHAPITRE 7

PROJET DE REALISATION DE TRONCONS D'ESSAI

7.1 Nécessité de la réalisation d'un tronçon d'essai	81
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	84
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	86
ANNEXE A	88
ANNEXE B	96

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

	Pages
2.1 Représentation schématique d'un véhicule automobile	7
2.2 Schéma simplifié d'un véhicule	7
2.3 Cisaillements longitudinaux sous un pneumatique	15
2.4 Distribution des cisaillements longitudinaux dans l'aire d'empreinte.....	15
3.1 Schéma du profil d'une route à tôle ondulée	21
3.2 Corrélation longueur d'onde et vitesse moyenne des véhicules	26
3.3 Schéma du mouvement d'une roue passant sur un obstacle .	26
4.1 Courbes granulométriques : piste Thiès Sindia	36
4.2 Courbes granulométriques : piste Mont-Rolland	37
4.3 Courbes granulométriques : piste Notto-Tassette	38
<u>Courbes plus fuseau granulométrique de A.REMILLON :</u>	
4.4 Piste Thiès-Sindia	40
4.5 Piste Mont-Rolland	41
4.6 Piste Notto-Tassette	42
6.1 Courbe granulométrique de la Latérite de carrière Station Télévision	52
<u>Courbes de l'essai Proctor modifié :</u>	
5.2 0% de ciment	56
5.3 1% de ciment	57
5.4 2% de ciment	58
5.5 3% de ciment	59
5.6 4% de ciment	60

Courbes contrainte-déformation de l'essai de
compression simple :

5.7	0% de ciment	62
5.8	1% de ciment	63
5.9	2% de ciment	64
5.10	3% de ciment	65
5.11	4% de ciment	66

Courbes contrainte-déformation de l'essai de traction :

5.12	0% de ciment	68
5.13	1% de ciment	69
5.14	2% de ciment	70
5.15	3% de ciment	71
5.16	4% de ciment	72

Estimation des caractéristiques de cisaillement :

5.17	Courbe intrinsèque à 0% de ciment	75
5.18	Courbe intrinsèque à 1% de ciment	76
5.19	Courbe intrinsèque à 2% de ciment	77
5.20	Courbe intrinsèque à 3% de ciment	78
5.21	Courbe intrinsèque à 4% de ciment	79

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
5.1 Valeurs de c_u et ϕ_u pour différents % de ciment	74

ANNEXE A

Résultats d'analyse granulométrique sur les échantillons

Piste Thiès-Sindia :

Creux	88
Bourrelets	89
Zones non affectées	90

Piste Mont-Rolland :

Creux	91
Bourrelets	92
Zones non affectées	93

Piste Notto-Tassette :

Creux	94
Bourrelets	95
Zones non affectées	96

ANNEXE B

Résultats de l'Essai Proctor Modifié sur la

Latérite de carrière avec ajout de ciment :

0% de ciment	97
1% de ciment	97
2% de ciment	97
3% de ciment	98
4% de ciment	98

**LISTE DES SYMBOLES
ET
ABREVIATIONS**

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

k, K	Raideurs
f	Coefficient de frottement visqueux des amortisseurs
Ω	Pulsation
w	Vitesse angulaire
V, V'	Vitesses linéaires
r, R, R'	Rayons
	Longueur d'onde
N, N'	Fréquences
W, W'	Teneurs en eau optimales de l'essai Proctor modifié
γ_d, γ'_d	Densités sèches maximales
γ_s	Poids spécifique absolu
τ	Résistance aux cisaillements
σ	Contrainte normale
σ_1	Contrainte principale majeure
σ_3	Contrainte principale mineure
R_c	Résistance à la compression
R_t	Résistance à traction
c_u	Cohésion
ϕ_u	Angle de frottement interne

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les seuls matériaux qui présentent l'avantage d'être disponibles dans presque toutes les régions sont les latérites. Elles ont d'ailleurs été les matériaux les plus utilisés dans la construction routière.

Les latérites idéales i.e qui assurent une viabilité permanente aux superstructures routières où elles sont présentes, devraient avoir, selon les spécialistes, les propriétés suivantes:

- des caractéristiques mécaniques élevées qui impliquent une richesse en élément graveleux de qualité,
- une plasticité qui préviendrait les dégagements de poussière en saison sèche et la formation de la tôle ondulée,
- une absence de glissance et une résistance à l'érosion qui exigent que le matériau soit squelettique.

On remarque en examinant ces exigences que ce sont des qualités difficilement conciliables pour un matériau surtout dans le cas des routes non revêtues. Par ailleurs, on a noté que les caractéristiques géotechniques des graveleux latéritiques naturels se sont révélées insuffisantes pour les grands trafics. C'est ce qui explique la naissance de certaines "maladies" telle la tôle ondulée qui fera l'objet de notre étude.

Il paraît donc nécessaire de procéder à un traitement de ces matériaux naturels pour leur donner les qualités "intermédiaires" qui permettent de répondre un peu à toutes ces exigences. Habituellement, on le fait en stabilisant le matériau par un apport d'autres matériaux naturels, par un compactage rendu plus

efficace, ou tout simplement par addition de liants (bitume, chaux, ciment etc..).

Des laboratoires de Travaux Publics de la sous-région ouest-africaine ont étudié la question et certains d'entre eux, dont celui de la Côte d'Ivoire, ont même fait une proposition de catalogage de leurs de leurs superstructures de chaussée [1]. Mais le matériau latérite est de caractéristiques si variables que chaque gisement, voire chaque horizon, requiert une étude particulière. A priori on ne peut pas objectivement présenter un catalogage général mais plutôt proposer des solutions au moins par carrière ou à la rigueur, par formation latéritique.

C'est pourquoi nous nous proposons, dans ce travail que nous voulons être une ébauche, d'étudier :

- le phénomène de la tôle ondulée, dans une première partie, en nous basant sur des échantillons prélevés sur des pistes affectées par ledit phénomène,
- la stabilisation des latérites dans les superstructures. Cette seconde partie sera présentée sous forme de solution à la tôle ondulée.

1ere PARTIE :
LE PHENOMENE DE LA
TOLE ONDULEE

CHAPITRE 1

1.1 Définitions

" On appelle latérites, tous les sols résiduels rougeâtres et tous les sols non résiduels ayant subi les processus d'altération tropicales. Elles se situent dans une chaîne de matériaux allant de la roche décomposée aux argiles et aux cuirasses (croûtes indurées) riches en sesquioxydes " [2].

Le degré d'avancement d'un processus de latérisation est mesuré au moyen des rapports : $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ou $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$. En général, on admet que les sols étudiés par rapport à ce critère sont:

- de vraies latérites si le rapport silice/sesquioxydes i.e $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ est inférieur à 1.33
- des sols latéritiques, s'il est compris entre 1.33 et 2
- des sols non latéritiques, s'il est supérieur à 2

1.2 Importance des latérites

Comme nous l'avons mentionné en introduction, les latérites sont les matériaux les plus utilisés aussi bien dans la construction des routes revêtues que des routes non revêtues qui sont d'ailleurs essentiellement constituées de latérites.

Si l'importance des routes revêtues peut être perçue de tous les usagers de la route, il n'en est pas de même des routes non revêtues. Pourtant, dans la plupart de nos pays, en Afrique, on est amené pour des raisons diverses à aménager des chaussées non

revêtues ou routes en terre comme on les appelle communément; souvent à cause d'un besoin pressant qu'on a de désenclaver une localité et de la relier à la route nationale la plus proche. Parfois, il s'agit de voies d'accès de complexes d'intérêt public ou privé (périmètres agro-industriels, usines de l'intérieur etc..) ou bien c'est tout simplement des voies de circulation temporaires pour permettre le trafic des engins dans les grands chantiers [3].

On peut remarquer que, conformément aux motifs qui poussent à leur réalisation, ce sont en général les premières formes de voies de circulation à desservir la plupart, voire toutes les localités du pays qui s'ouvrent au développement. Par ailleurs, les restrictions qui affectent les budgets des projets d'aménagement les imposent tout naturellement comme voie d'accès et ce, sur une période plus ou moins longue.

Toutefois, les routes en terre sont très souvent le siège de diverses formes de dégradations dues aux insuffisances des matériaux latéritiques. C'est ainsi qu'on assiste en saison sèche à une usure de la chaussée sous le trafic, usure due au défaut de cohésion du matériau. Cette usure est accentuées dans les zones très peu arborées, par les vents qui emportent les particules fines dans un nuage de poussière qui rend la circulation particulièrement désagréable. D'autre part, l'usure prend en certains endroits un aspect de tôle ondulée qui rend la chaussée très inconfortable. Enfin, pendant la saison pluvieuse, la glissance des véhicules est favorisée et des bourbiers sont formés dans les zones mal drainées. Cette glissance est favorisée par les fortes plasticités, d'où l'intérêt d'avoir de ce point

de vue une latérite squelettique qui résisterait par la même occasion à l'érosion. A cela, il faut ajouter de nombreux nids de poules et les canicules qui apparaissent respectivement dans les zones de séjour et de ruissellement des eaux pluviales.

De toutes ces dégradations, la tôle ondulée s'avère la plus inquiétante. C'est pourquoi nous nous proposons dans le cadre de ce projet, d'étudier plus en détail cette forme de dégradation et de proposer, éventuellement, des solutions devant contribuer à son éradication.

2.1 Le véhicule automobile schématisé

La schématisation d'un véhicule donne un système caractérisé par les oscillations verticales des masses m_1 et m_2 dites non suspendues (roues, freins etc..) d'une part et des masses M dites suspendues (caisse, passagers etc..) d'autre part et de l'angle de tangage de la caisse [4]. (voir figure 2.1).

En désignant par K_1 et K_2 puis par k_1 et k_2 les raideurs respectives des ressorts et des pneumatiques, et par f_1 et f_2 , les coefficients de frottement visqueux des amortisseurs, la mise en équation de l'ensemble du véhicule ne présente aucune difficulté.

Ne cherchant pas le comportement des véhicules sous les irrégularités de profil mais une mise en évidence des faits expérimentaux, la simplification suivante s'impose :

Posons : M = masse suspendue
 m = masse non suspendue
 K = raideur des ressorts
 k = raideur des pneumatiques
 f = coefficient de frottement visqueux des
amortisseurs

De plus en posant:

- * z et Z les cotes respectives du centre de gravité des parties non suspendues et suspendues respectivement,
- * z_0 et Z_0 les cotes au repos dans le même ordre,
- * $u = z - z_0$

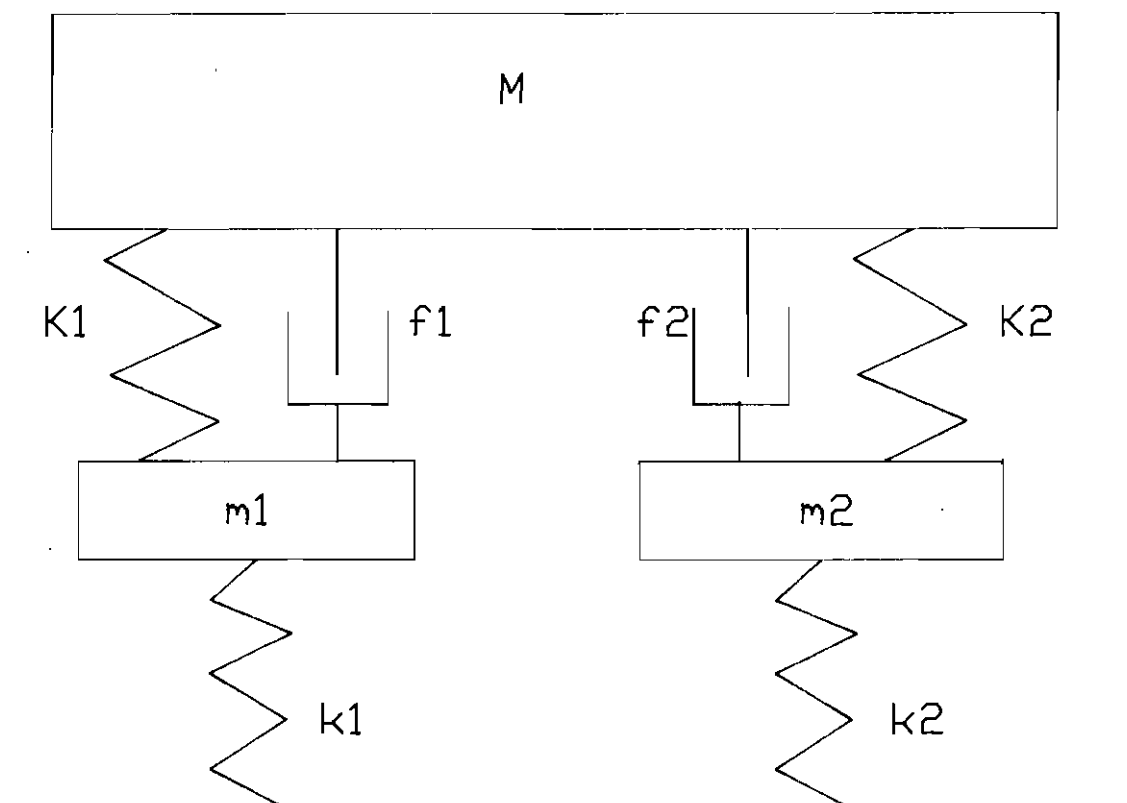


Fig 2.1 Représentation schématique d'un véhicule automobile

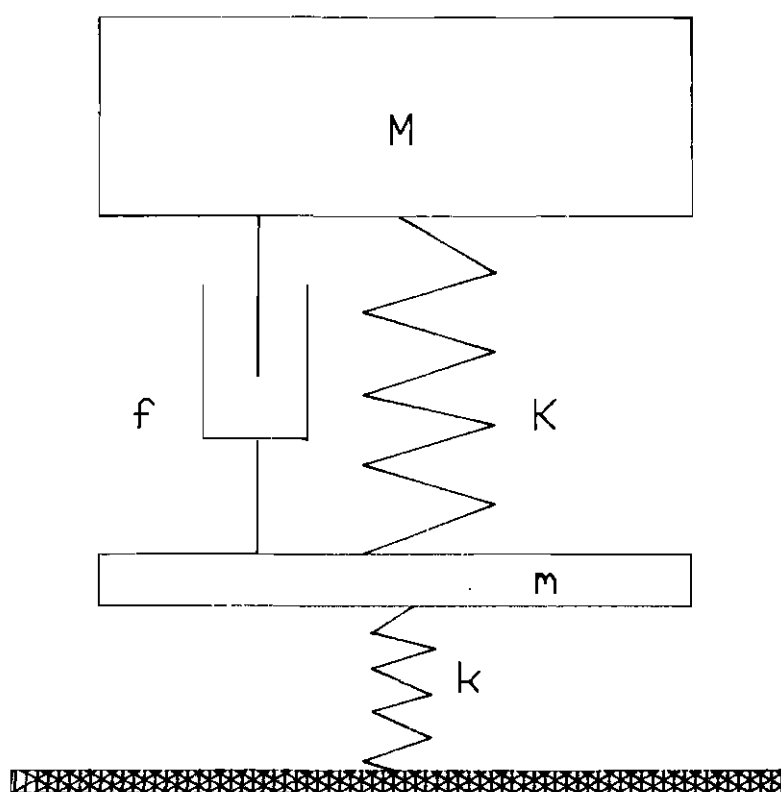


Fig 2.2 Schéma simplifié d'un véhicule

$$* U = Z - Z_0,$$

Soit y l'écart de cote du profil de la route par rapport au profil moyen. Cela revient à supposer que la masse non suspendue " m " de raideur " k " s'est déplacée de y , c'est-à-dire sollicitée par une action $k \cdot y$.

Mettons en équation les deux systèmes oscillants :

- Mouvement des parties non suspendues

$$m \cdot u'' + f \cdot u' + (K+k) \cdot u - f \cdot U' - K \cdot U = k \cdot y \quad (1)$$

- Mouvement des parties suspendues

$$M \cdot U'' + f \cdot U' + K \cdot U - f \cdot u' - k \cdot u = 0 \quad (2)$$

u' et u'' sont respectivement les dérivées première et seconde de u . Les mêmes notations ont été utilisées pour U .

Posons :

$$\Omega_1^2 = K/M \quad ; \quad \Omega_2^2 = (K + k)/m$$

$$\lambda^2 \cdot \Omega_1^2 \cdot \Omega_2^2 = K^2/M \cdot m \quad ; \quad f = 2 \cdot \alpha \cdot \Omega_1 \cdot M = 2 \cdot \beta \cdot \Omega_2 \cdot m$$

En divisant les deux membres du système d'équations (1), (2) respectivement par m et M et en tenant compte des notations ci-dessus, nous obtenons le nouveau système d'équations :

$$u'' + 2 \cdot \beta \cdot \Omega_2 \cdot u' + \Omega_2^2 \cdot u - 2 \cdot \beta \cdot \Omega_2 \cdot U' - \lambda^2 \Omega_2^2 \cdot U = (1 - \lambda^2) \cdot \Omega_2^2 \cdot y$$

$$U'' + 2 \cdot \alpha \cdot \Omega_1 \cdot U' + \Omega_1^2 \cdot U - 2 \cdot \alpha \cdot \Omega_1 \cdot u' - \Omega_1^2 \cdot u = 0$$

Il s'agit d'un système oscillant classique à deux degrés de liberté dont l'étude peut se poursuivre selon les méthodes usuelles d'intégration des équations différentielles linéaires. Nous allons utiliser la transformation de LAPLACE en appelant X et x les transformées de U et u respectivement, et Y celle de la sollicitation y .

Rappelons que la transformée de LAPLACE de $f(t)$ est la fonction:

$$F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt$$

Dans cette intégrale, p est une variable réelle ou complexe, mais dans les applications de la transformation de LAPLACE aux équations différentielles linéaires à coefficients constants, comme dans notre cas, on peut se limiter au cas où p est une variable réelle positive.

Proposons nous de calculer la transformée de LAPLACE de la dérivée $f'(t)$ de la fonction $f(t)$. En intégrant par parties on a:

$$\int_0^{\infty} f'(t) e^{-pt} dt = \left[f(t) e^{-pt} \right]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} p f(t) e^{-pt} dt.$$

p étant un nombre positif, supposons que $f(t) e^{-pt} \rightarrow 0$ lorsque $t \rightarrow \infty$. Supposons en outre que $f(t)$ tende vers une limite finie $f(0)$ lorsque $t \rightarrow 0$ par valeurs positives. Nous voyons que :

$$f'(t) \int_0^{\infty} e^{-pt} dt = p F(p) - f(0) \quad (5)$$

En faisant une extension de l'opération de dérivation,

$$f''(t) \int_0^{\infty} e^{-pt} dt = p^2 F(p) - pf(0) - f'(0) \quad (6)$$

L'utilisation des expressions (5) et (6) nécessite donc la connaissance des conditions initiales. Dans notre cas précis,

$u(0) = 0, U(0) = 0$. Il s'en suit que les dérivées sont aussi nulles. Les équations précédentes se réduisent donc à :

$$f'(t) \quad] \quad pF(p) \quad (5')$$

$$f''(t) \quad] \quad p^2F(p) \quad (6')$$

Par ailleurs, $F(p)$ se déduit de $f(t)$ par une opération linéaire. Ce qui se traduit par :

$$\left. \begin{array}{l} f_1 + f_2 \quad] \quad F_1 + F_2 \\ m.f \quad] \quad m.F \end{array} \right| \quad (7)$$

Nous pouvons maintenant intégrer notre système d'équations en considérant toutes ces notions. Nous avons :

$$U(t) \quad] \quad X(t)$$

$$u(t) \quad] \quad x(t)$$

$$Y(t) \quad] \quad Y(t)$$

Et par suite,

$$(3) \quad p^2 \cdot x + 2 \cdot \beta \cdot \Omega_2 \cdot p \cdot x + \Omega_2^2 \cdot x - 2 \cdot \beta \cdot \Omega_2 \cdot p \cdot x - \lambda^2 \cdot \Omega_2^2 \cdot x = (1-\lambda^2) \cdot \Omega_2^2 \cdot Y$$

(8)

$$(4) \quad p^2 \cdot x + 2 \cdot \alpha \cdot \Omega_1 \cdot p \cdot x + \Omega_1^2 \cdot x - 2 \cdot \alpha \cdot \Omega_1 \cdot p \cdot x - \Omega_1^2 \cdot x = 0 \quad (9)$$

$$(9) : \quad x (p^2 + 2 \cdot \alpha \cdot \Omega_1 \cdot p + \Omega_1^2) = (2 \cdot \alpha \cdot \Omega_1 \cdot p - \Omega_1^2) \cdot x$$

$$\Rightarrow \quad x = \frac{p^2 + 2 \cdot \alpha \cdot \Omega_1 \cdot p + \Omega_1^2}{\quad} \cdot x$$

$$2.\alpha.\Omega_1.p - \Omega_1^2$$

$$(8) \text{ devient } (p^2 + 2.\beta.\Omega_2.p + \Omega_2^2) \frac{p^2 + 2.\alpha.\Omega_1.p + \Omega_1^2}{2.\alpha.\Omega_1.p - \Omega_1^2} - 2.\beta.\Omega_2.p - \lambda^2.\Omega_2^2 \quad X = (1 - \lambda^2).\Omega_2^2.Y$$

Nous pouvons donc écrire :

$$X(p) = H_1(p).Y(p)$$

$$x(p) = H_2(p).Y(p)$$

avec :

$$H_1 = 1/D (1 - \lambda^2) \Omega_2^2.(2.\alpha.\Omega_1.p + \Omega_1^2)$$

$$H_2 = 1/D (1 - \lambda^2).\Omega_2^2.(p^2 + 2.\alpha.\Omega_1.p + \Omega_1^2)$$

$$D = p^4 + (\Omega^2 + \Omega^2).p^2 + (1 - \lambda^2).\Omega_1^2.\Omega_2^2 + 2.\alpha.\Omega_1.p^*$$

$$* (1 - \lambda^2).\Omega_2^2 + p^2.(1 - \lambda^2.\Omega_2^2/\Omega_1^2)$$

Considérons à titre d'exemple, le cas d'un choc imposé par la chaussée à un véhicule dont les amortisseurs sont hors service, c'est-à-dire que nous négligeons les effets de ces derniers. Nous pouvons donc supposer que l'effet du choc est une impulsion. Or la transformée de LAPLACE d'une impulsion est égale à l'unité. Cela nous amène à poser que $Y(p) = 1$ et par conséquent, $H_1(p)$ et $H_2(p)$ donnent immédiatement la transformée de LAPLACE des fonctions U et u .

Par ailleurs la transformation inverse de $\sin wt$ donne $p/(p^2 + w^2)$ (w réel). Donc en décomposant $H_1(p)$ et $H_2(p)$ en éléments simples et en appliquant la transformation inverse, on trouve :

$$U = \frac{(1 - \lambda^2) \cdot \Omega_1^2 \cdot \Omega_2^2}{w_2^2 - w_1^2} \left[\frac{\sin w_1 t}{w_1} + \frac{\sin w_2 t}{w_2} \right]$$

$$u = \frac{(1 - \lambda^2) \cdot \Omega_2^2}{w_2^2 - w_1^2} \left[\frac{\Omega_1^2 - w_1^2}{w_1} \sin w_1 t + \frac{\Omega_1^2 - w_2^2}{w_2} \sin w_2 t \right]$$

w_1^2 et w_2^2 , pulsations de couplage, sont les racines de l'équation bicarrée :

$$w^4 - (\Omega_1^2 + \Omega_2^2) \cdot w^2 + (1 - \lambda^2) \cdot \Omega_1^2 \cdot \Omega_2^2 = 0$$

Il en ressort que l'on a $w_1^2 + w_2^2 = \Omega_1^2 + \Omega_2^2$. Généralement, λ^2 est très petit par rapport à 1 et on obtient w_1 et w_2 peu différents de Ω_1 et Ω_2 .

Une remarque essentielle est que les pulsations Ω_1 et Ω_2 sont identiques pour tous les véhicules et ce, compte tenu du confort.

Ainsi Ω_1 (carrosserie) est prise telle que les passagers ne souffrent ni du coeur ni des reins. On s'en tient souvent à la fréquence de $f_1 = \Omega_1/2\pi$ de l'ordre de 1 à 2 Hz. La fréquence $f_2 = \Omega_2/2\pi$ est comprise entre 10 et 15 Hz.

Le calcul numérique effectué en adoptant les valeurs des facteurs relevés sur des véhicules existants montre que w_1 et w_2 sont de l'ordre de 10 et 100 quelque soit le véhicule, donnant des fréquences de 1.5 Hz et 15 Hz.

Ainsi, chaque masse a donc une trajectoire formée par l'addition de deux mouvements sinusoïdaux:

- La trajectoire u des masses non suspendues (roues), se trouve être la composée d'un mouvement rapide (15 Hz) de grande amplitude et d'un mouvement lent (1.5 Hz) d'amplitude faible.

Le rapport des amplitudes $\frac{(\Omega_1^2 - w_2^2) \cdot w_1}{(\Omega_1^2 - w_1^2) \cdot w_2}$ étant de l'ordre de 100, il s'en suit que le mouvement rapide est pratiquement le seul à retenir.

- Inversement, la trajectoire U des masses suspendues est composée par un mouvement rapide de faible amplitude et d'un mouvement lent d'amplitude plus grande dans le rapport $w_2/w_1 = 10$. Alors c'est le mouvement rapide de faible amplitude qu'il faut retenir.

En bref, lorsqu'un véhicule se déplace à une vitesse moyenne de 60 Km/h (les amortisseurs n'ayant pratiquement pas d'influence), la longueur d'onde du mouvement sinusoïdal des roues est de l'ordre de 1 m [5].

Ce qui est frappant, c'est que cette valeur correspond à peu près à la distance entre crêtes (ou creux) des ondulations sur les routes à tôle ondulée.

2.2 Cisaillements sous pneumatiques : Actions horizontales

Outre les pressions normales, il se développent au contact pneu-chaussée des actions horizontales retardatrices ou motrices dues aux freinages et aux accélérations. Il est à noter que même

sans variation de vitesse, des efforts de cisaillement usent les couches de surface et les bandes de roulement. Bien que difficile à mesurer, le rôle de ces cisaillements n'est pas négligeable sur un véhicule en mouvement. L'équilibre statique des forces (charges appliquées et réactions) implique des déformations dont le pseudo-glissement, l'avance élastique et l'influence du couple moteur.

2.2.1 Pseudo-glissement

Pour mieux cerner le problème, assimilons le pneu à un tore déformable mais inextensible avec une série de parallèles. Lorsque le pneu s'écrase sous charges verticales, le rayon de roulement est inférieur à celui du parallèle équatorial du tore tout en étant supérieur au rayon sous charge.

On constate donc que deux parallèles roulent sans glisser sur le sol. Les parallèles intérieurs à ceux-ci (de plus grand rayon) glissent en sens contraire du mouvement du pneumatique, tandis que les parallèles extérieurs glissent dans le sens du pneumatique c'est-à-dire vers l'avant. Ceci permet de visualiser les cisaillements longitudinaux comme nuls, positifs ou négatifs. Ainsi, lorsque le pneu n'est pas soumis à une action extérieure (mouvement infiniment lent), la somme des aires du diagramme est nulle puisque caractérisant la force horizontale totale. Voir figures 2.3 et 2.4.

Si maintenant nous assimilons le pneu à un tore déformable mais inextensible de section rectangulaire, l'analyse se présente

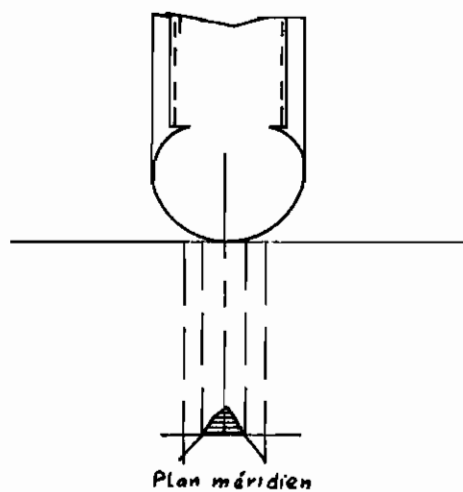


Fig 2.3 Cisaillements longitudinaux sous un pneumatique

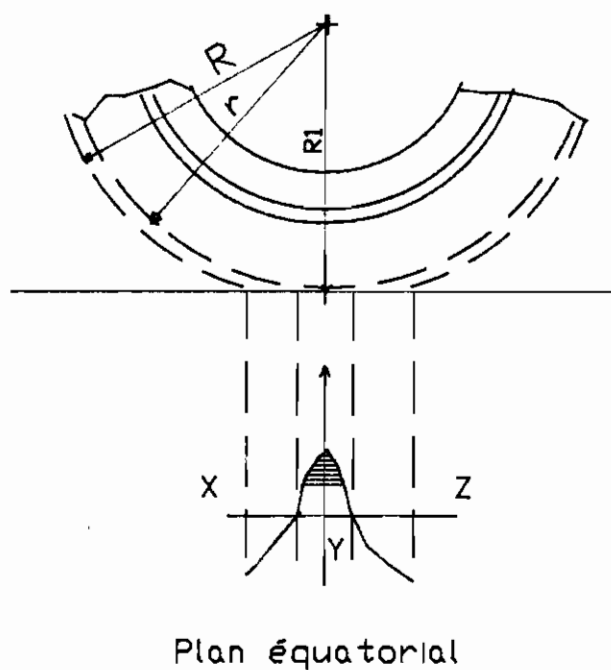


Fig 2.4 Distribution des cisaillements longitudinaux dans l'aire d'empreinte

comme suit :

- le long de la ligne d'empreinte X Y Z, montrée à la figure 2.4, apparaissent des glissements s'exprimant de la façon ci-après :

* en X, les éléments du pneumatique ont une vitesse par rapport à la chaussée de $V = w(R-r)$. Cette vitesse est positive car $R \geq r$;

* en Y, les éléments du pneumatique ont une vitesse négative de $V' = w(R'-r)$ par rapport à la chaussée. Nous avons $R' \leq r$ avec :

R = rayon en l'absence de charge

r = rayon de roulement

R' = rayon sous charge

w = vitesse angulaire de la roue.

De cette observation, il résulte des glissements dirigés vers l'arrière à l'entrée et à la sortie de l'aire d'empreinte et dirigés vers l'avant au milieu de celle-ci. Voir figure 2.4

Le passage du tore au pneumatique réel est rendu complexe par la déformabilité du caoutchouc de sorte que nous avons des cisaillements dont la résultante est nulle et non des glissements, d'où le nom de pseudo-glissement.

E. FENZY [9], quant à lui, interprète le phénomène comme suit:
" lorsqu'un véhicule avance, un point N quelconque de la bande prend contact avec le sol en N_1 , puis se déplace vers l'arrière (N_2) ensuite tend à se déplacer vers l'avant (N_3) et de nouveau vers l'arrière (N_4), pour quitter le sol. Voir figure 2.5

Mais ceci n'est qu'une vision de l'esprit, car en fait il n'y a pas glissement du point N sur le sol, mais création d'une force de cisaillement qui sollicite la surface du sol horizontalement ce

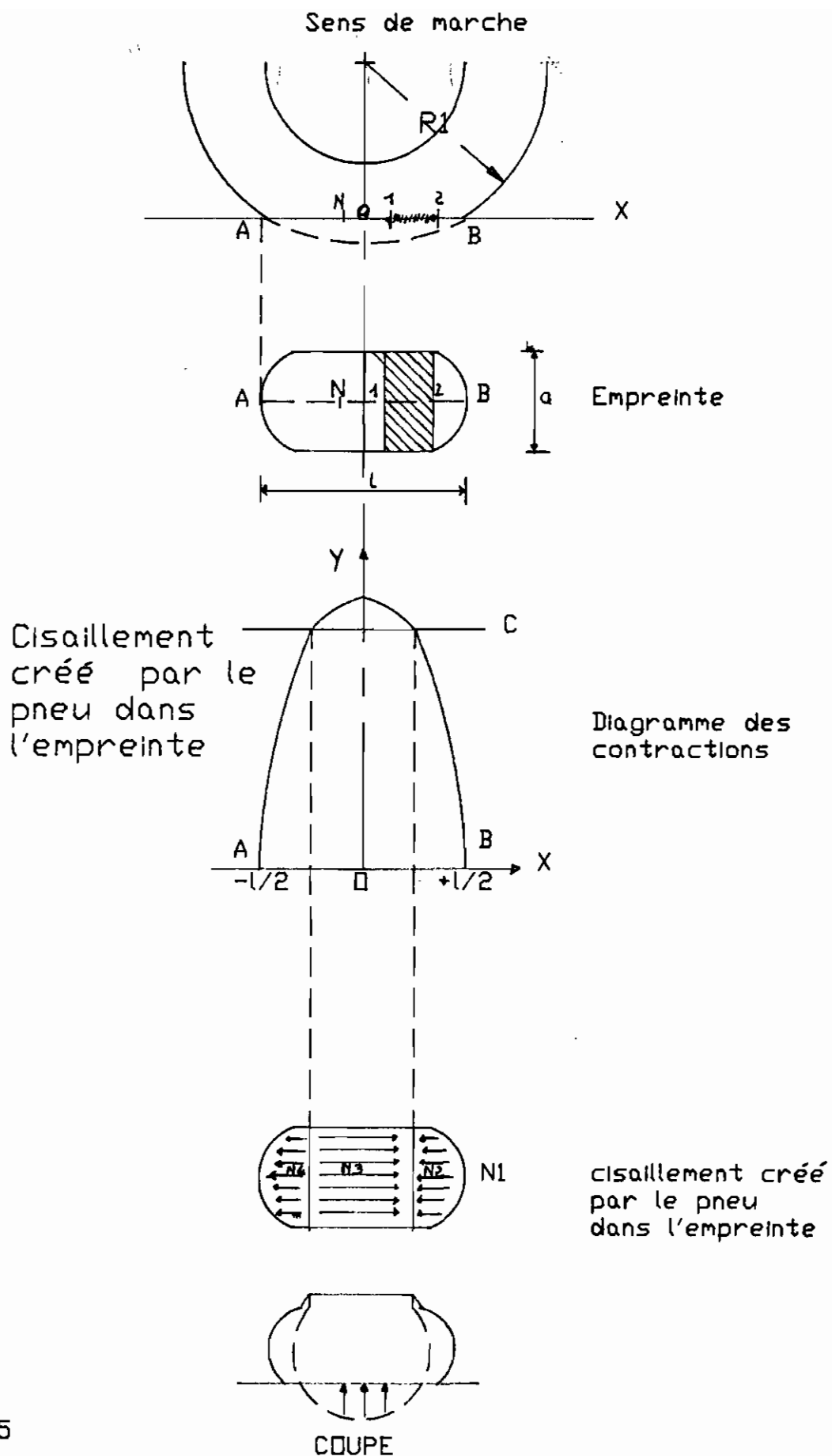


Fig 2.5

qui serait l'origine caractéristique du pseudo-glissement.

2.2.2 Avance élastique

L'avance d'un véhicule sur la chaussée nécessite que les pneus écrasés consomment de l'énergie afin de produire le cisaillement ci-dessus et déformer leur bandage. Cette puissance consommée par une résistance appelée " couple résistant " à l'avancement, absorbe une partie du couple moteur transmis aux roues motrices tandis qu'elle s'oppose à la force horizontale qu'il faut appliquer aux roues non motrices pour les faire avancer.

2.2.3 Effet abrasif du pneumatique

La combinaison des différentes actions du pneu sur le sol présente une résultante fort complexe et variable. La complexité est liée à la nature même de ces actions dans la mesure où certaines sont connues par la déformation qu'elles provoquent (pseudo-glissement, avance élastique) et d'autres par la force directement appliquée (couple moteur, envirage).

2.2.3.1 Pulvérisation du sol

Lors de son déplacement sur la route non revêtue, le véhicule, par l'intermédiaire du pneumatique, pulvérise certains matériaux de faible résistance (cu et ϕu).

La pulvérisation peut être obtenue tout simplement par rupture

due à la pression verticale; toutefois, elle se trouve facilement provoquée par l'addition des forces de cisaillement :

- en l'absence d'oscillations, les cisaillements découlent des efforts du pseudo-glissement pour toutes les routes (freinage non pris en compte car intéressant de faibles distances). Il s'en suit que les roues motrices, en plus du couple moteur, sont les plus dangereuses;

- dans le cas d'oscillations (ce qui est fréquent sur une route en terre avec des obstacles de 2 cm à 6 cm), les cisaillements sont dus à la somme du pseudo-glissement (très accentué pour les roues écrasées), du couple moteur (roues motrices) et de la variation du rayon effectif. Les roues motrices sont encore les plus sollicitées, surtout lorsqu'elles se soulèvent (détente du pneumatique après écrasement).

2.2.3.2 Déplacement du sol

Ce déplacement est rendu possible par l'action de l'avance élastique à laquelle s'ajoutent le pseudo-glissement, la variation du rayon et le couple moteur. L'avance élastique, qui provoque un déplacement de grande amplitude, se manifeste sous deux formes :

- lorsque le pneu descend (s'écrase sous forte charge verticale), il a une action limitée et de faible amplitude qui a tendance à pousser les grains du sol vers l'avant;
- lorsque le pneu s'élève et surtout quand il dépasse un certain niveau, il se produit une détente de la surface de son bandage qui projette violemment les grains vers l'arrière.

CHAPITRE 3

3.1

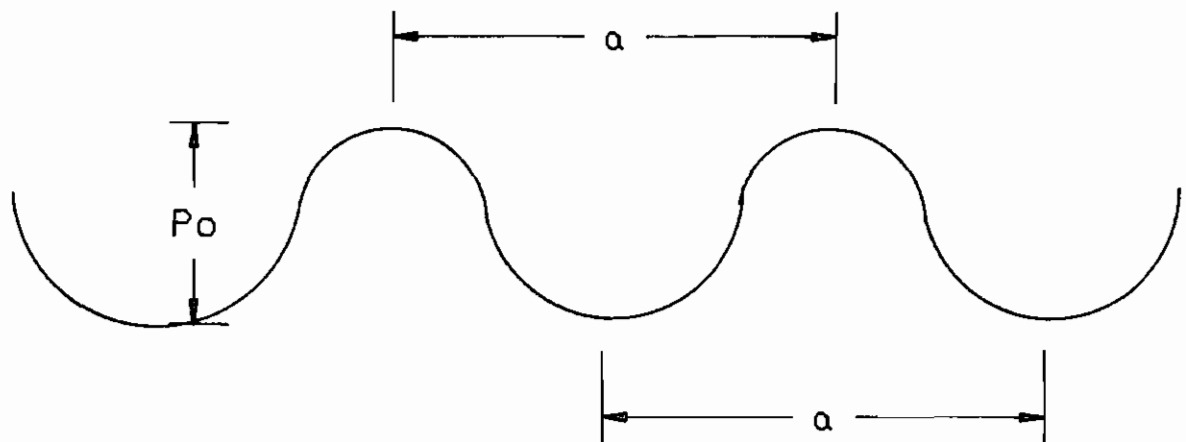
Observations

La tôle ondulée est la maladie congénitale des routes en graveleux latéritique, une maladie qui n'est pas réservée à l'Afrique noire mais qui sévit de l'équateur au cap nord lorsque certaines conditions sont réunies. Elle se présente sous forme d'ondulations qui règnent le plus souvent sur toute la largeur de la chaussée, mais parfois sur une partie seulement [1].

La tôle ondulée se manifeste avec une particulière intensité aux abords des ouvrages, aux carrefours et de façon générale dans toutes les zones soumises à des efforts tangentiels fréquents et à des arrachements. La longueur d'onde, assez régulière, varie en général de 0.6 à 1 m. Le plus souvent, les bourrelets sont légèrement inclinés par rapport à la normale de l'axe de la chaussée. L'amplitude des ondulations, en général de 5 à 10 cm, peut parfois atteindre 20 cm.

La présence de la tôle ondulée constitue à la fois un réel danger pour la circulation et un facteur d'usure accéléré des véhicules. La conduite n'est possible qu'au dessus de 60 à 80 km/h. Tout ralentissement risque d'entraîner une perte de direction; les croisements et les dépassements sont souvent acrobatiques.

Les terrains d'élection de la tôle ondulée sont, en Afrique, le nord du Sahara où il tombe 50 à 100 mm d'eau par an et les pays soudano-sahéliens à saison sèche accentuée. Certains sols



a : longueur d'onde

P_o : profondeur de l'onde ou amplitude

Fig 3.1 Schéma du profil d'une route à tôle ondulée

plastiques ne sont sujets à tôle ondulée que lorsque leur teneur en eau devient trop faible (exemple au Gabon). La tôle ondulée se forme chaque fois qu' un défaut de cohésion de la surface permet des arrachements de matériaux, que ces matériaux ou au moins une partie d'entre eux restent sur la chaussée, et que ces arrachements se produisent uniformément et non pas sous forme de nids de poule [1].

Le défaut de cohésion peut provenir d'une discontinuité dans la granularité du matériau. C'est ainsi que la courbe granulométrique des latérites sujettes à tôle ondulée présente en général un ou plusieurs paliers marqués. Par ailleurs on a voulu voir dans les éléments de 5 à 10 mm, les responsables exclusifs de la tôle ondulée. Ce n'est pas entièrement exact. Le phénomène a été observé à Brazzaville sur des sables du kalahari de granularité 0.1 à 1 mm, ainsi que sur une route en terre très circulée ne comportant pas d'éléments supérieurs à 0.5 mm. On l'a également observée dans le nord du Tchad sur du sable.

3.2 Analyse du phénomène

S'il est un phénomène qui a retenu l'attention des ingénieurs routiers dans la plupart des pays en voie de développement surtout, c'est certainement celui de la tôle ondulée vu le nombre assez important de routes non revêtues rencontrées. Maintes théories ont vu le jour pour expliquer le phénomène [5]. Toutes ont le mérite d'être une approche du problème.

Dans les paragraphes qui suivront, nous exposerons ces théories en les faisant suivre de discussions qui seront essentiellement basées sur les observations que nous avons faites sur les tronçons de route étudiés.

3.2.1 Théorie de tourbillon d'air

Hypothèses

Sur les routes en terre, le passage d'un véhicule s'accompagne d'un énorme nuage de poussière. Les éléments de sol, soulevés par aspiration du fait des dépressions se produisant à l'arrière du véhicule, retombent sur la chaussée pour former des cordons pulvérulents. Outre le nuage dense de poussière que laissent les véhicules en roulant sur les routes en terre sèche rendant la visibilité presque nulle, on a cru voir dans ces tourbillons d'air, une explication à la formation de la tôle ondulée.

Discussion

Si cette théorie peut se justifier pour les éléments dont le faible poids permet de les soulever, elle n'explique pas la présence des gros éléments dans les bourrelets. De plus, la régularité des ondulations (lorsque les grains retombent) semble illusoire du fait qu'un vent assez fort suffirait à déplacer les grains de dimensions raisonnables.

3.2.2 Théorie des ondes stationnaires

Hypothèses

Les véhicules par suite de chocs, mettent les particules constituant la couche de roulement en mouvement vibratoire. Pour certaines fréquences, le sol considéré comme milieu élastique dans lequel se propage un ébranlement, entre en résonnance avec le mouvement des véhicules.

Certains auteurs [5] ont pensé que dans les conditions ci-dessus mentionnées, le sol est le siège d'un système d'ondes dont les bourrelets seraient les ventres et les creux, les noeuds.

Discussion

Cette théorie dont le mérite est d'être l'une des toutes premières à considérer la tôle ondulée comme un phénomène vibratoire, ne peut être retenue pour des considérations purement physiques. En effet :

- la mise en résonnance du sol nécessite un système d'au moins deux ondes se propageant en sens inverse. Si l'onde incidente résulte d'un choc des pneumatiques sur un obstacle, on envisage mal l'onde réfléchie qui doit avoir lieu lorsque la perturbation atteint la limite du milieu de propagation, théoriquement infini dans notre cas;
- un système d'ondes stationnaire suppose une polarisation du phénomène et par suite, le mouvement aurait besoin d'être entretenu. Ce qui apparemment ne semble pas être le cas, dans la mesure où les vibrations du sol se propageant à une vitesse de

l'ordre de plusieurs centaines de mètres par seconde, vont beaucoup plus vite que les véhicules qui les engendrent. Une superposition d'onde est donc rendue difficile;

- l'observation du phénomène montre que celui-ci suit le tracé de la route. L'onde résultant d'un choc se propageant dans toutes les directions, on ne s'explique pas la formation de la tôle ondulée dans une seule direction.

3.2.3 Théorie des tassements différentiels

Hypothèses

Chaque véhicule repose au sol par l'intermédiaire de deux systèmes vibrant en série.

- la suspension dont la période de vibration est grande (1 seconde environ),
- les amortisseurs dont les périodes sont beaucoup plus faibles (1/15 seconde).

Lorsque la roue d'un véhicule rencontre un obstacle, les deux systèmes oscillants sont sollicités et en particulier celui des amortisseurs. Les parties non suspendues entrent en vibration et le pneumatique crée un martèlement du sol. A partir de la corrélation entre la distance de deux martèlements avec la vitesse "V" du véhicule et la fréquence "N" de vibration des roues, on a déduit que la tôle ondulée est engendrée par un mouvement sinusoïdal de longueur d'onde $\lambda = V/N$.

Acceptant le principe de corrélation entre les trois

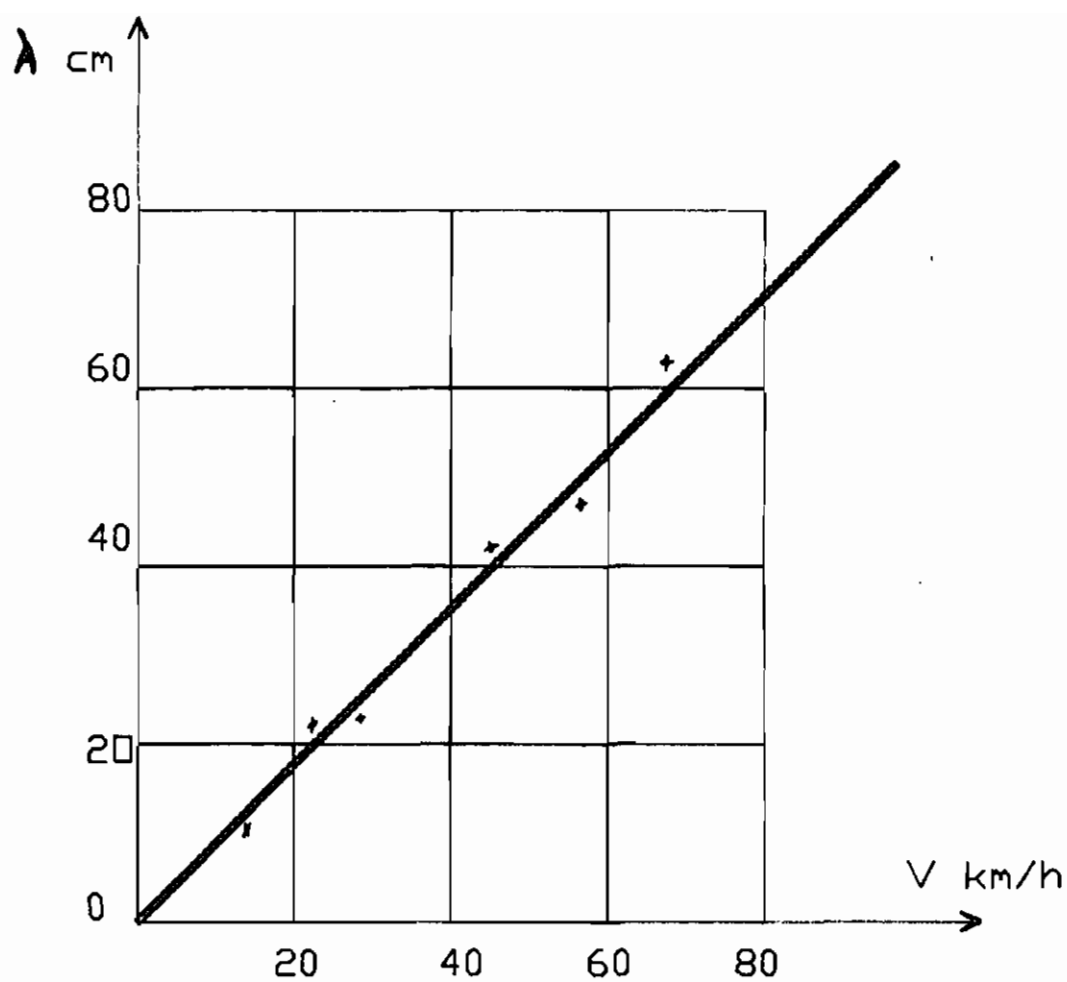


Fig 3.2 Corrélation longueur d'onde et vitesse moyenne des véhicules

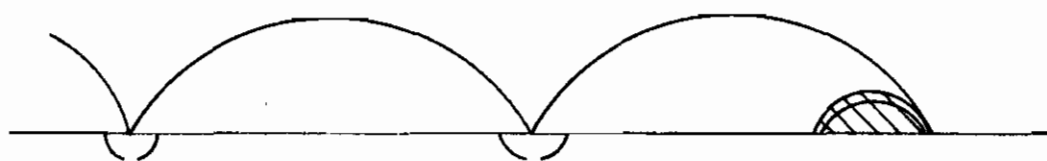


Fig 3.3 Schéma de mouvement d'une roue passant sur un obstacle.

grandeurs, des auteurs ont montré, à partir de la distance crête à crête et vitesse moyenne des véhicules, que la pente de la droite $\lambda = f(V)$ (voir figure 3.2) donne une fréquence de $N' = 32$ cycles/seconde au lieu de $N = 15$ cycles/seconde, soit un rapport de $N'/N = 2$. Ils ont alors été amenés à considérer le mouvement réel de la roue comme une série de demi-sinusoides provenant du rebondissement de la roue sur la chaussée.

Le mouvement de la roue ainsi décrit provoque le martèlement du sol en des endroits précis et justifie la formation de la tôle ondulée.

Discussion

De prime abord, on serait tenté de voir dans cette théorie toute l'explication de la tôle ondulée. Elle reste cependant incomplète pour de nombreuses raisons :

- D'abord, en début de formation, seuls les creux évoluent; les crêtes restant à leur cote initiale rendant alors la théorie viable. Mais au long du processus dans le temps, le profil général se modifie et présente un cheminement des ondulations vers l'arrière. Une étude sur la piste de Léo au Burkina-Fasso réalisée par J.M. GRESILLON [10], le montre clairement. Voir figure 3.4.

Nous voyons que le seul martèlement des roues ne peut justifier le phénomène. Si le compactage est lié au rebondissement des roues, il faut bien trouver une explication pour le déplacement des ondulations.

- D'autre part, si elle justifie l'action des efforts verticaux

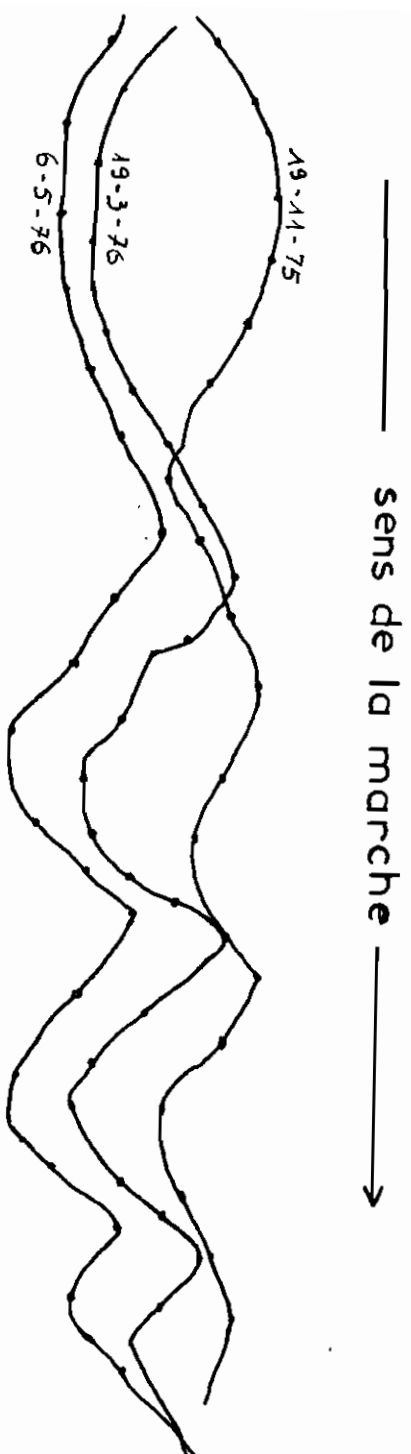


FIG 3.4 Evolution de la rôle ondulée sur la piste de Léo au Burkina Fasso (d'après GRESILLON)

sur la chaussée, elle laisse de côté les importantes actions horizontales qui sollicitent le sol.

Toute théorie qui ne prendrait pas en compte les deux genres de sollicitation rend incomplète toute tentative de cerner le problème. Le seul martèlement du sol par les roues ne peut donc pas nous satisfaire.

3.2.4 Théorie des effets d'arrachement

Hypothèses

La traduction mathématique des deux mouvements que constituent les parties suspendues et non suspendues aboutit aux conclusions suivantes :

- les roues vibrent théoriquement à 15 cycles/seconde pour tous les véhicules,
- les amortisseurs n'ont aucune influence sur l'analyse du phénomène.

L'examen du contact pneumatique-chaussée permet de constater l'existence de cisaillements entre ces deux corps, aussi bien pour les roues motrices que pour celles non motrices, freinées ou pas et sollicitées transversalement ou non.

S'appuyant sur ces considérations, JEUFFROY [6] a pensé trouver là une explication à la formation de la tôle ondulée. En effet pour lui, si la contrainte verticale est insuffisante par suite de décollement des roues au passage d'un obstacle, les cisaillements se transformaient en glissements purs. A chaque

passage des véhicules, ces efforts de glissement sollicitent dangereusement la surface de la chaussée et provoquent un déchaussement des gravillons, voire le cas échéant, une dispersion violente des matériaux libres. Il base son étude sur le fait que les roues des véhicules "creusent" la piste aux endroits où elles rebondissent et que les véhicules ayant les mêmes caractéristiques de suspension, rebondissent aux même endroits en creusant davantage la piste donnant naissance à la tôle ondulée.

Discussion

Cette théorie qui prend en compte l'ensemble des sollicitations (verticales et horizontales) en liant le phénomène vibratoire nous paraît somme toute, la plus satisfaisante même si quelques réserves sont formulables.

Les études en vraie grandeur et les constatations théoriques confirmant le réalisme de la théorie, et sur lesquelles nous baserons la suite de notre étude, se résument comme suit:

- la tôle ondulée ne se forme qu'aux endroits qui ont été en contact avec les pneus;
- la tôle ondulée se forme rapidement derrière les obstacles hauts et lentement derrière les faibles hauteurs, ce qui suppose non négligeable l'effet du martèlement dû aux rebonds importants sur le sol;
- le cheminement des ondulations se fait vers l'arrière, c'est-à-dire en sens inverse de la marche des véhicules; ce qui justifie l'effet d'arrachement qui se produit sur la pente descendante des

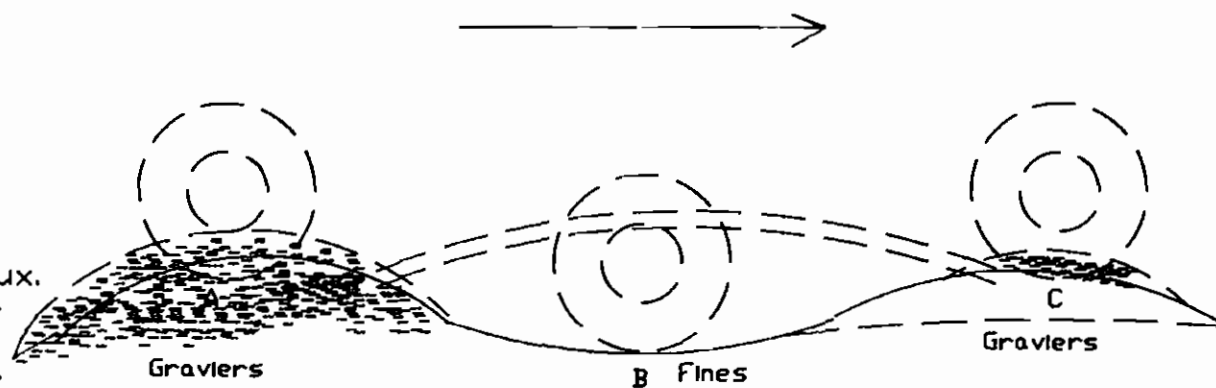
ondulations;

- la circulation sur la tôle est épouvantable pour l'automobiliste car il doit s'écarter de la résonnance en roulant vite pour augmenter son confort d'une part, et subir les basses fréquences au démarrage pour se prémunir du "pompage" quand la longueur d'onde est un sous multiple de l'empattement du véhicule, et du "galop" lorsque l'empattement est un multiple impair de la demi-longueur d'onde d'autre part.

Nous estimons que JEUFFROY est assez proche de la théorie probable. Cependant, sa théorie n'explique pas l'observation de la tôle ondulée au-delà de l'emprise de la chaussée comme on le remarque souvent sur les routes non revêtues à grand trafic.

Fig 3.5

Mouvement des matériaux.
L'ondulation a tendance
à se déplacer en sens
contraire de la marche
du véhicule.



- A = Compactage
- B = Balayage par glissement et déplacement d'air
- C = Tirage de matériaux avec projection vers
l'arrière, les matériaux les plus lourds étant
projetés le plus loin.

CHAPITRE 4

Pour l'étude du phénomène de la tôle ondulée, nous nous sommes proposé d'effectuer sur des pistes différentes, affectées par ledit phénomène, des prélèvements d'échantillon de sol. C'est ainsi que nous nous sommes intéressés aux trois pistes les plus affectées de la région de Thiès :

- l'axe Thiès-sindia
- l'axe Thiès-Mont Rolland
- L'axe Notto-Tassette

Une visite des lieux nous a permis de mieux observer le phénomène et de faire des remarques assez intéressantes.

4.1 Observation des pistes

Sur les trois pistes que nous avons visitées, nous avons toujours recherché les zones les plus affectées par le phénomène de la tôle ondulée de façon à pouvoir distinguer clairement les bourrelets des creux. Cependant les parties les plus affectées ne sont pas seulement constituées de bourrelets et de creux, mais aussi de zones épargnées par le phénomène, bien que circulées dans des conditions identiques. Ces zones exemptes de tôle ondulée, sont caractérisées par un cuirassement en surface, et on peut remarquer un transport de particules de sol vers l'axe de la route ou encore vers les bas-côtés.

Une autre observation faite toujours sur ce côté non affecté

de la route est que les cailloux rencontrés sont regroupés et ont pratiquement les mêmes dimensions.

Ce détail nous a fait aussitôt penser à la théorie des effets d'arrachement de JEUFFROY [6] que nous avons exposée dans le chapitre précédent. En effet, selon cet auteur, les roues des véhicules décollent au passage d'un obstacle et creusent la piste aux endroits où elles rebondissent, et les véhicules ayant, à toutes fins pratiques, les mêmes caractéristiques de suspension, rebondissent aux mêmes endroits en creusant davantage la piste donnant ainsi naissance à la tôle ondulée.

Cette théorie peut être utilisée pour expliquer la formation d'une cuirasse plutôt que de la tôle ondulée en certains endroits très circulés. En effet, les cailloux étant assez regroupés dans ces zones, ne provoquent pas le rebondissement des roues et, par conséquent, ne favorisent pas la naissance de la tôle ondulée. Dans les zones affectées, on remarque aussi, bien que ce ne soit pas une règle générale, la formation de cuirasse au niveau des creux; mais contrairement aux zones non affectées, les gros cailloux rencontrés sont assez dispersés. Ce qui d'après JEUFFROY explique bien la naissance de tôle ondulée dans cette zone. Au niveau des bourrelets par contre, la couche supérieure de sol est constituée d'un pourcentage élevé de sable. Aussi remarque-t-on nettement que ce sable provient d'une autre zone. Mais cela ne veut pas dire qu'au niveau des bourrelets l'on ne retrouve pas de cailloux! Il suffit de se rappeler que les roues des véhicules en décollant au passage d'obstacles, chutent en des endroits formant des creux et les

bourrelets sont formés aux lieux où se situent ces obstacles qui à l'origine pourraient être de gros cailloux ou simplement une accumulation de matériaux chassés dans les zones de glissement.

Les observations qui viennent d'être décrites sont valables pour les pistes des axes Thiès-Sindia et Notto-Tassette. Quant à la piste de Mont-Rolland, les observations y sont différentes. En effet on ne remarque pas la formation de cuirasse dans les zones non affectées, mais une structure plutôt pulvérulente constituée de sables et de graviers fins. Cette configuration est parfois aussi mise en évidence au niveau des bourrelets et des creux. Nous pouvons donc déjà dire que les bourrelets ont été formés par arrachement de matériaux dans les creux et leur accumulation.

A la lumière de toutes ces considérations, il serait très imprudent, voire absurde, de ne pas considérer séparément les bourrelets, les creux et les parties non affectées lors des prélèvements étant donné que les caractéristiques diffèrent sensiblement d'une partie à l'autre. C'est donc la procédure que nous avons adoptée. Signalons aussi que lors des prélèvements, nous avons veillé particulièrement à ce que la structure granulométrique du sol soit le moins possible perturbée.

Sur la piste Thiès- Sindia qui représente la piste la plus dégradée des trois, les caractéristiques moyennes des ondes rencontrées sont :

- longueur d'onde : 80 cm
- amplitude : 5 cm

Sur les pistes de Mont-Rolland et de Notto-Tassette, la

longueur et l'amplitude moyenne des ondes, sont légèrement inférieures à ces valeurs. Elles sont respectivement égales à 60 et 4 cm. Ces caractéristiques des ondes (longueur et amplitude) sont deux paramètres pouvant valablement renseigner sur le niveau de dégradation de la chaussée.

4.2 Essai d'analyse granulométrique

L'effet liant des sesquioxides provoque une agglutination des fractions fines argileuses en fractions plus grosses. Cet effet se fait le plus sentir dans les zones cuirassées. Un tamisage à sec engendrerait alors des erreurs grossières en considérant comme grosses particules, des amas de particules fines. Nous avons donc adopté dans de pareilles circonstances, "la méthode humide" pour le tamisage. Dans les cas où l'utilisation de cette méthode ne se justifiait pas, nous avons tout simplement exécuté le tamisage à sec. Les résultats des essais d'analyse granulométrique sont présentés aux pages suivantes.

4.2.1 Interprétation des courbes granulométriques

Il n'est guère possible, sur un plan général, de définir une où des granularités types, mais le BCEOM-CEBTP [1] signale que les tout-venants latéritiques présentent une caractéristique commune, ou tout au moins très répandue : l'absence de sable, en général entre 0.5 et 2 mm, qui se manifeste par un palier marqué de la

COURBE GRANULOMETRIQUE

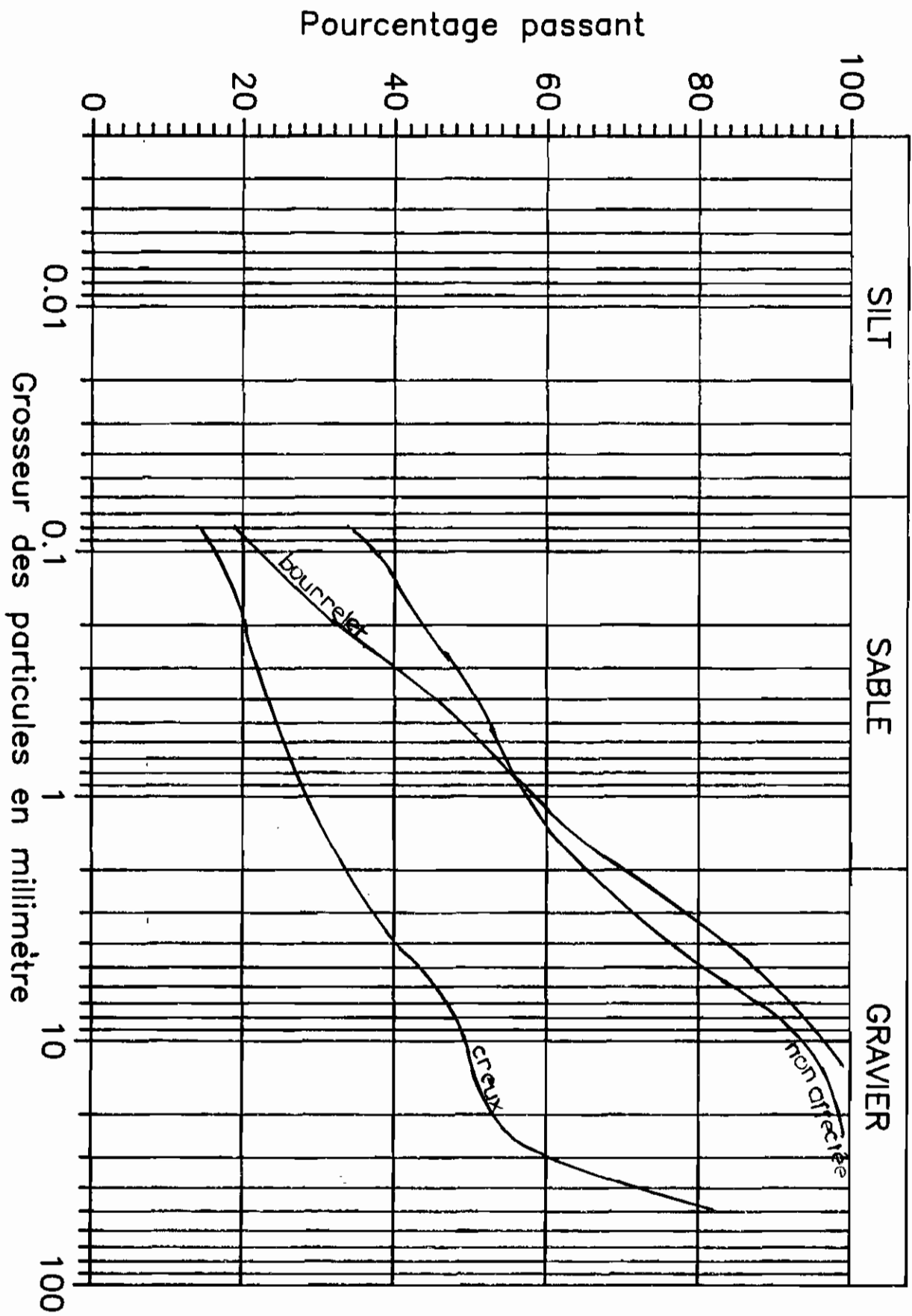


Fig 4.1 : Piste Thies – Sindia

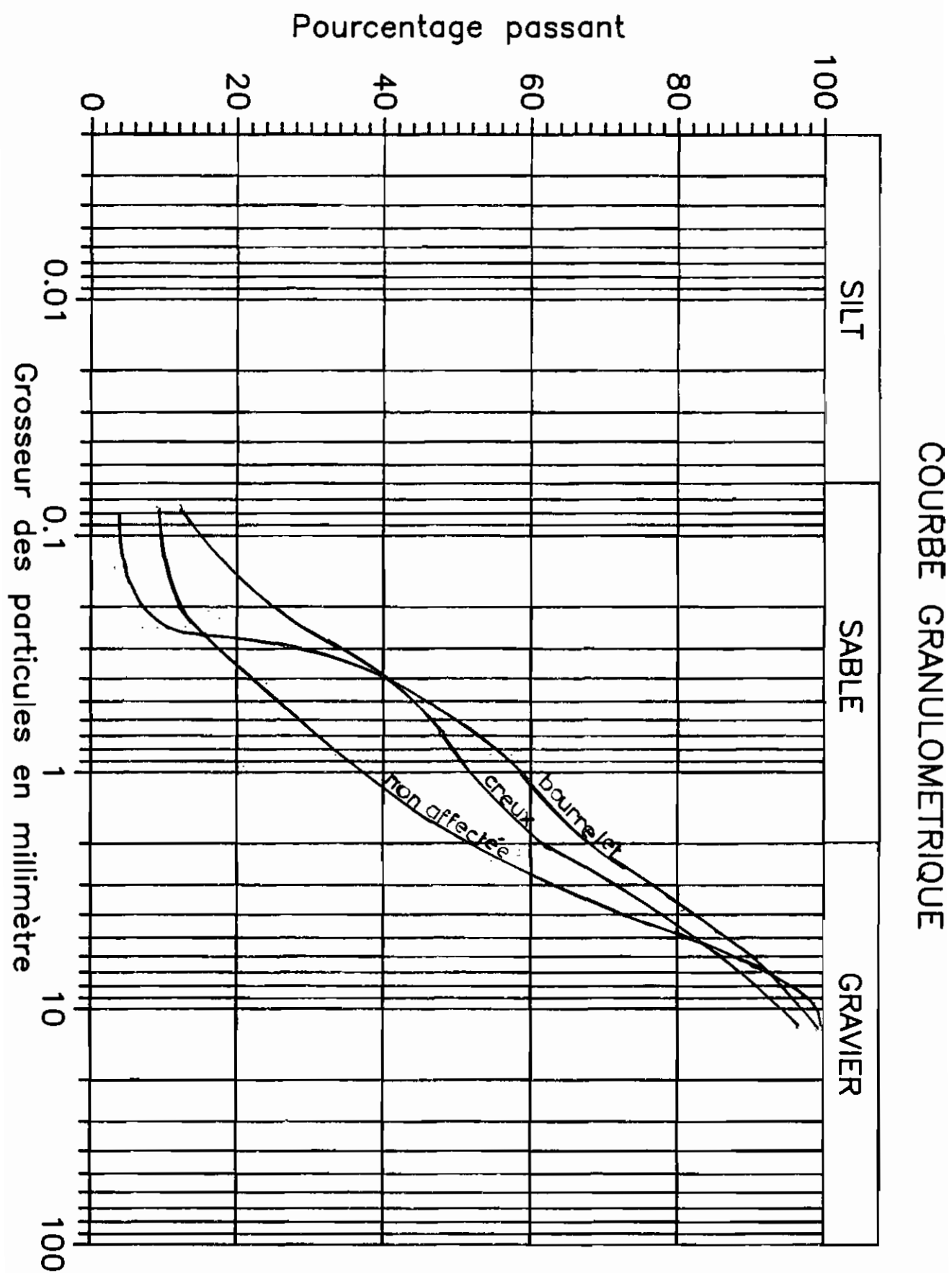


Fig 4.2 : Piste Thies - Mont-Rolland

COURBE GRANULOMETRIQUE

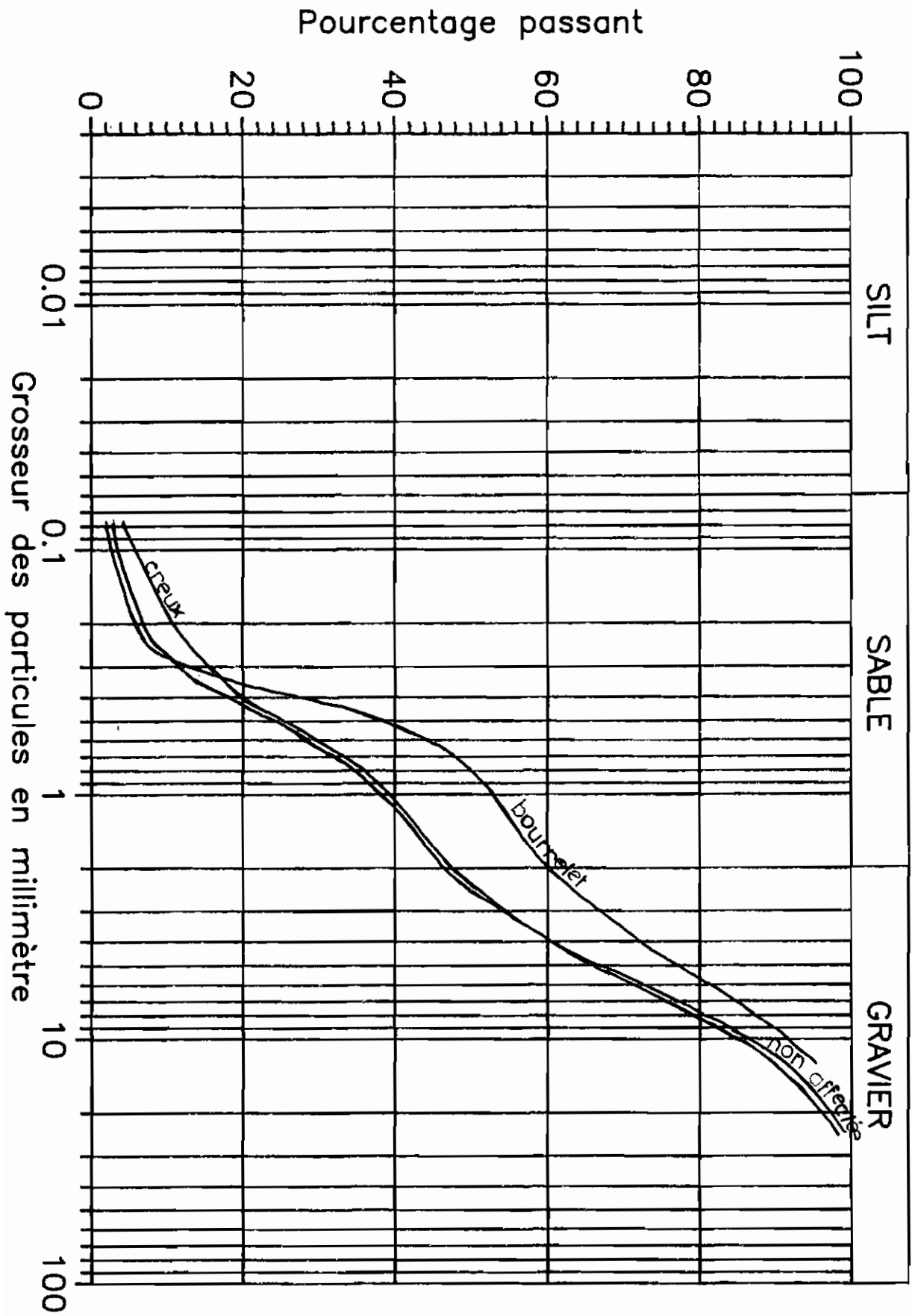


Fig 4.3 : Piste Nottol - Tassette

courbe; signe annonciateur de tôle ondulée sur les chaussées non revêtues en climat sec.

En jetant un coup d'oeil sur les 9 courbes granulométriques présentées précédemment, on se rend compte qu'aucune d'elles ne présente un palier marqué entre 0.5 et 2 mm, pourtant ce sont des courbes traduisant la granulométrie de quelques sols latéritiques affectés par la tôle ondulée.

Il ne faudrait pas voir en ce phénomène quelque chose de paradoxal. Il y a lieu de remarquer que, sous l'effet du trafic, il y a eu énormément de modifications du point de vue de la granulométrie et rien ne nous dit si le sol mis en place n'avait pas les caractéristiques du BCEOM [1] vu qu'il y a eu manifestement formation de tôle ondulée.

Par ailleurs, A. REMILLON [7] après plusieurs expériences, a proposé un fuseau granulométrique pour matériaux latéritiques utilisables en couche de roulement non revêtue. Nous avons donc repris les courbes tracées précédemment, avec lesquelles nous avons superposé le fuseau de REMILLON pour voir si elles s'y insèrent. Une fois de plus, à part l'échantillon provenant des creux de la piste Thiès-Sindia, toutes les courbes se situent pratiquement à l'intérieur du fuseau. On remarque tout de même que pour des diamètres inférieurs à 1 mm, ces courbes sortent du fuseau.

Si nous admettons que sous l'effet du trafic, il y a eu augmentation de fines, ces constatations nous amènent à supposer que les courbes granulométriques des sols ayant servi à la construction de ces pistes ne se seraient pas retrouvées à

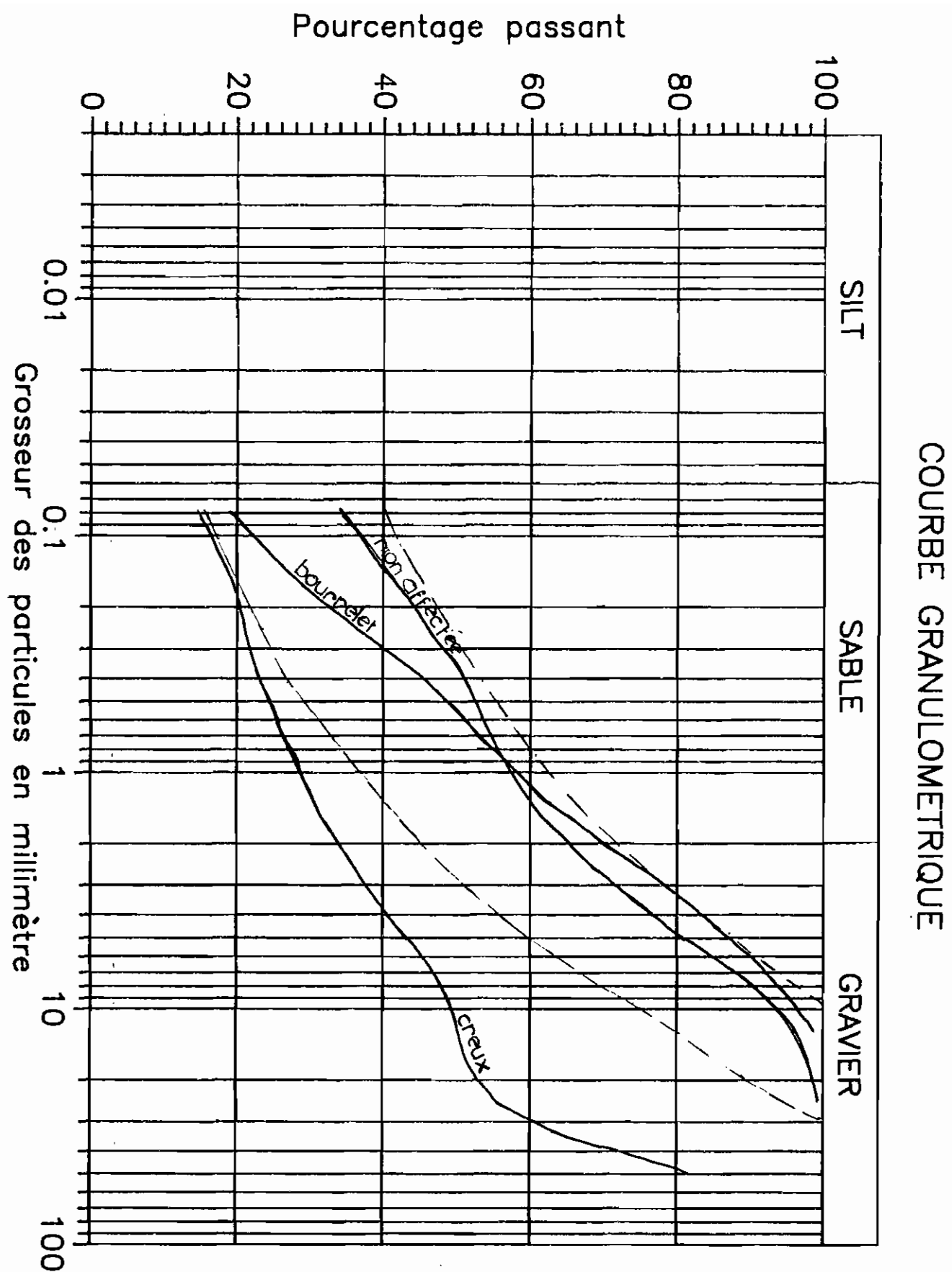


Fig 4.4 : Piste Thies – Sindia
Fuseau granulometrique de A. Remillon

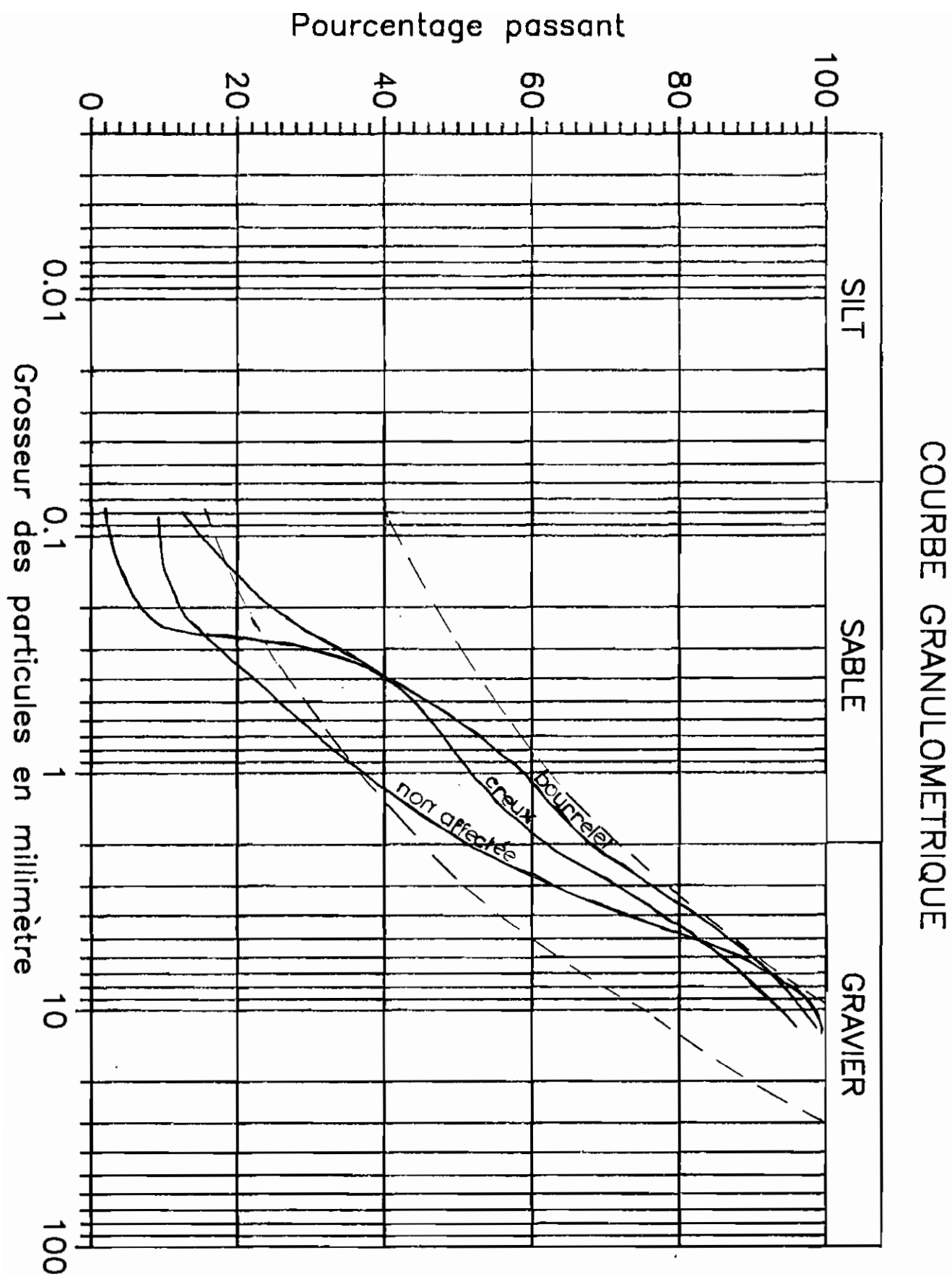


Fig 4.5 : Piste Thies - Mont-Rolland
Fuseau granulometrique de A. Remillon

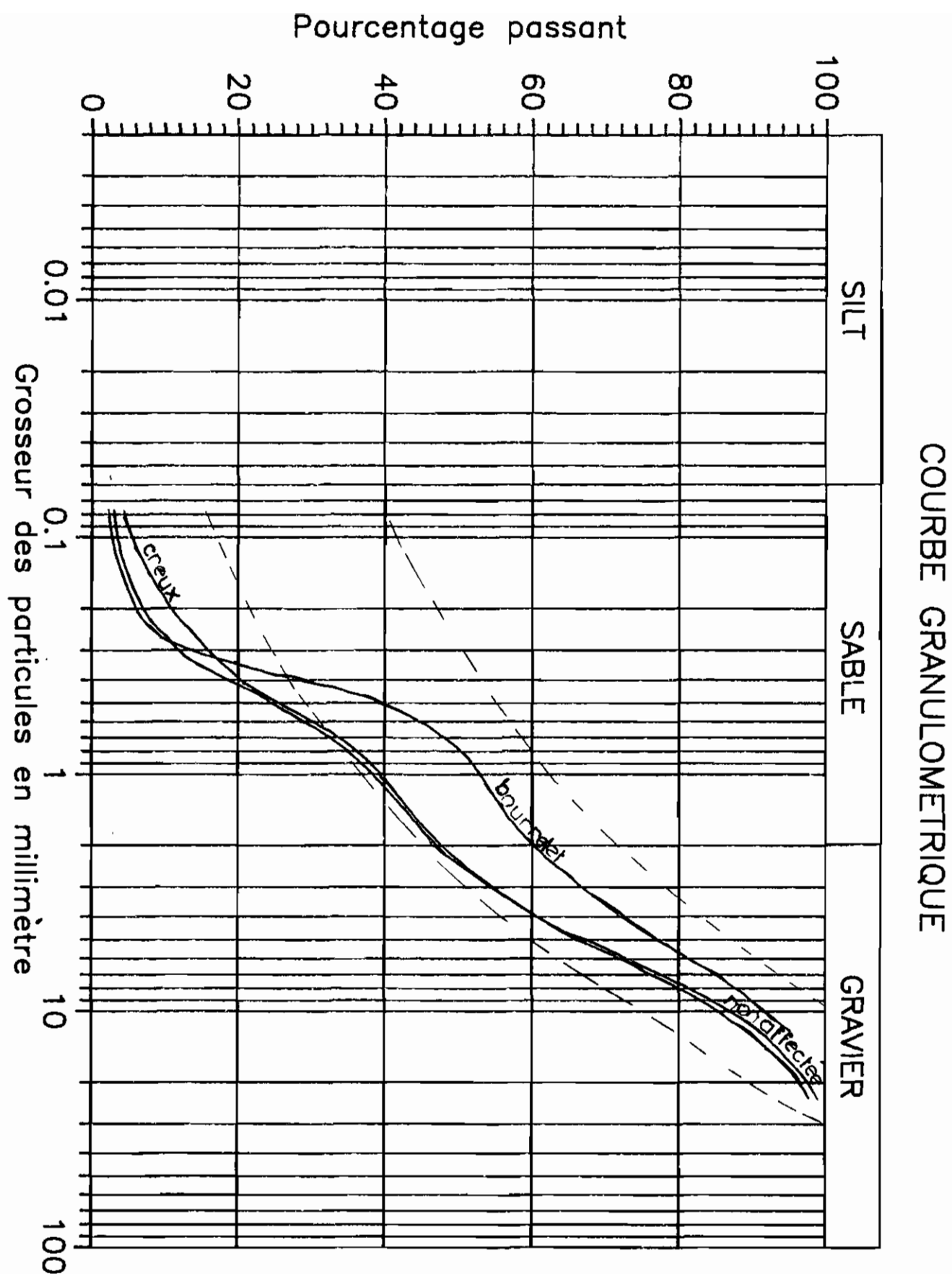


Fig 4.6 : Piste Notto — Tassette
Fuseau granulometrique de A. Remillon

l'intérieur du fuseau.

4.3

Les limites d'Atterberg

Le programme défini pour les essais de laboratoire, comportait aussi la détermination des limites de liquidité et de plasticité des différents échantillons de sol. Malheureusement, cet essai n'a pas pu nous donner des résultats satisfaisants. En effet, nous avons eu d'énormes difficultés à étaler la "pâte" de sol des différents échantillons dans la coupelle de l'appareil de CASAGRANDE. Cette opération est cependant rendue possible par l'ajout d'une quantité appréciable d'eau. Seulement dans ces conditions, la rainure se ferme après l'application d'au plus 10 chocs.

Cette caractéristique des échantillons de sol que l'on retrouve au niveau des trois pistes est la conséquence du fait qu'il y ait beaucoup plus de particules sableuses que de particules argileuses et silteuses traversant le tamis n° 40.

Nous allons donc considérer que ces sols ont un indice de plasticité compris entre 0 et 5 [8]. C'est la caractéristique des sols non plastiques.

CHAPITRE 5

En nous basant sur les chapitres précédents, nous allons essayer d'interpréter le phénomène.

Du fait des oscillations verticales des roues, les efforts verticaux tout comme les efforts de cisaillement sont inconstants. lorsque pour une raison quelconque une roue "décolle", la charge verticale diminue et par conséquent, les roues motrices ne transmettent plus entièrement l'effort moteur à la chaussée. On note alors l'apparition d'un glissement qui toutefois est limité étant donné que le décollement est assez bref. Ces phénomènes sont à la base de la tôle ondulée qui en fait n'est qu'une usure mécanique des chaussées.

Lorsque les véhicules passent sur une saillie, il s'en suit donc une série de cisaillements et de glissements purs aux mêmes endroits, en aval de cette saillie, puisque les véhicules ont des paramètres de suspension voisins. Dans le cas des routes ayant un revêtement peu cohérent, les matériaux s'accumulent au niveau des bourrelets. Les premières saillies peuvent cependant être constituées de gros cailloux avant d'être recouvertes de matériaux meubles.

Enfin, la tôle ondulée est née de l'action conjuguée des effets périodiques des variations de pression (vibrations) avec l'effet abrasif permanent du pneumatique sur la chaussée. Nous obtenons alors une dégradation de la route par arrachement de matériaux.

5.1 Diagnostic de la "maladie"

A la lumière des résultats obtenus et des observations faites jusqu'ici, nous pouvons affirmer que la tôle ondulée est un phénomène lié à :

- un manque de cohésion
- une granulométrie discontinue
- une faible plasticité

5.2 Proposition d'un profil granulométrique

Proposer un profil granulométrique suppose la réalisation d'un certain nombre d'essais d'analyse granulométrique sur des latérites provenant de carrière, et ayant servi à la construction de routes non revêtues sur lesquelles le phénomène de la tôle ondulée s'est manifesté ou pas. Il est tout à fait exact que nous avons visité des pistes affectées par le phénomène, mais le plus délicat restait à déterminer avec certitude les carrières ayant été exploitées dans leur construction. Mais le fait que nous ayons des zones non affectées sur ces pistes nous donne une lueur d'espoir dans la possibilité de pouvoir proposer un profil granulométrique que devraient respecter les tout-venants latéritiques dans la construction des routes non revêtues pour prévenir ces dernières, pendant une longue période, contre la tôle ondulée.

Dans le cas où l'on envisagerait une autre solution pour la lutte contre ce fléau, le respect du profil granulométrique que

nous allons proposer pourrait constituer un prétraitement.

Nous ne saurions être très précis en ce qui concerne les proportions des différentes tailles de particules mais nous serons formels sur la taille maximale des particules. En effet, nous avons remarqué au cours de notre analyse granulométrique que les plus grosses particules se trouvaient au niveau des zones affectées et plus précisément au niveau des creux.

Nous sommes donc plus que jamais convaincus que les gros cailloux ont une très grande part de responsabilité dans le processus de formation de la tôle ondulée.

Notre profil granulométrique respectera donc les caractéristiques suivantes :

- diamètre de la plus grosse particule inférieur à 25 mm,
- correction de l'absence fréquente de sable de 0.5 à 2 mm environ
- écartement des matériaux dont la courbe présente une pente assez forte entre 2 et 5 mm; ce qui caractérise d'importantes différences de proportions de particules dans cette plage.

Toutes ces caractéristiques nous amènent à dire que notre plus grand souhait est qu'il y ait toutes les tailles de particules à des proportions pas trop différentes.

2eme PARTIE : LA STABILISATION

INTRODUCTION

Stabiliser un sol au sens large du mot, consiste à modifier une ou plusieurs de ses propriétés en vue d'améliorer ses performances mécaniques.

L'idéal serait de trouver dans un endroit déterminé le matériau ayant toutes les qualités requises pour un emploi donné, mais ce n'est malheureusement presque jamais le cas. Les ingénieurs sont donc obligés, la plupart du temps, d'agir de diverses manières lorsqu'ils sont en présence d'un sol ne donnant pas satisfaction. Par exemple, on peut procéder à la mise << hors compte >> d'un mauvais sol en employant des pieux de fondation pour transférer la charge d'un pont à travers ce sol jusqu'à une couche de portance nettement supérieure. On est aussi parfois amené à enlever complètement un mauvais sol et le remplacer par du bon sol c'est-à-dire un matériau sélectionné [8].

Le traitement d'un sol en vue d'améliorer ses propriétés est aussi une technique employée par les ingénieurs. Ce traitement, c'est la stabilisation. Il fait essentiellement l'objet de cette partie du projet. On distingue plusieurs types de stabilisation :

- la stabilisation par drainage
- la stabilisation électrique
- la stabilisation par chauffage
- la stabilisation par refroidissement
- le traitement au ciment Portland ou à la chaux.

Nous ne nous intéresseront qu'à la stabilisation mécanique et au traitement avec le ciment Portland dans toute la suite du projet. En effet, nous estimons que les autres types de stabilisation nécessitent des techniques onéreuses et ne sauraient de ce fait se justifier dans nos pays en voie de développement.

CHAPITRE 6

6.1 Description des procédés de stabilisation retenus

Le traitement au ciment Portland et la stabilisation mécanique étant les deux méthodes que nous avons retenues pour prévenir le phénomène de la tôle ondulée sur les routes non revêtues, il serait tout à fait nécessaire que nous présentions clairement les principes qui les régissent.

6.1.1 Le traitement au ciment Portland

Les réactions chimiques qui se produisent lors de l'hydratation d'un ciment et le mécanisme suivant lequel le ciment stabilise le sol ne sont pas bien connus. On pense que le ciment (un ciment classique contient environ 63% de CaO , 21% de SiO_2 , 6% de Al_2O_3 , 3% de Fe_2O_3 , 3% de MgO , plus d'autres d'oxydes) réagit avec un sol siliceux en liant des particules les unes aux autres [8].

Le traitement d'un sol ou d'un matériau d'assise au ciment consiste à lui **ajouter une quantité définie de ciment**, en général relativement faible, et également une quantité d'eau, à malaxer soigneusement l'ensemble pour obtenir une répartition homogène du ciment, puis à mettre en place et compacter le mélange obtenu. Le ciment s'hydrate alors et provoque un durcissement du matériau en liant les éléments de ce dernier les uns aux autres, lui confère aussi de la cohésion, et conduit par conséquent à un matériau

monolithique [11].

6.1.2 La stabilisation mécanique

Par stabilisation mécanique, on entend toute **modification de la granulométrie et de la teneur en eau** provoquant une amélioration de l'aptitude au compactage ou d'autres propriétés dépendant de la structure.

Pour lutter efficacement contre la tôle ondulée, le matériau granulaire, constitué dans son ensemble d'une "armature" d'autant plus résistante que le volume des vides est moindre, devra avoir un coefficient de qualité élevé et ne pas être friable (bonne résistance aux chocs et à l'usure). En d'autres termes, la stabilisation mécanique est une correction granulométrique, laquelle correction peut revenir relativement chère suivant le procédé utilisé [8]. Nous nous contenterons, en ce qui concerne les besoins de ce projet, de corriger la granulométrie du matériau que nous aurons à utiliser en y ajoutant les fractions manquantes qui se traduiront sur la courbe granulométrique par un palier plus ou moins marqué dépendant du degré d'imperfection

6.2 Essais de laboratoire

Pour la suite des essais de laboratoire, nous utiliserons un matériau provenant de la **carrière de la Station de Télévision à Thiès**.

D'après les renseignements fournis par le Service Régional des Travaux Publics de Thiès, cette carrière aurait servi à construire une portion de la piste Thiès-Sindia dont nous avons parlé dans la première partie du projet. Le programme des essais de laboratoire adopté est le suivant :

- Analyse granulométrique du matériau de carrière
- Essai Proctor modifié
- Essai de compression simple
- Essai de traction

6.2.1 Les essais proprement dits

6.2.1.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été faite comme précédemment suivant la norme **ASTM D-422**. la courbe granulométrique est présentée à la figure 5.1. Nous y avons aussi représenté le fuseau proposé par REMILLON [7] pour voir si ce matériau remplit les exigences minimales d'utilisation pour la construction des routes non revêtues (le fuseau de REMILLON ne garantissant pas les caractéristiques requises du point de vue granulométrique pour la non apparition de la tôle ondulée).

Mais comme on peut le constater, la courbe est pratiquement en dehors du fuseau sauf pour les fractions inférieures à 1 mm. Elle a tendance à former un palier pour ces mêmes fractions ce qui traduit le fait que ces dernières ne représentent pas un

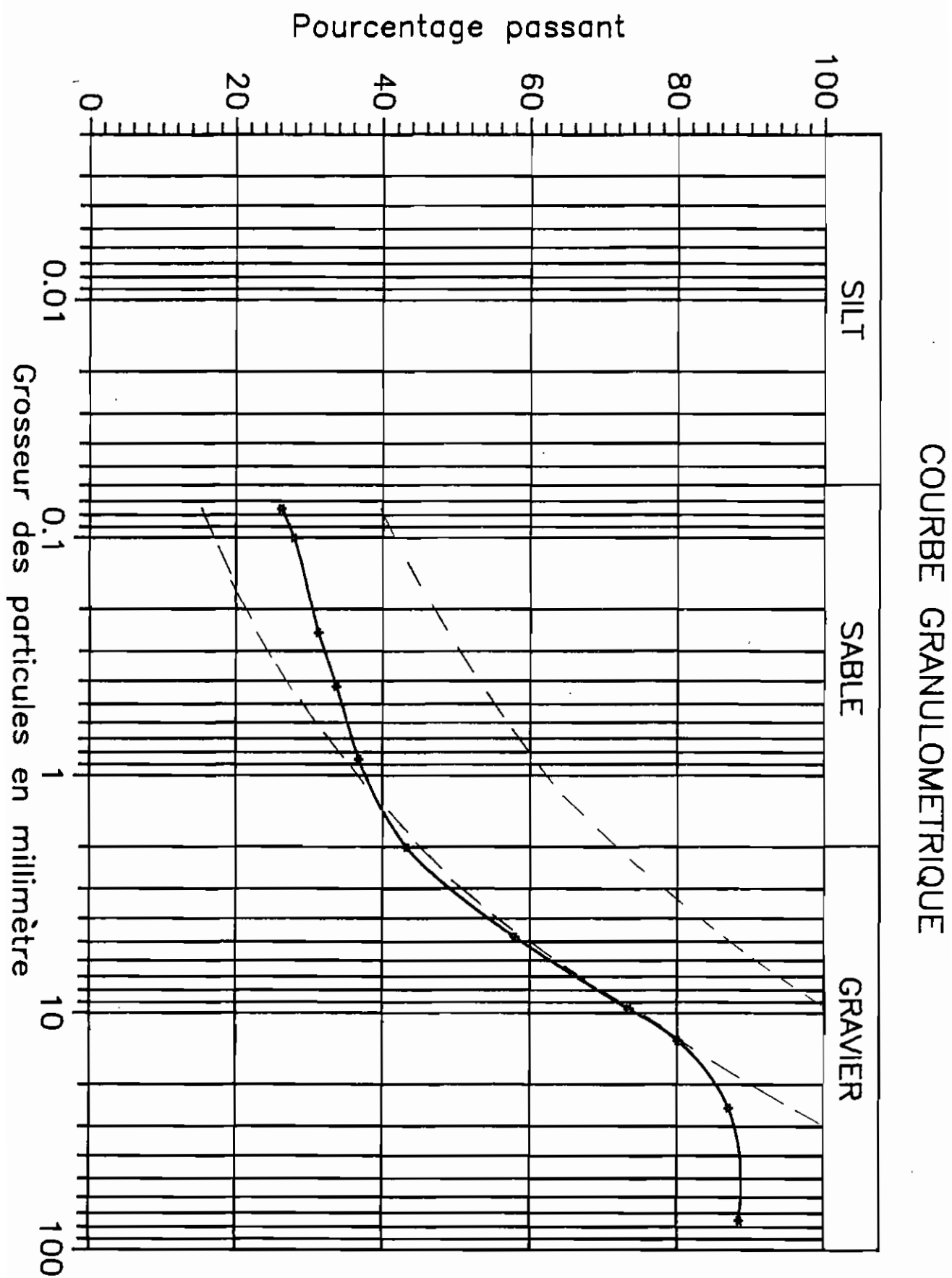


Fig 5.1 : Laterite de carrière (station, television)
Fuseau granulometrique de A. Remillon

pourcentage suffisant. Par ailleurs on observe une forte pente de la courbe dans la zone des diamètres allant de 2 à 10 mm, ce qui atteste qu'il y a de grands écarts entre les proportions de ces particules.

Nous avons montré dans la première partie que nous gagnerions beaucoup dans la lutte contre la tôle ondulée si un équilibre existait entre les différentes proportions. Cela revient à rechercher les matériaux dont la courbe est la plus étalée possible, c'est-à-dire ayant un coefficient de courbure tendant vers "1".

6.2.1.2 Essai Proctor modifié

Nous avons utilisé le même matériau que précédemment pour la réalisation de cet essai. Le compactage a alors été pratiqué pour des teneurs en ciment allant de 0% à 4% avec une incrémentation de 1% pour mieux suivre les variations provoquées par l'ajout de ce liant hydraulique. Nous n'allons pas dépasser le seuil de 4% pour des raisons purement économiques, car nous devons garder à l'esprit que la quantité de ciment est étroitement liée au volume de sol qui sera mis en place. Conscients des quantités astronomiques de matériaux utilisés dans la construction routière, nous ne saurions justifier l'utilisation d'un fort pourcentage de ciment dans une structure telle qu'une route non revêtue.

Signalons que nous avons choisi l'essai Proctor modifié parce-que les performances des engins de chantier sont comprises entre

celles d'un essai Proctor standard et d'un essai Proctor modifié (constituant la limite supérieure).

Par ailleurs, nous allons utiliser des matériaux dont les particules ont des diamètres passant le tamis 3/4" (19 mm pour nous rapprocher un peu plus des réalités du terrain, avec la possibilité d'une correction pour les particules plus grosses.

En effet, lorsque le matériau comporte une fraction notable d'éléments dont la taille est supérieure à la maille carrée de 20 mm, le CEBTP [12] recommande une correction de la teneur en eau et de la densité sèche. Toutefois, cette correction n'est valable que si cette fraction reste inférieure à 25% du poids total. Ainsi nous avons :

- Teneur en eau corrigée : $W' = W(1-m/100)$

- Densité sèche corrigée : $\gamma'_d = \frac{1}{1 + \left[\frac{m}{100} \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_s} - 1 \right) \right]}$

Où

W = teneur en eau optimale de l'essai Proctor modifié

γ_d = densité sèche maximale de l'essai Proctor modifié

γ_s = Poids spécifique absolu des éléments > 20 mm

W' = teneur en eau optimale corrigée

γ'_d = densité sèche maximale corrigée

m = pourcentage du refus à 20 mm (%)

Ne connaissant pas γ_s a priori, nous avons été amenés à déterminer le poids spécifique des constituants solides (Désignation : **ASTM D 854-58**). Nous n'allons pas décrire ici

l'expérience. Nous trouvons $\gamma_5 = 2.79$.

Par ailleurs, nous trouvons $m = 14\%$ ce qui est bien inférieur à 25% . Ainsi donc, nous respectons les exigences pour l'application de la correction.

A titre indicatif, signalons que nous avons utilisé la méthode "D" du mode opératoire de l'ASTM 1557-78 :

- diamètre intérieur du moule ----- 15 cm
- hauteur du moule ----- 11.6 cm
- poids de la dame ----- 4.5 Kg
- hauteur de chute de la dame ----- 46 cm
- nombre de couches ----- 5
- nombre de coups par couche ----- 56

Les résultats de l'essai sont présentés sous forme de courbes aux figures 5.2 à 5.6.

Remarque : Des corrections ayant été faites sur les teneurs en eau et les poids unitaires secs, nous avons donc représenté en trait plein la courbe de l'essai Proctor modifié, et en trait discontinu la courbe corrigée pour visualiser l'effet de cette correction.

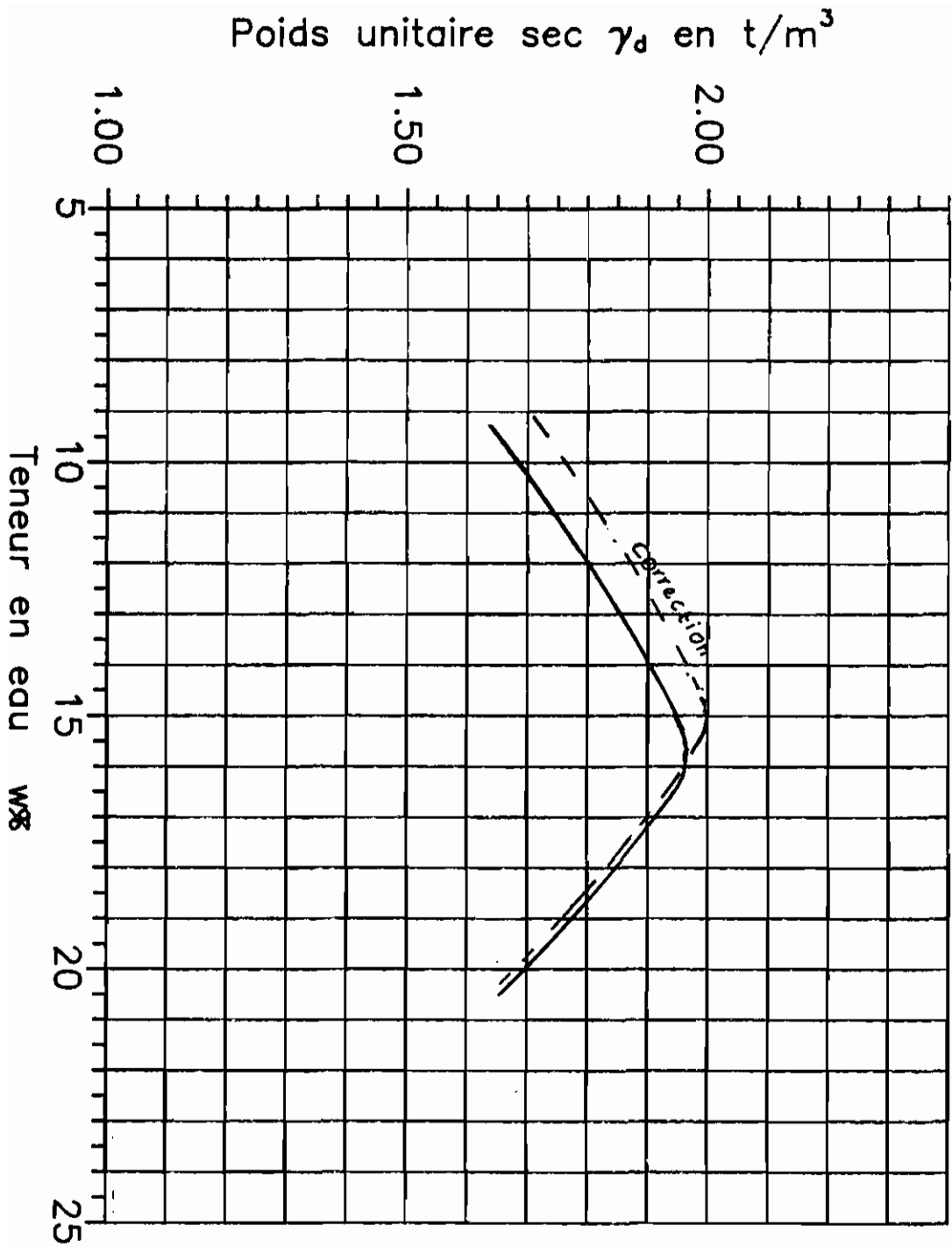
6.2.1.3 Essai de compression simple

Cet essai a été pratiqué pour les mêmes teneurs en ciment que précédemment. Le compactage a été naturellement fait à l'optimum Proctor.

Toujours dans le souci de nous rapprocher le plus possible des conditions du terrain, nous allons sécher les éprouvettes ainsi

ESSAI DE COMPACTAGE

FIG 5.2 : Description : Latérite + 0% de ciment

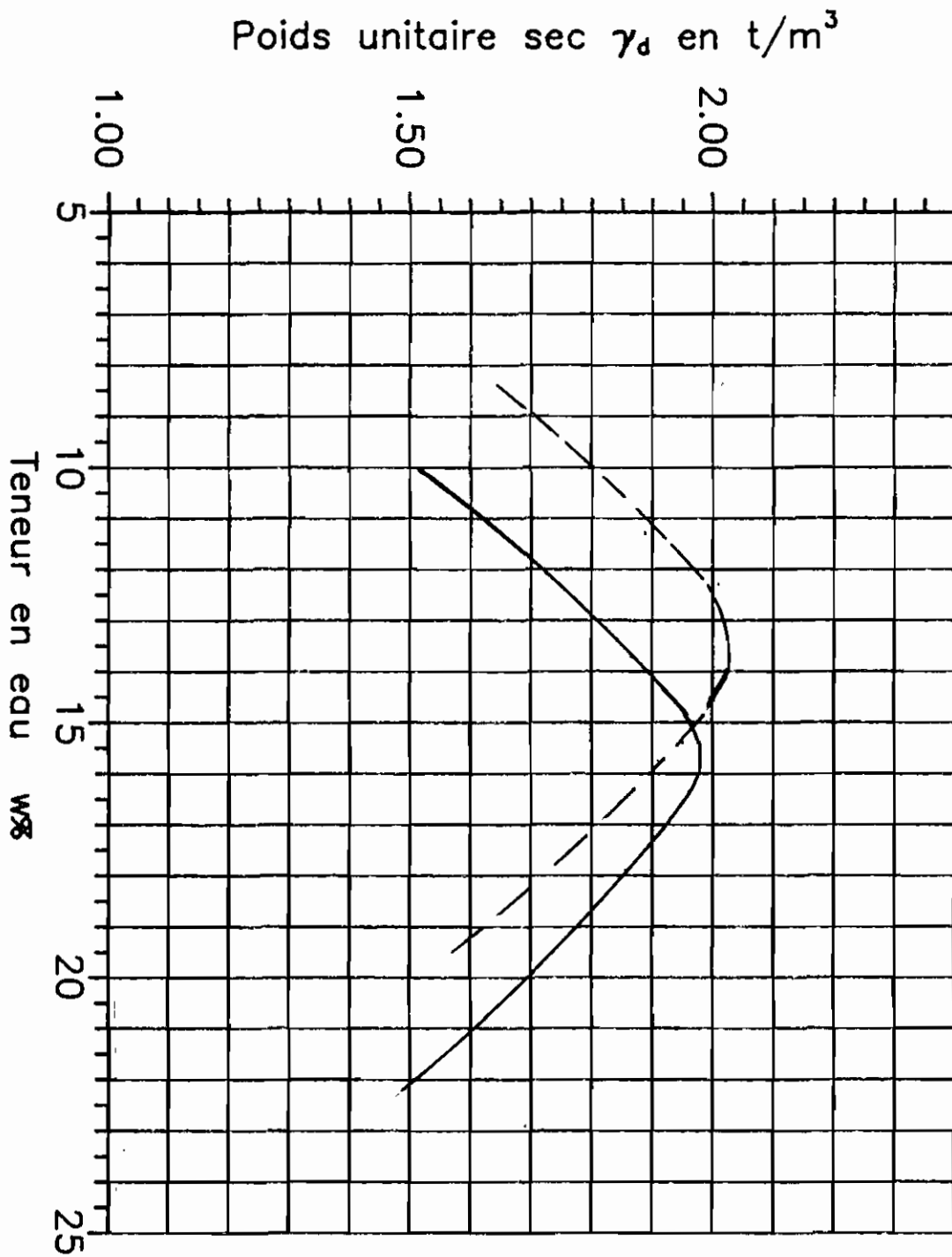


RESULTATS DE L'ESSAI

γ_d maximum = 2.0 t/m^3
 $w\%$ optimum = 15

ESSAI DE COMPACTAGE

FIG 5.3 Description : Latérite + 1% de ciment

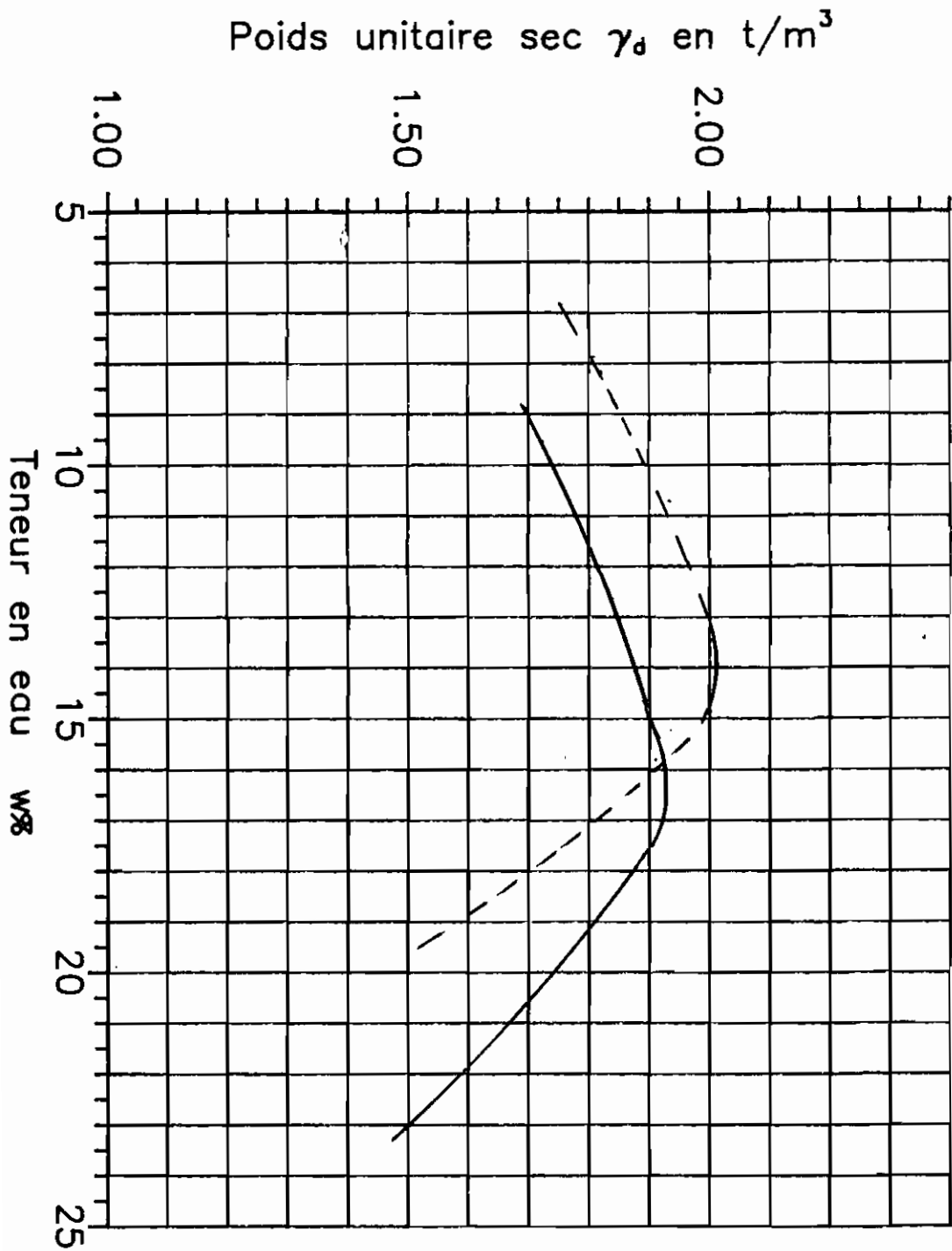


RESULTATS DE L'ESSAI

γ_d maximum = 2.02 t/m^3
 $w\%$ optimum = 13.75

ESSAI DE COMPACTAGE

FIG 5.4 Description : Latérite + 2% de ciment

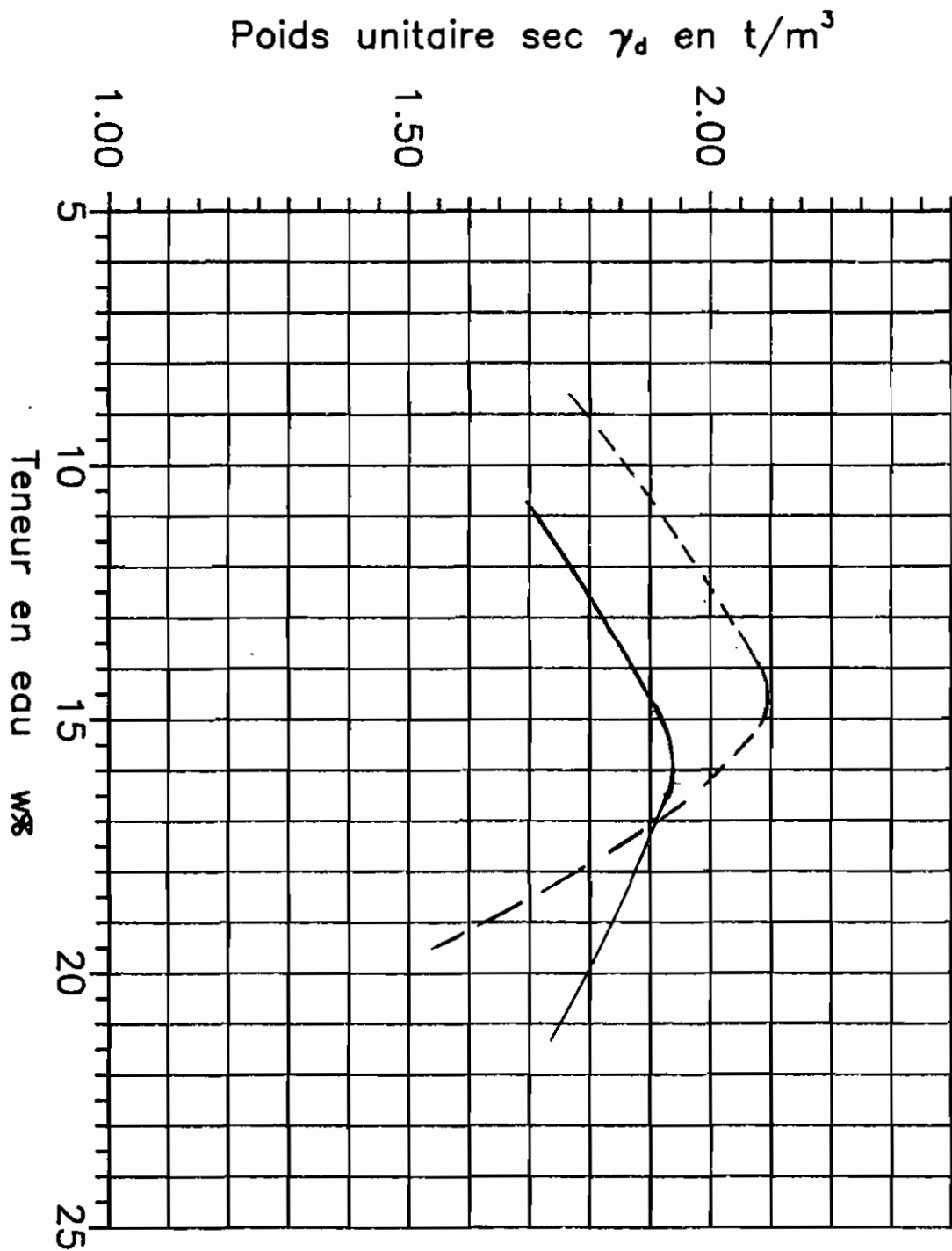


RESULTATS DE L'ESSAI

γ_d maximum = 2.01 t/m^3
 $w\%$ optimum = 14

ESSAI DE COMPACTAGE

FIG 5.5 Description : Latérite + 3% de ciment

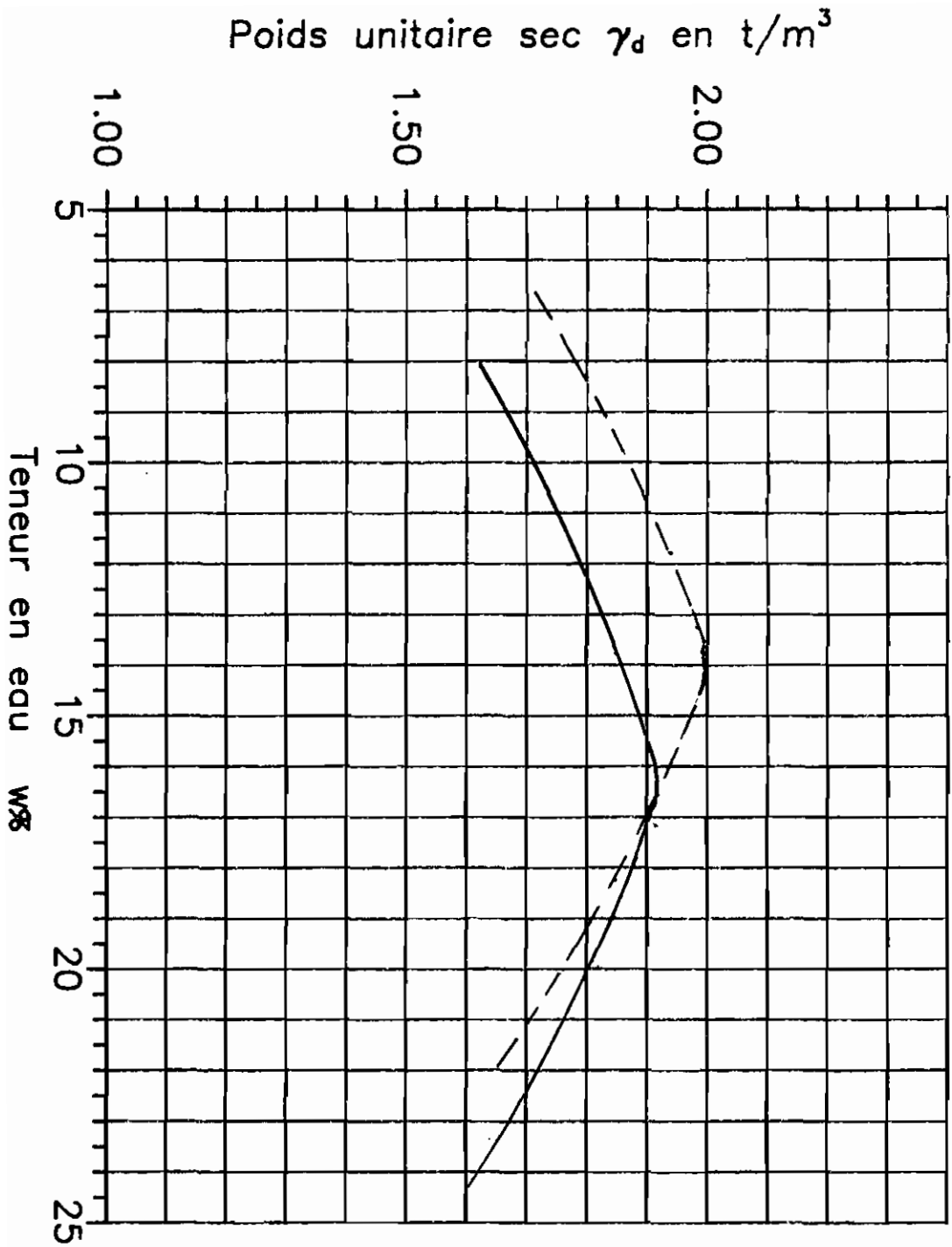


RESULTATS DE L'ESSAI

γ_d maximum = 2.09 t/m^3
 $w\%$ optimum = 14.50

ESSAI DE COMPACTAGE

FIG 5.6 Description : Latérite + 4% de ciment



RESULTATS DE L'ESSAI

γ_d maximum = 2.00 t/m^3
 $w\%$ optimum = 14

constituées à l'air pendant 5 jours avant leur écrasement, car rappelons-le, le phénomène de la tôle ondulée se fait le plus sentir en saison sèche alors que le sol a une teneur en eau très faible. IL serait donc sans intérêt pour nous de procéder à une imbibition avant écrasement.

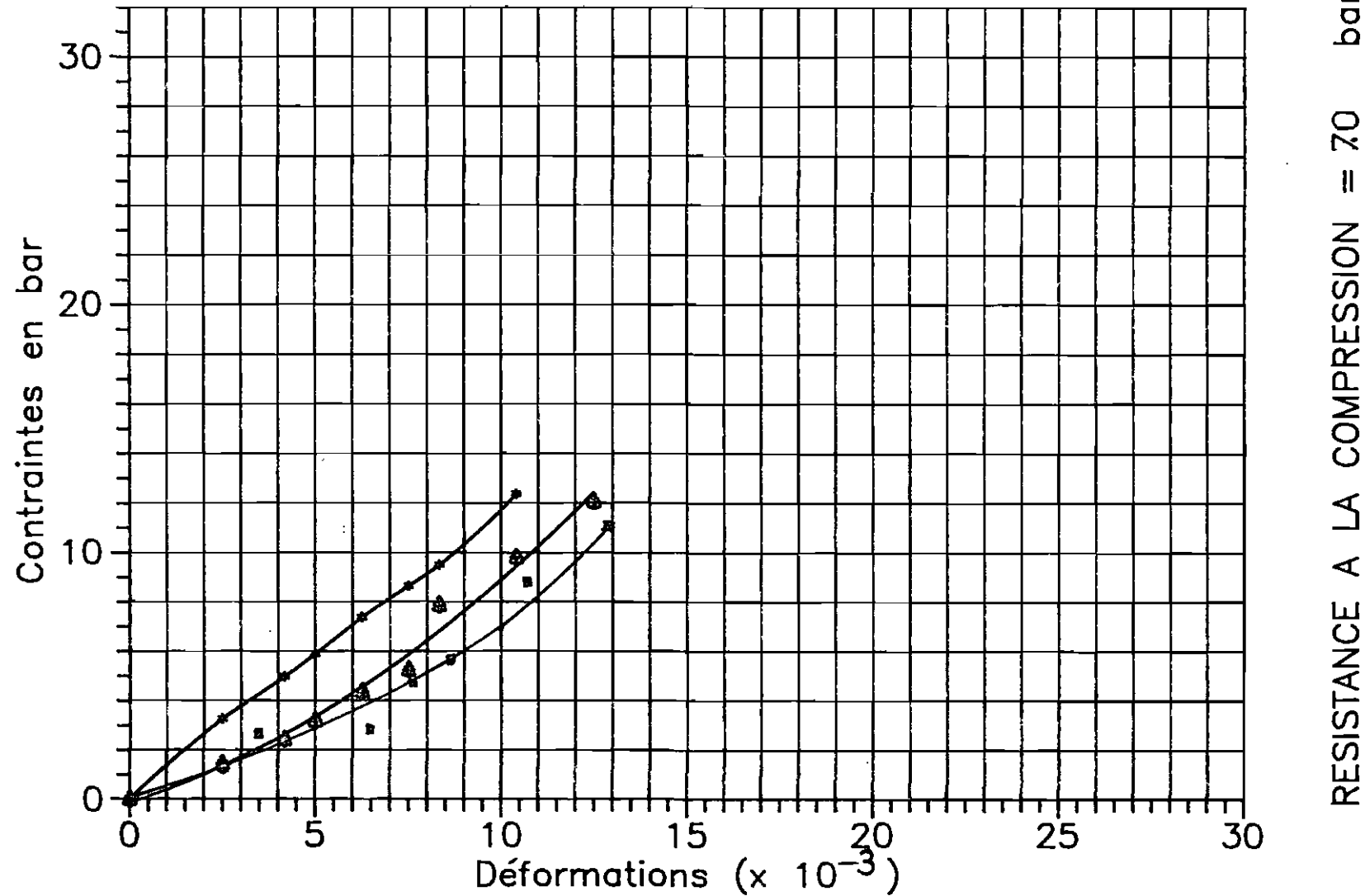
Signalons que les éprouvettes ont été réalisées dans des conditions identiques à l'essai Proctor modifié. Pour l'opération d'écrasement, les éprouvettes ont été placées verticalement offrant ainsi leurs bases circulaires à la contrainte normale σ_1 . Les figures 5.7 à 5.11 montrent les résultats de cet essai sous forme de courbes Contraintes-Déformations. Nous nous sommes seulement intéressés aux portions de courbe avant rupture totale. Ces courbes montrent que les domaines de contraintes dans lesquels la courbe expérimentale peut être remplacée par un segment de droite sont peu étendus. " Les sols ne se comportent pas élastiquement, au sens de la résistance des matériaux habituels, c'est-à-dire qu'à la décharge, une éprouvette conservera une déformation permanente importante "[13]. Mais en mécanique des sols, l'hétérogénéité des sols étant grande, en général, on peut se permettre une approximation assez grossière de la loi contraintes-déformations.

Toutes ces considérations nous ont amenés à choisir comme critère de rupture, 1% de déformation, c'est-à-dire que nous supposons que l'échantillon a atteint la rupture après s'être déformé de 1%. Cela traduit bien le fait que le domaine pseudo-élastique est très peu étendu. Il serait aussi intéressant de faire remarquer que les deux séries d'échantillons, pour les différentes

ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE

Fig 5.7

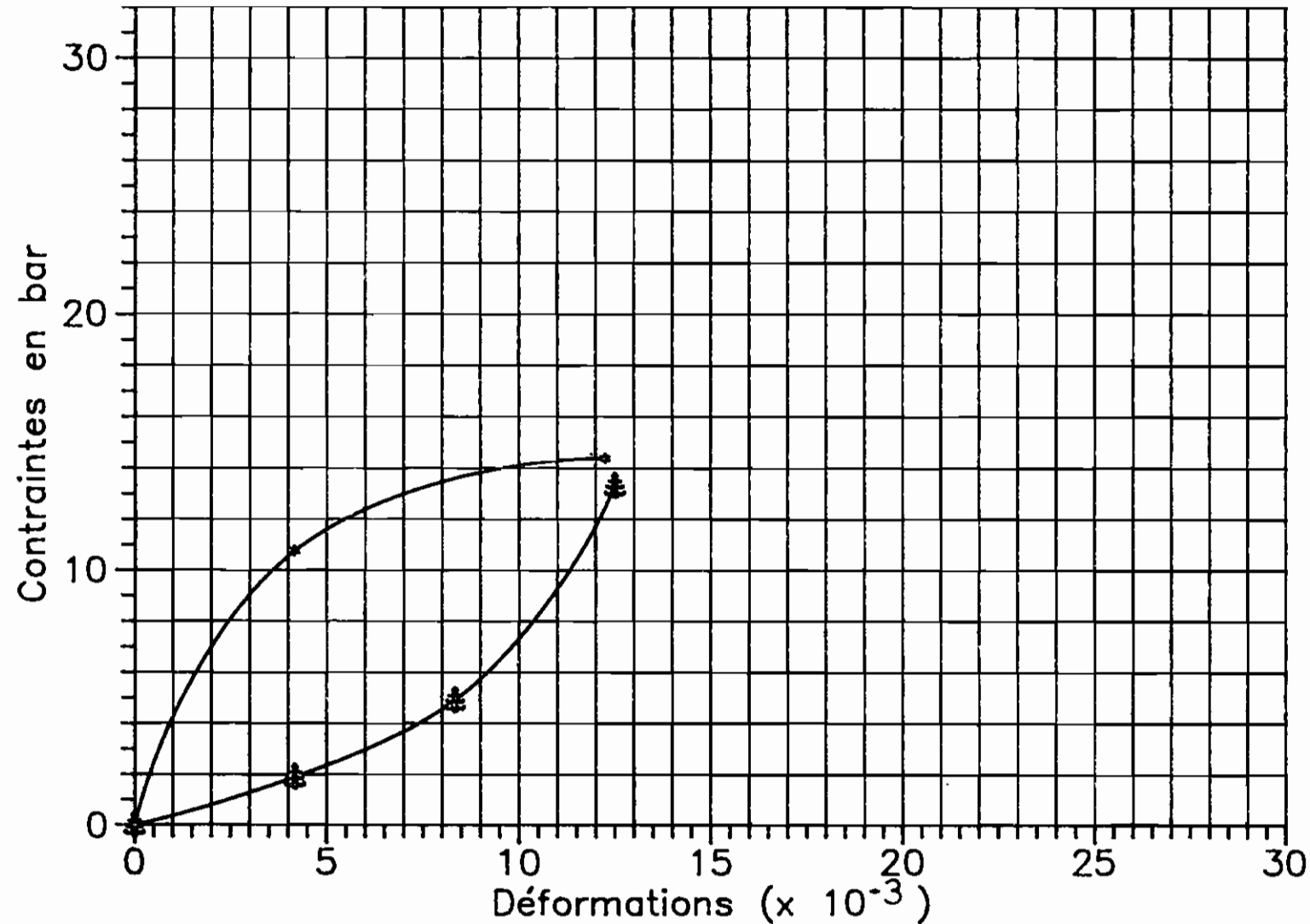
Description : Latérite + 0% de ciment
Séchage à l'air (5 jours)



ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE

Fig 5.83

Description : Latérite + 1% de ciment
Séchage à l'air (5 jours)

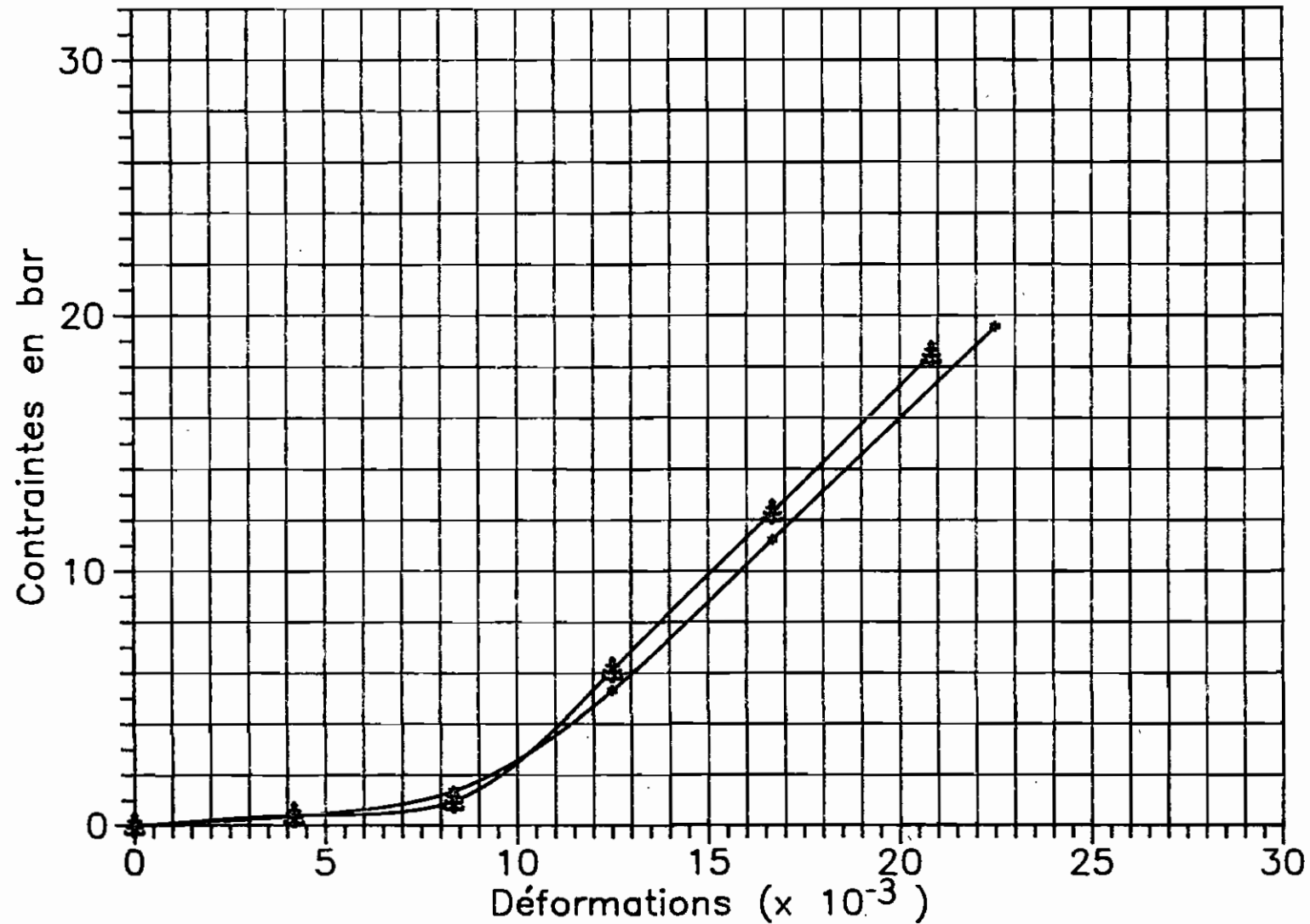


RESISTANCE A LA COMPRESSION = 7.5 bars

ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE

Fig 5.9

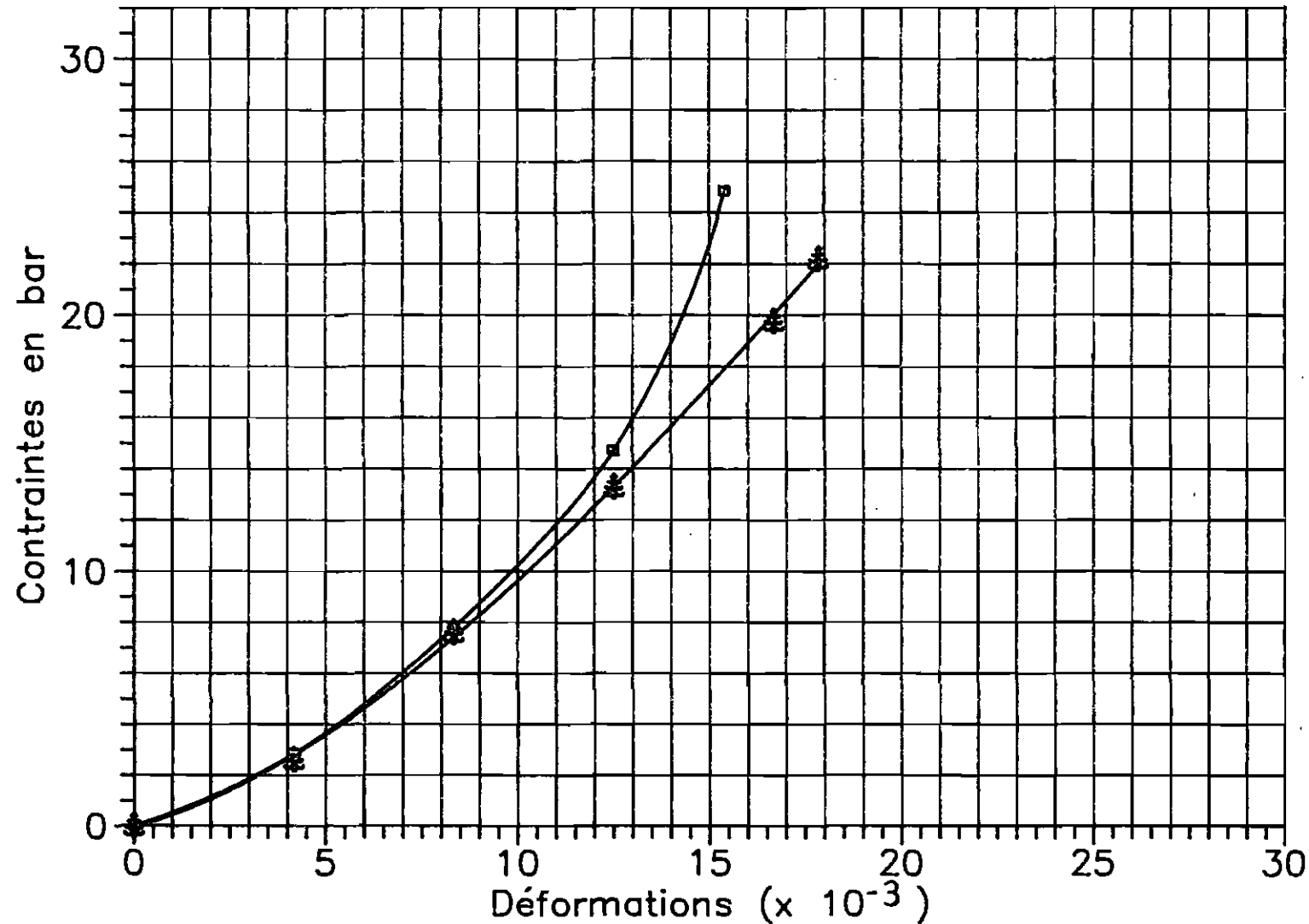
Description : Latérite + 2% de ciment
Séchage a l'air (5 jours)



RESISTANCE A LA COMPRESSION = 8.5 bars

ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE

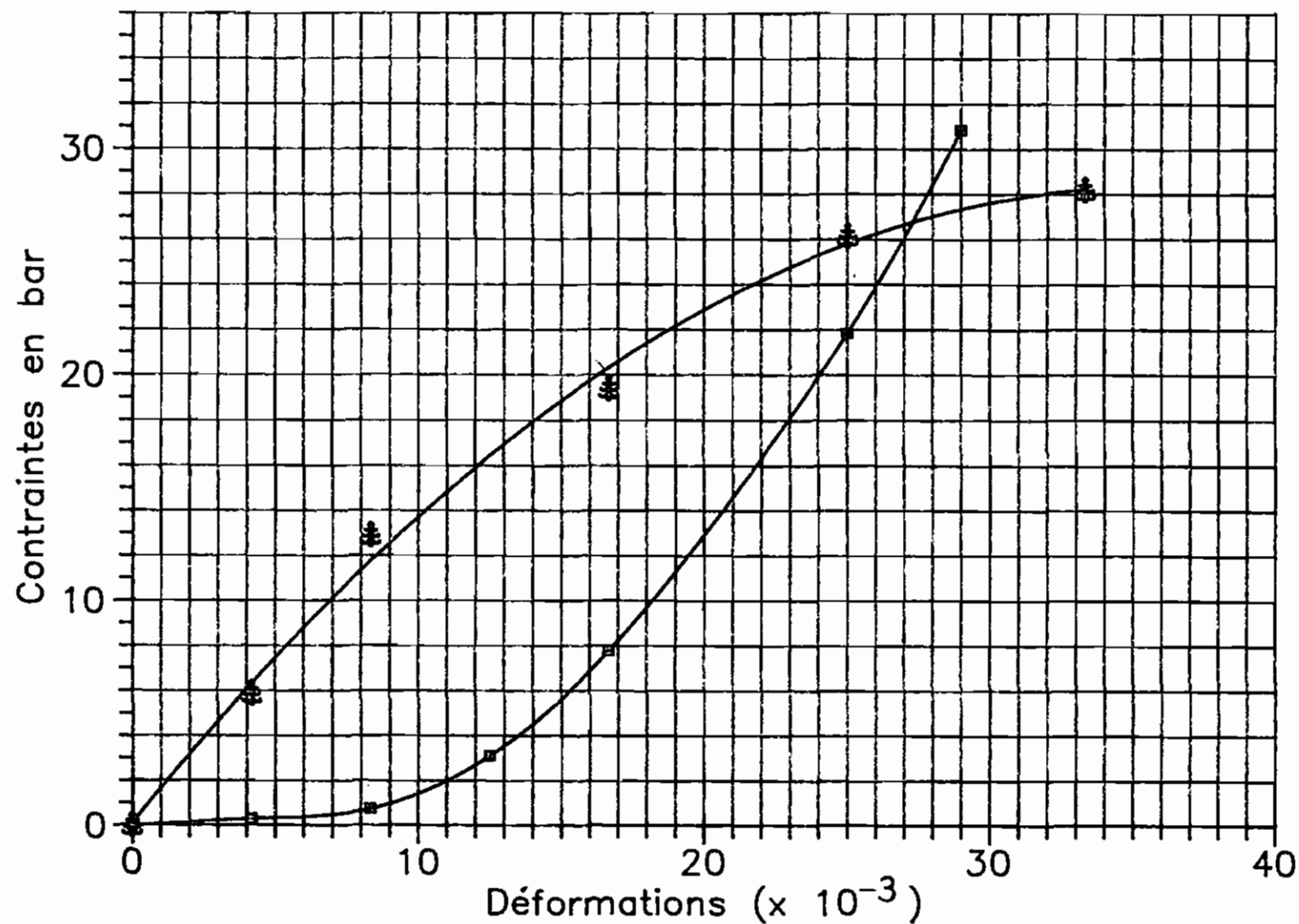
Fig 5.10 Description : Latérite + 3% de ciment
Séchage à l'air (5 jours)



RESISTANCE A LA COMPRESSION = 10.0 bars

ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE

Fig 5.11 Description : Latérite + 4% de ciment
Séchage à l'air (5 jours)



RESISTANCE A LA COMPRESSION = 14.0 bars

teneurs en ciment, subissent à peu près les mêmes contraintes pour atteindre la ruine complète. Ce phénomène est assez frappant vu que, comme le montre les différentes figures pré-citées, les courbes traduisant les différents essais pour une même teneur en ciment, empruntent souvent des chemins assez différents. En effet, le coefficient de variation des résultats d'un essai de compression simple est compris entre 30% et 150% [13]. Cette remarque est aussi valable pour l'essai de traction que nous allons commenter dans le prochain paragraphe.

5.2.1.4 Essai de traction

Les principes et les conditions de réalisation de cet essai sont exactement les mêmes que pour l'essai de compression simple à la seule différence que l'éprouvette au lieu d'être placée verticalement sur la presse, y est mise horizontalement. L'éprouvette offre de ce fait deux côtés latéraux à la contrainte normale σ_3 . C'est donc un essai de type brésilien. La résistance à la traction se calcule de la façon suivante .

$$R_t = \frac{2P}{\pi ld} \quad \text{avec,}$$

R_t = résistance à la traction (MPa)

P = charge maximale à la rupture (N)

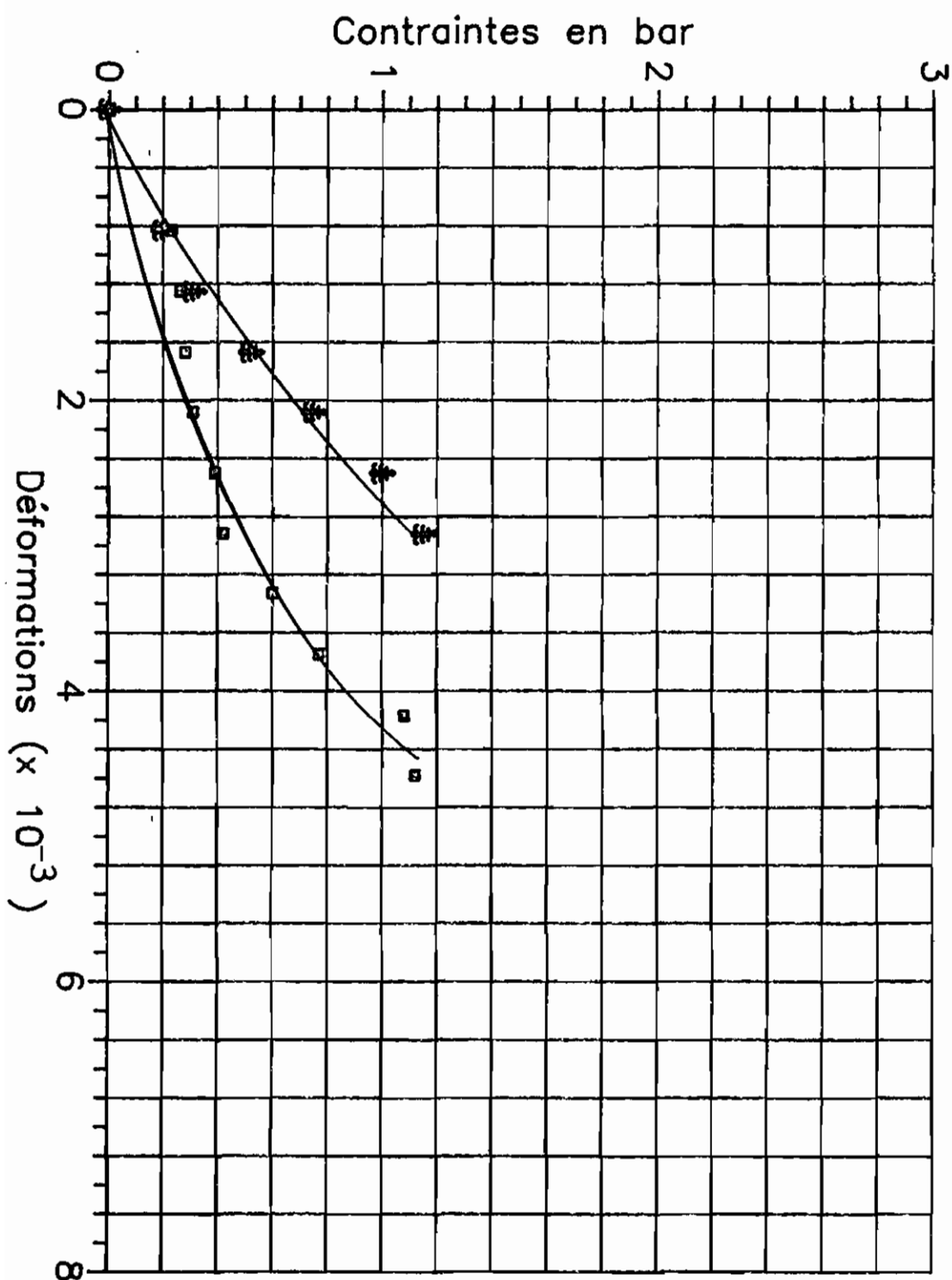
l = longueur de l'éprouvette (mm)

d = diamètre moyen (mm)

Les résultats de cet essai sont présentés sous forme de

ESSAI DE TRACTION

Fig 5.12 Description : Latérite + 0% de ciment
Séchage à l'air (5 jours)

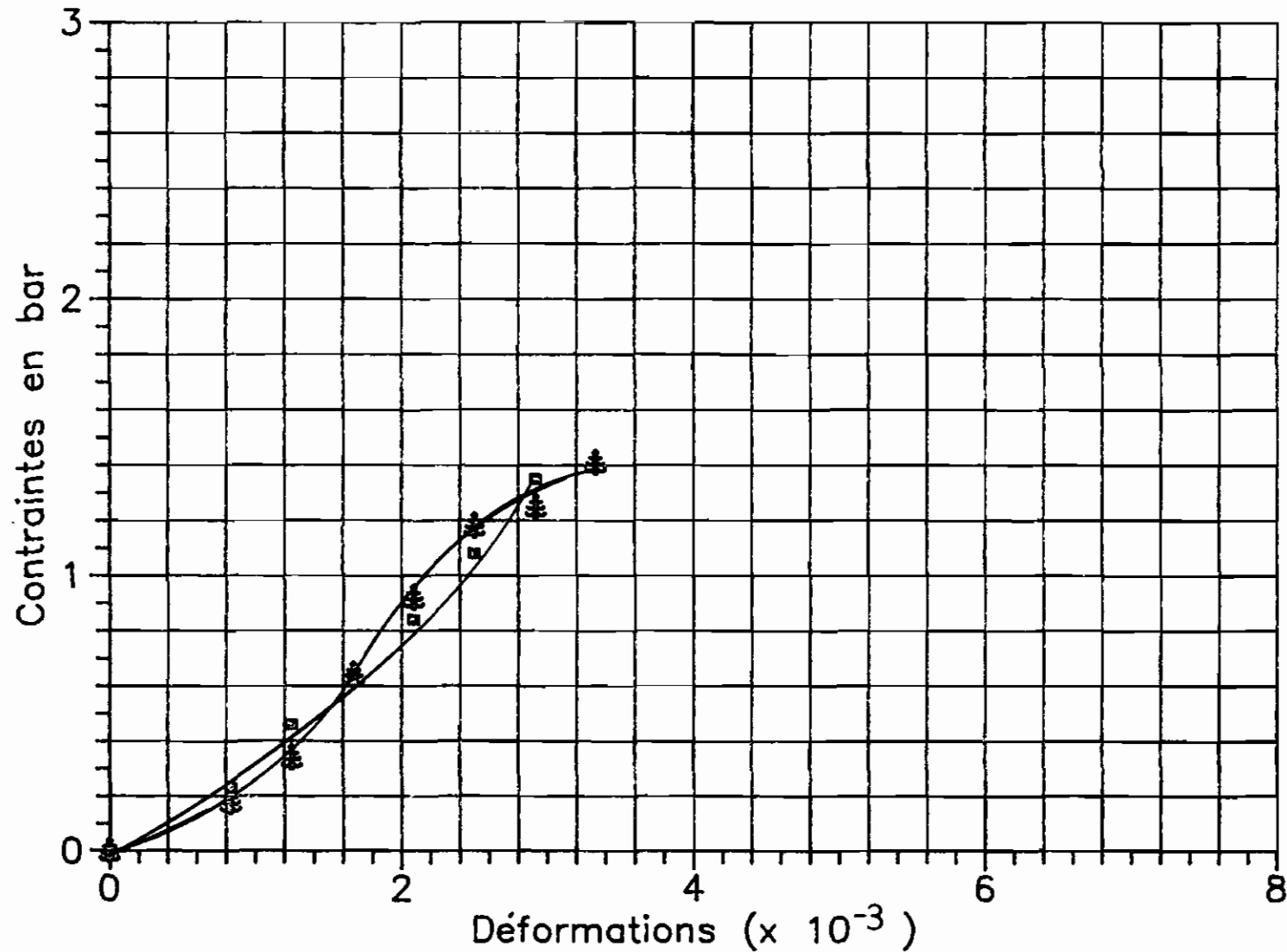


RESISTANCE A LA TRACTION = 1.14 bars

ESSAI DE TRACTION

Fig 5.13

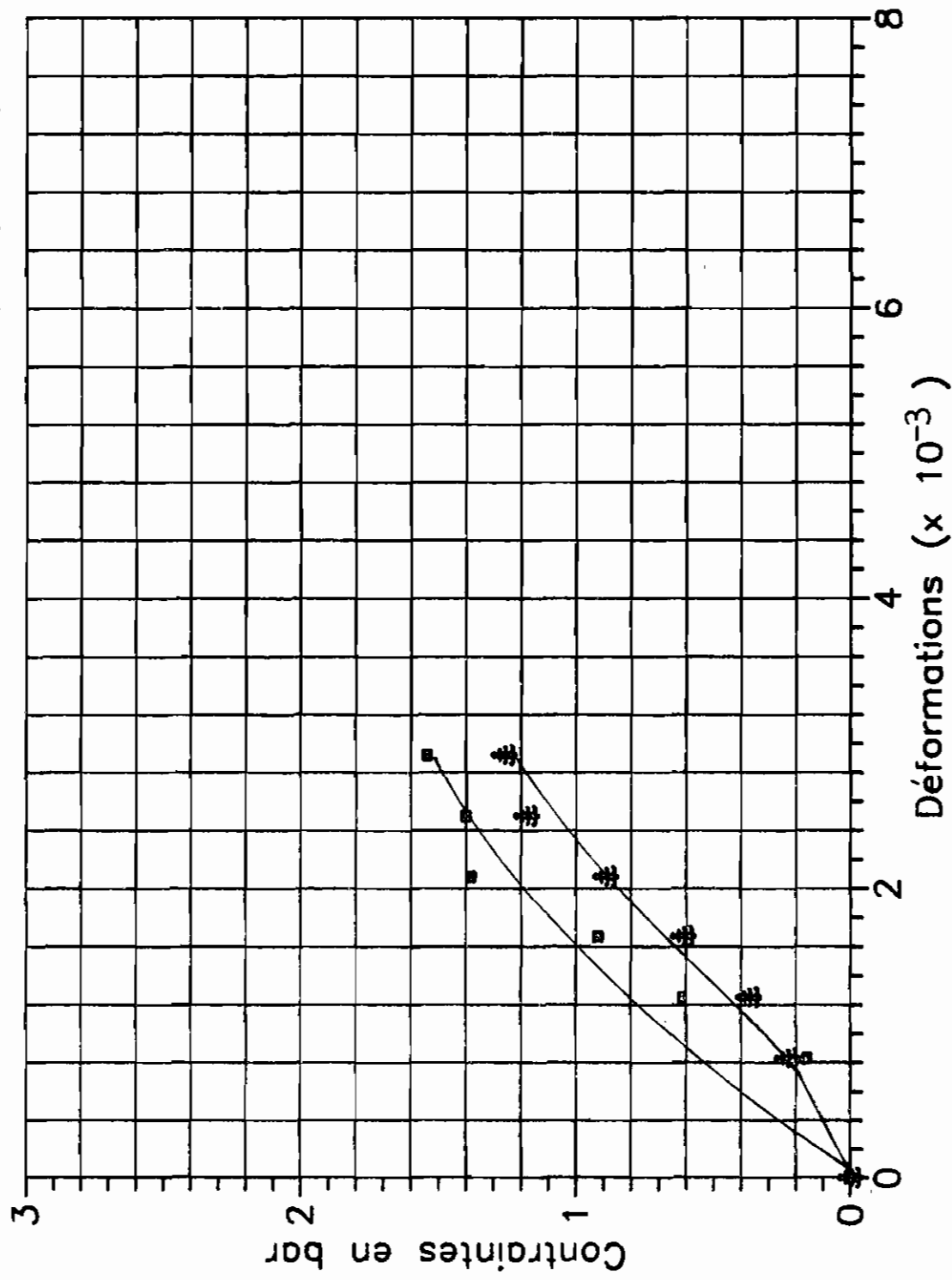
Description : Latérite + 1% de ciment
Séchage à l'air (5 jours)



RESISTANCE A LA TRACTION = 1.30 bars

ESSAI DE TRACTION

Fig 5.14 Description : Latérite + 2% de ciment
Séchage à l'air (5 jours)

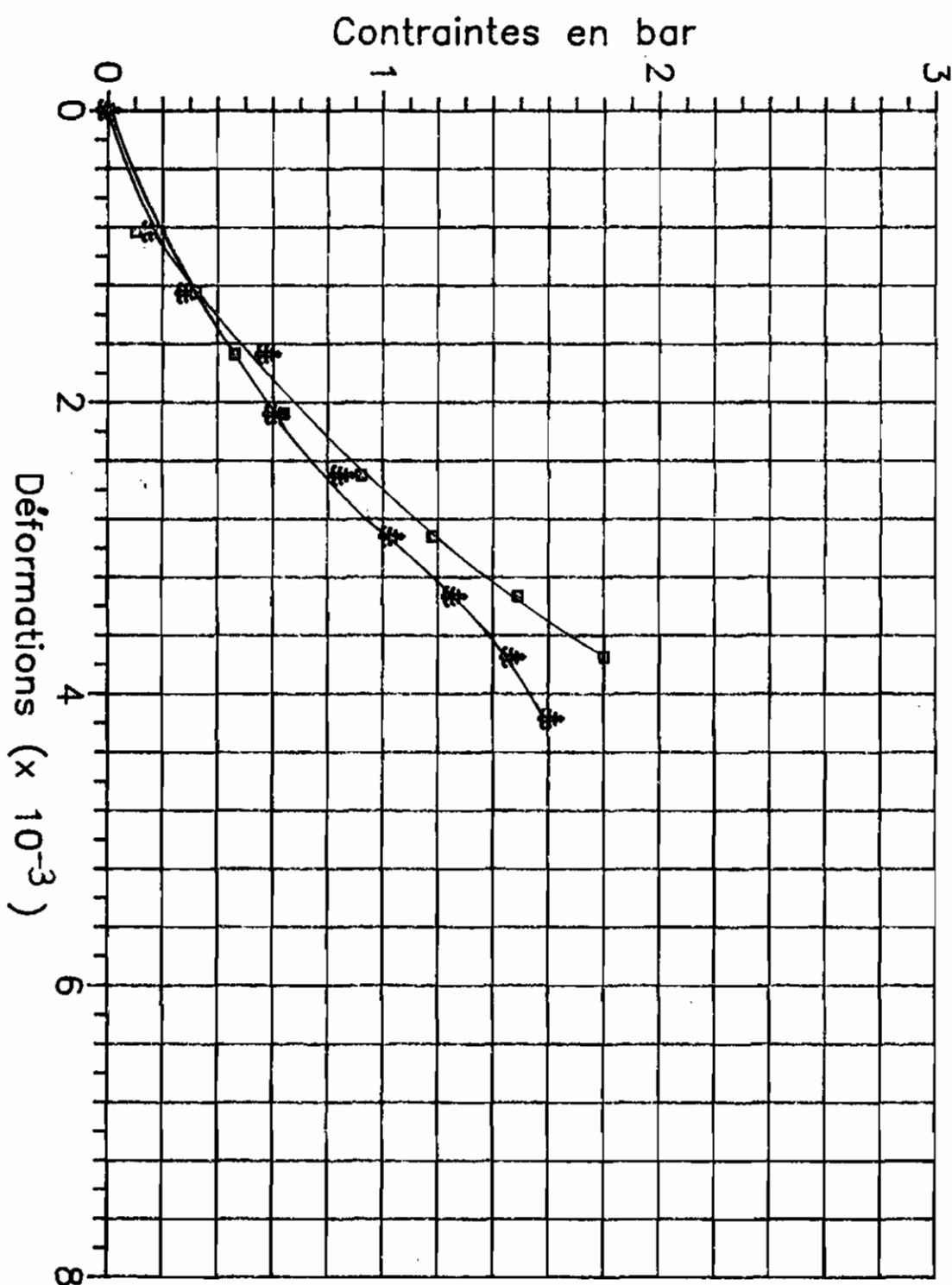


RESISTANCE A LA TRACTION = 1.40 bars

ESSAI DE TRACTION

Fig 5.15

Description : Latérite + 3% de ciment
Séchage à l'air (5 jours)

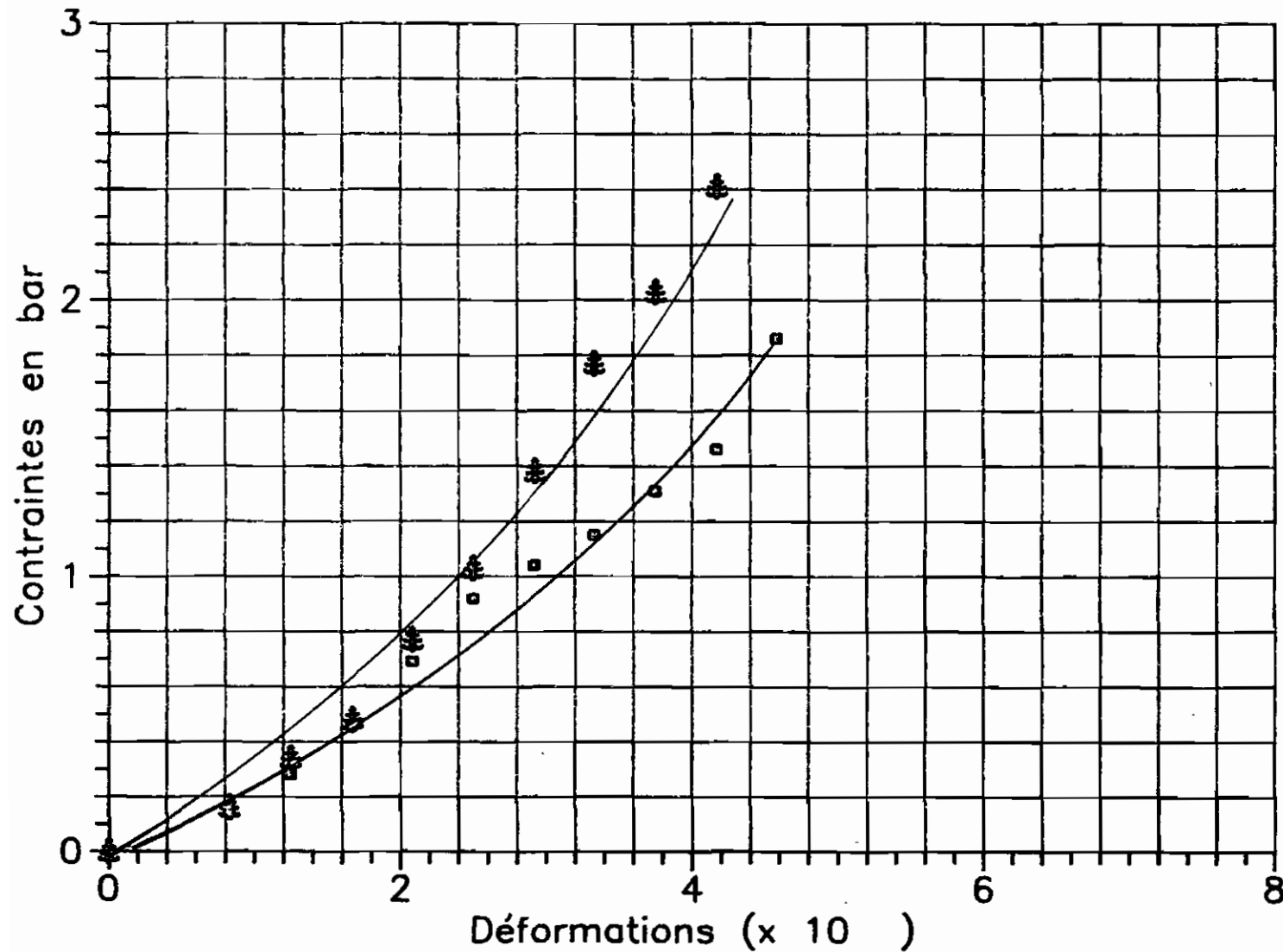


RESISTANCE A LA TRACTION = 1.71 bars

ESSAI DE TRACTION

Fig 5.16

Description : Latérite + 4% de ciment
Séchage a l'air (5 jours)



RESISTANCE A LA TRACTION = 2.14 bars

courbes contrainte-déformation comme le montrent les figures 5.12 à 5.16.

6.3 Estimation des caractéristiques de cisaillement

Les essais de compression simple et de traction (essai brésilien), avaient pour but essentiel l'estimation des caractéristiques de cisaillement du graveleux latéritique de la station de Télévision. En effet, si on arrive à déterminer la droite de Coulomb, la **cohésion** du matériau (**cu**) et son **angle de frottement interne** (**φu**) apparents s'en déduiraient aisément. Pour ce faire, nous allons utiliser le critère de résistance de **MOHR-COULOMB** qui est de loin le critère de résistance le plus populaire pour les sols : $\tau = \sigma \tan \phi_u + c_u$.

Connaissant les résistances à la compression et à la traction de notre matériau, nous pouvons tracer des cercles de MOHR en considérant pour la compression (les éprouvettes n'étant pas confinées lors de leur écrasement) que la contrainte principale majeure σ_1 est la résistance à la compression **Rc** déterminée précédemment et que la contrainte principale mineure σ_3 est nulle. Pour la traction par contre, $\sigma_3 = -R_t$ (résistance à la traction) et $\sigma_1 = 0$. Nous aurons donc pour chaque échantillon deux cercles de MOHR ayant en commun le point origine de coordonnée : $\sigma = 0, \tau = 0$.

Rappelons-le, le cercle de MOHR représente l'état de contrainte en un point à l'équilibre. Si, en considérant un cas

général, on conduit plusieurs essais similaires en faisant varier σ_3 et σ_1 , on aurait plusieurs cercles et leur enveloppe, appelée enveloppe de rupture de MOHR, définira l'ensemble des combinaisons (σ, τ) à la rupture. La droite de COULOMB n'est donc qu'une approximation de la courbe enveloppe de MOHR [14].

Si nous reconsidérons notre cas d'étude, il nous suffira donc, en nous basant sur ce qui précède, de tracer la tangente aux deux cercles de MOHR, pour obtenir la droite de COULOMB et en déduire la cohésion apparente (c_u) du matériau qui ne sera rien d'autre que l'ordonnée à l'origine, et l'angle de frottement interne ϕ_u est donné par l'angle que fait la droite intrinsèque avec l'axe des σ ($\tau = \sigma \tan \phi_u + c_u$). Les figures 5.17 à 5.21 montrent les courbes intrinsèques pour chaque type de matériau. Le tableau 5.1 récapitule les différents résultats obtenus.

Station Télévision (éprouvettes séchées 5 jours à l'air)		
Ciment (%)	c_u (bar)	ϕ_u (°)
0	1.4	45
1	1.5	45
2	1.8	43
3	2.0	43
4	2.8	45

Tableau 5.1 Valeurs de c_u et ϕ_u pour différents % ciment

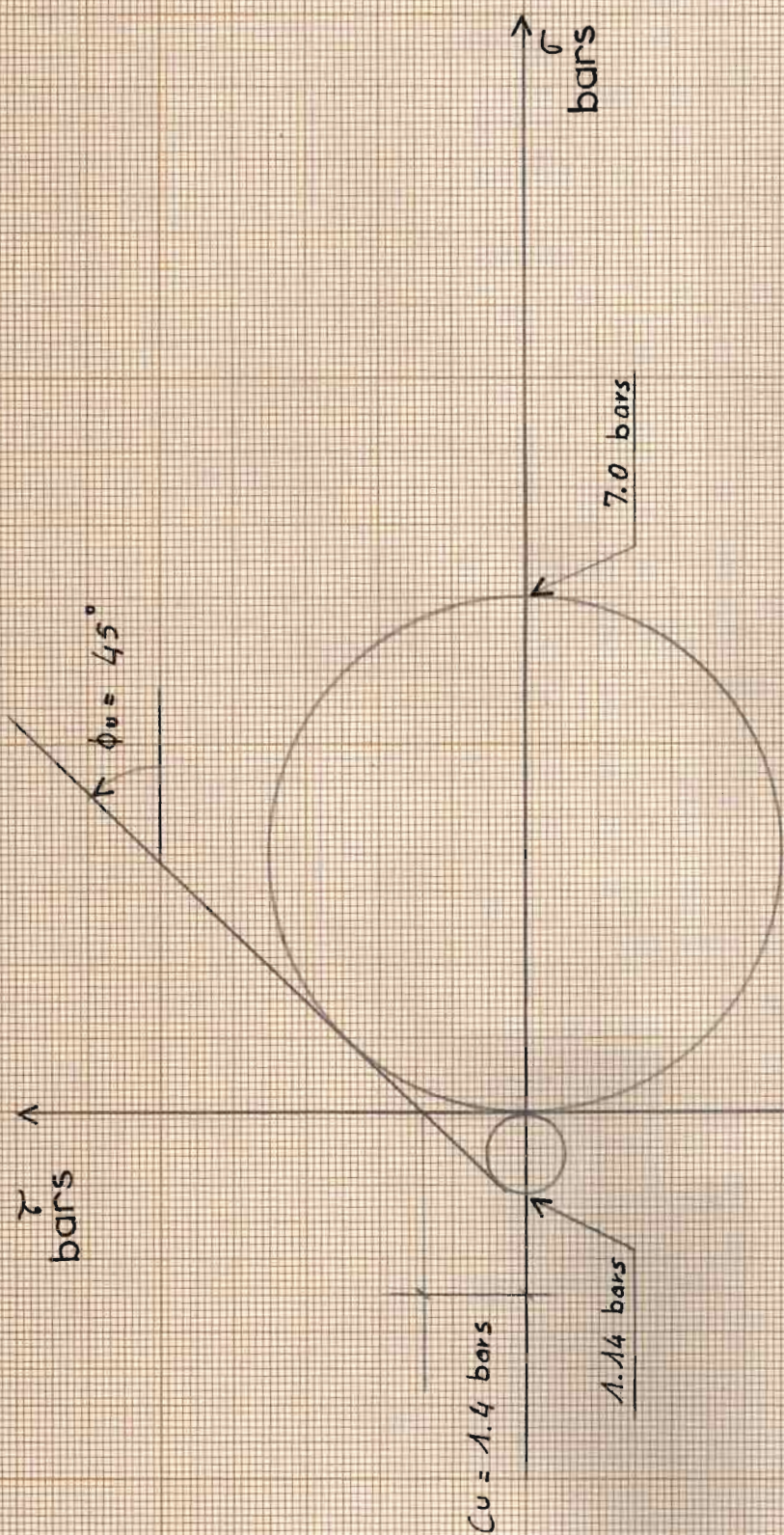


Fig. 5 - 17 Courbe intrinsèque à 0 % de Ciment

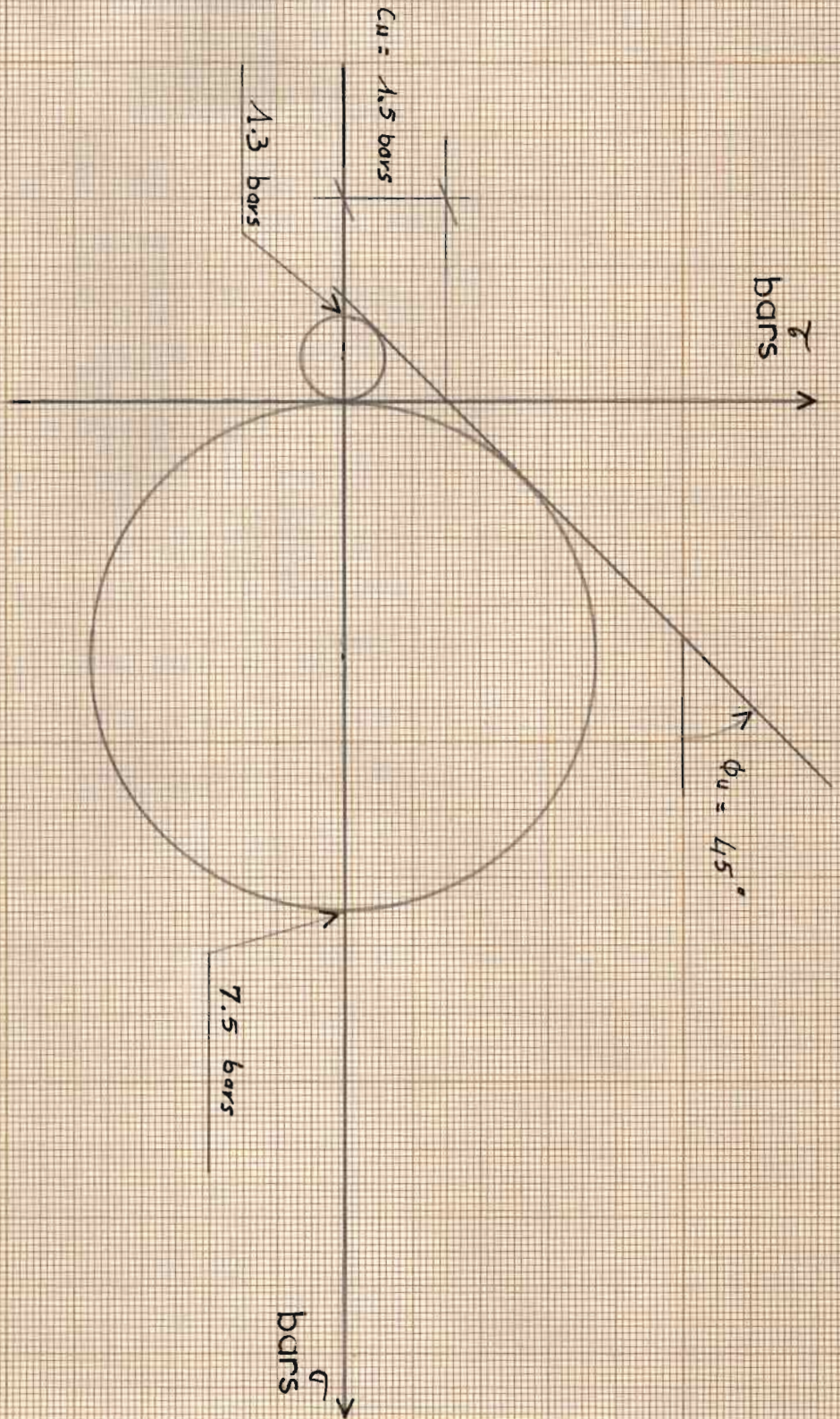


Fig. 5 - 18 Courbe intrinsèque à 1 % de Ciment

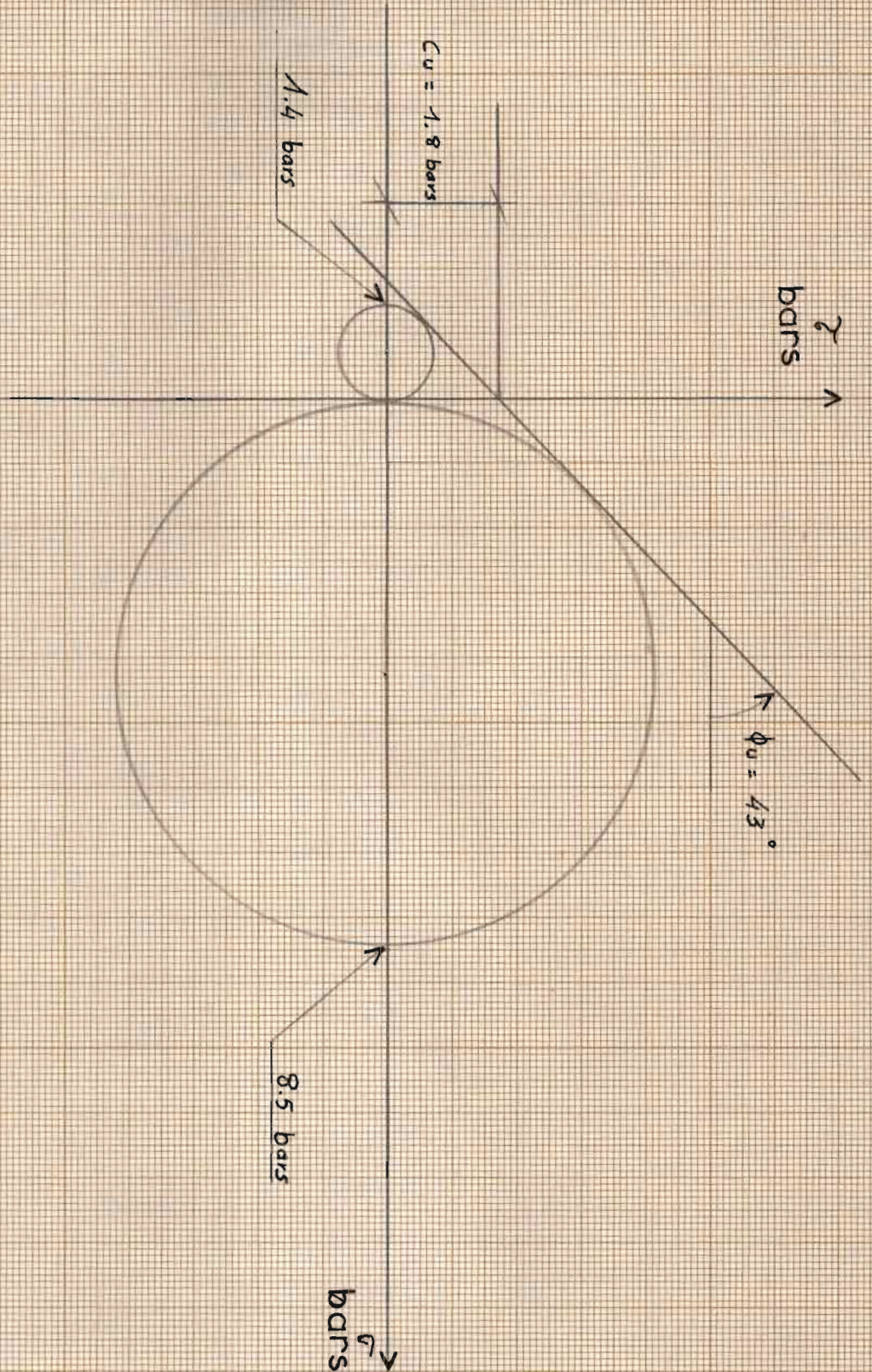


Fig. 5 - 19 Courbe intrinsèque à 2 % de Ciment

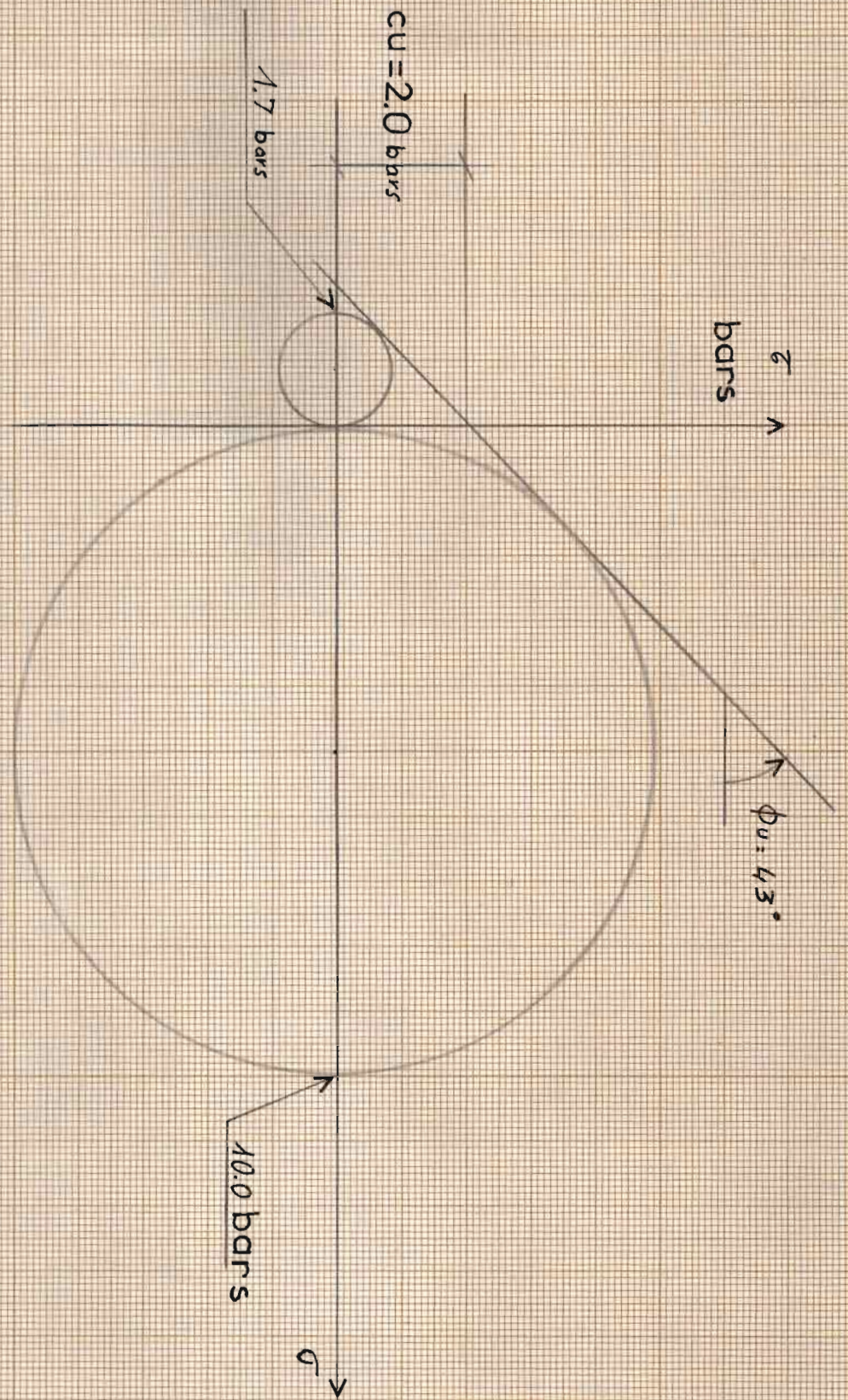


Fig. 5 - 20 Courbe intrinsèque à 3 % de Ciment

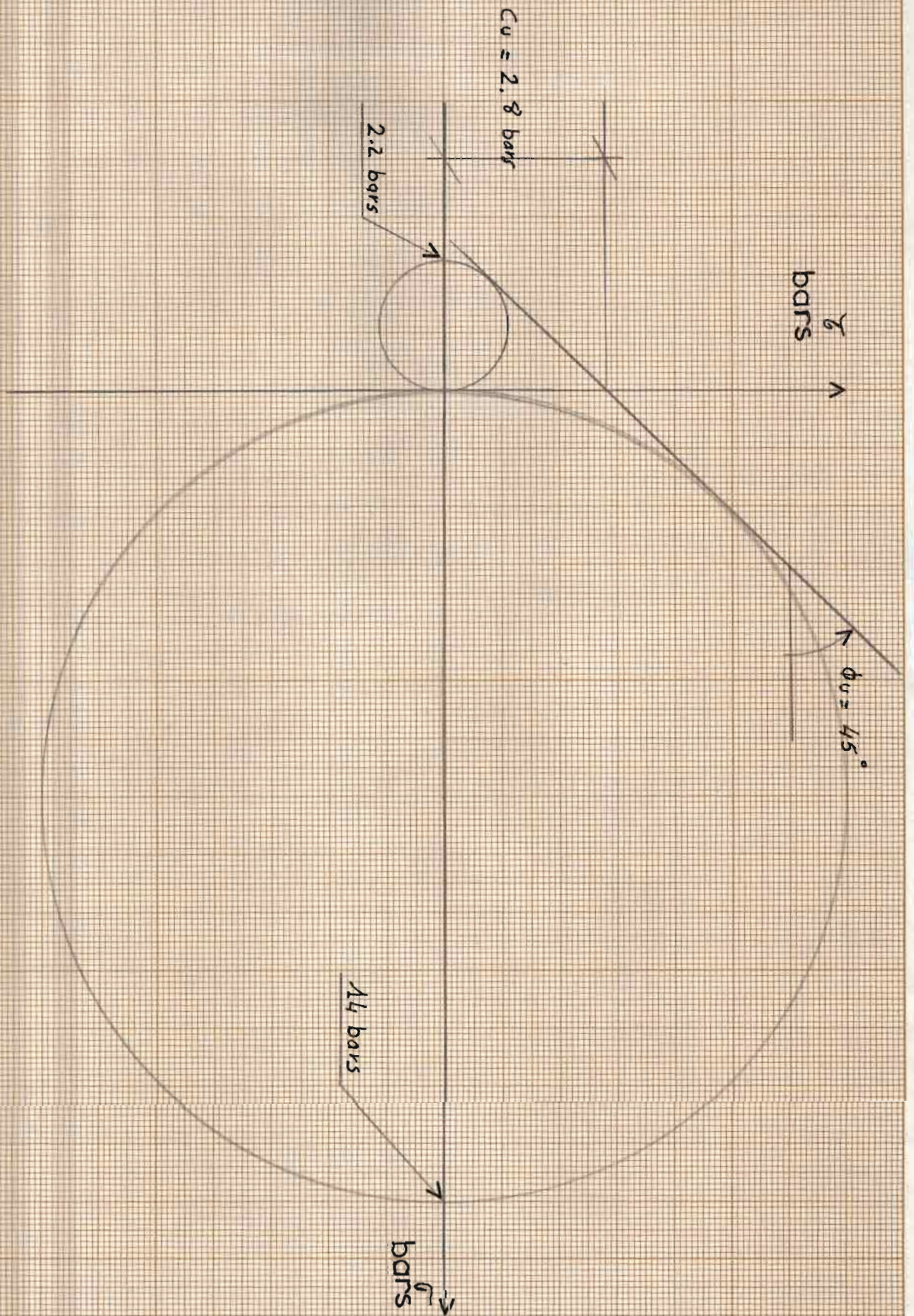


Fig. 5 - 21 Courbe intrinsèque à 4 % de Ciment

5.4 Interprétation des caractéristiques de cisaillement

Les figures précédentes montrent de grandes différences de rayon entre les deux cercles de MOHR tracés pour un même matériau. Cela est dû au rapport R_c/R_t avoisinant 6. les éprouvettes ayant été séchées à l'air d'une part, ce qui explique que R_c soit élevé, et constituant des matériaux fragiles par analogie aux bétons de ciment d'autre part, ce qui explique que R_t soit faible, ce rapport ne nous surprend guère. Les angles de frottement élevés trouvent donc leur explication par l'ordre de grandeur du rapport R_c/R_t .

Par ailleurs, le caractère aléatoire des essais effectués ne nous permet pas de nous prononcer sur la fiabilité des résultats obtenus, mais nous restons très convaincus que la résistance à la rupture totale varie sensiblement avec la teneur en ciment surtout dans le cas de la compression (voir figures 5.7 à 5.11) d'une part, et que la cohésion du matériau augmente aussi au fur et à mesure que l'on augmente le pourcentage de ciment. Ces remarques nous amènent à dire que les effets de l'addition du ciment sont très sensibles malgré les quantités relativement faibles que l'on utilise.

Il est important de noter que les propriétés mécaniques du matériau traité sont très influencées par la nature des granulats d'une part et des conditions de traitement d'autre part. Evidemment, ces propriétés dépendront beaucoup de la teneur en ciment du mélange, mais elles dépendront également de sa teneur en eau au moment du compactage, un excès d'eau lui étant néfaste. D'où

la nécessité de déterminer, avec une bonne approximation, l'optimum Proctor. IL faut sans doute voir là un effet analogue à celui du rapport eau-ciment dans les bétons.

Comme nous le disions tantôt, la qualité d'un matériau traité au ciment dépend aussi de la nature du sol. Cela se conçoit aisément lorsque l'on pense à la faible quantité de ciment qui existe dans le mélange, par rapport aux "granulats". Une étude faite par DIENE [3] révèle que la latérite de **Sébikotane** (SENEGAL) présente des caractéristiques mécaniques élevées par rapport à la latérite de **Thiès-Sindia** après des traitements identiques.

CHAPITRE 7

Il avait été prévu, dans notre plan d'étude, la réalisation éventuelle de tronçons d'essais pour contrôler la faisabilité de cette étude. En effet, il n'est pas courant de rencontrer des routes non revêtues stabilisées au ciment ou ayant fait l'objet d'une sélection sérieuse de matériaux de carrière. Nous sommes donc très curieux de voir l'effet du trafic sur le matériau traité et mis en place, mais les délais trop courts ne nous permettent pas cette réalisation. Toutefois, au moment où nous achevions la rédaction de ce rapport, un fonds a été alloué à la réalisation des tronçons d'essais. A cette fin, deux sites ont été retenus, sur l'axe Thiès-Sindia, de commun accord avec les autorités du Service Régional des Travaux publics:

- le premier, situé avant le croisement avec la route nationale N2 (PK 22), près du village de Sindia est le siège du trafic lourd de camions provenant de la carrière de la SODEVIT,
- le second, sis au PK 7, a été choisi exprès dans un virage pour vérifier les effets de l'envirage des pneumatiques sur la chaussée.

Rappelons-le, la piste Thiès-Sindia est la plus dégradée de toutes les pistes que nous ayons parcourue. Par ailleurs, cet axe constitue en soi un site expérimental privilégié pour les Travaux Publics.

7.1 Nécessité de la réalisation d'un tronçon d'essai

Cette étude étant essentiellement expérimentale, nous ne saurions nous baser sur les résultats d'essais de laboratoire pour tirer des conclusions viables. Toute décision doit nécessairement passer par l'observation du comportement du matériau traité mis en place et soumis aux actions sévères du trafic et des intempéries.

Evidemment, si nous considérons la stabilisation mécanique qui est un des traitements que nous avons préconisés pour prévenir le phénomène de la tôle ondulée, il est clair que, même si nous arrivions à estimer les caractéristiques de cisaillement au laboratoire, nous ne saurions prévoir de façon précise le comportement d'un matériau traité par ce procédé une fois mis en place. En effet les procédés de mise en oeuvre au laboratoire sont plus efficaces que ceux de mis en place sur le terrain et de ce fait, nous pouvons assister à des écarts de comportement assez remarquables.

IL y a aussi un fait important à signaler; le trafic peut rapidement atteindre un niveau donné, impliquant ainsi des frais d'entretien élevés. Cela fait intervenir la notion de **seuil de bitumage**.

Le seuil de bitumage d'une route en terre est défini comme étant le niveau de trafic pour lequel l'investissement que constitue l'exécution d'une chaussée revêtue (bitumée) peut être considéré comme économiquement justifié.

Ce seuil mérite d'être bien contrôlé et pour ce faire, une analyse sérieuse de coûts d'exécution et surtout d'entretien des

routes non revêtues construites avec des matériaux stabilisés, s'avère nécessaire. Nous estimons qu'il serait très hasardeux, à l'étape actuelle de cette étude, de prétendre à une quelconque analyse de coûts car si l'estimation des coûts d'exécution peut se faire avec une approximation acceptable, il n'en est pas de même des coûts d'entretien. Il faut donc absolument que nous nous basions sur des indices que nous ne pourrions avoir qu'en réalisant en vrai grandeur ce projet.

**CONCLUSION
ET
RECOMMANDATIONS**

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le développement d'un pays, et plus particulièrement celui des pays du Tiers-monde, est lié au développement du réseau routier. Pour les pays africains au sud du Sahara où le réseau routier est essentiellement composé de routes en terre, le problème est bien plus complexe. Si on sait que la caractéristique première d'une route non revêtue est sa susceptibilité à des dégradations, on ne devrait pas être surpris du frein économique que constituent des phénomènes comme la tôle ondulée.

Cette étude nous aura permis de mieux appréhender les composantes de ce fléau. Le phénomène semble avoir trouvé son explication rationnelle dans la **Théorie des effets d'arrachement** de JEUFFROY. De ce fait, toute solution visant à éradiquer le mal doit passer par une augmentation de la résistance, de la couche de surface de la route non revêtue, aux efforts de cisaillements et aux efforts tangentiels provoqués par la circulation, et transmis par le véhicule lorsqu'il accélère, freine, vire etc... Les matériaux qui la constituent doivent donc avoir une bonne cohésion et bonne résistance à l'usure. Les essais de compression simple et de traction, utilisés dans l'estimation des caractéristiques de cisaillement du matériau, montrent que le traitement au ciment augmente de façon appréciable la cohésion. A côté des propriétés proprement mécaniques, le traitement au ciment modifie également bien d'autres propriétés du matériau allant dans le sens d'une meilleure tenue des routes non revêtues. En effet, l'imperméabilité

du matériau est augmentée, son insensibilité à l'eau est en général aussi améliorée. Par ailleurs, puisque les liaisons mécaniques dues au ciment suppriment les mouvements relatifs et les frottements des grains les uns par rapport aux autres, nous pouvons espérer que les phénomènes d'usure et de formation de fines nocives se trouvent largement atténués.

Nous sommes conscients que seul un revêtement des chaussées pourra venir complètement à bout de la tôle ondulée. Mais avant d'en arriver là, il importe que les ingénieurs routiers mènent des études technico-économiques en vue de bien cerner tous les aspects qu'implique le passage d'une route en terre à une route revêtue. Nous estimons que cette transition constitue un point fondamental dans l'analyse économique routière.

C'est pour cela que nous recommandons que soit réalisés des tronçons d'essai pouvant aboutir à des études socio-économiques sérieuses et à une échelle plus grande.

Pour finir, disons que les axes de désenclavement reliant des zones d'agriculture commerciale et qui, par conséquent, sont sujets à un trafic important de poids lourds, ou des pistes du type Thiès-Sindia, peuvent être faits d'un graveleux **type Station de Télévision** traité au ciment et ne dépassant pas le stade de l'amélioration c'est-à-dire 3 à 4% de ciment.

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **BCEOM-CEBTP**, Manuel sur les routes dans les zones tropicales et désertiques, entretien et exploitation de la route, 1972.
- [2] **GIDIGASU, M.D.**, Laterite Soil Engineering-Pedogenesis & Engineering Principles, Elsevier Scientific Publ. co., 1976.
- [3] **DIENE, M.**, Latérites et stabilisation en construction routière. Application à deux graveleux latéritiques du Sénégal, EPF Lausanne
- [4] **JEUFFROY, G.**, Conception et construction des chaussées, Tome 1 et 2, Eyrolles, 1970
- [5] **LANKOANDE, I., OUEDRAOGO, A.**, Tôle ondulée et stabilisation, Routes non revêtues en zone tropicale, Mémoire, ENSUT, Juin 1982.
- [6] **JEUFFROY, G.**, Phénomène de la tôle ondulée, Revue générale du caoutchouc, 1954.
- [7] **REMILLON, A.**, Les recherches routières entreprises en Afrique d'expression française, Application à la conception et au renforcement des chaussées économiques, conférence du 28 Juin 1966, Annales de l'I.T.B.T.P
- [8] **LEONARDS, G.A.**, Les fondations, Dunod Paris, 1968
- [9] **FENZY**, "Tôle ondulée", effet du pneumatique, Revue générale des Routes et Aérodrômes, n° 503, Novembre 1974
- [10] **GRESILLON, J.M.**, Quelques aspects de la tenue des ouvrages en terre et de leur amélioration, Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Equipement rural, Ouagadougou (Burkina-Fasso), 1979

- [11] **LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES**, Ciment et Chaux dans les assises de chaussées, Eyrolles, 1968
- [12] **CEBTP**, Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, Ministère français de la Coopération, 1984
- [13] **RECORDON, E.**, Technologie des Sols, Cours de l'EPF Lausanne, 1978
- [14] **HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D.**, An Introduction to Géotechnical Engineering, Prentice Hall, Inc., 1981

ANNEXE A

ANNEXE A**RESULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE****ASTM D 422**

Piste Thiès-Sindia : Creux		
TAMIS Pouces (mm)	% Retenu	% Passant
3" (75)	-	-
2" (50)	18.03	81.97
1 1/2" (37.5)	31.22	68.78
1" (25)	45.52	54.48
1/2" (13)	49.32	50.68
3/8" (9.5)	51.43	48.57
# 4 (4.75)	58.49	41.51
# 10 (2.00)	67.44	32.56
# 20 (0.85)	72.74	27.26
# 40 (0.42)	75.95	24.05
# 60 (0.25)	79.36	20.64
# 140 (0.106)	84.12	15.88
# 200 (0.075)	85.98	14.02

Piste Thiès-Sindia : Bourrelets		
TAMIS Pouces (mm)	% Retenu	% Passant
3" (75)		
2" (50)		
1 1/2" (37.5)		
1" (25)		
1/2" (13)	1.38	98.62
3/8" (9.5)	3.81	96.19
# 4 (4.75)	13.73	86.27
# 10 (2.00)	31.42	68.58
# 20 (0.85)	43.96	56.04
# 40 (0.42)	53.21	46.79
# 60 (0.25)	63.64	36.36
# 140 (0.106)	76.56	23.44
# 200 (0.075)	81.19	18.81

Piste Thiès-Sindia : Non affectée		
TAMIS Pouces (mm)	% Retenu	% Passant
3" (75)		
2" (50)		
1 1/2" (37.5)		
1" (25)	1.06	98.94
1/2" (13)	4.5	95.50
3/8" (9.5)	9.30	90.70
# 4 (4.75)	20.51	79.49
# 10 (2.00)	35.45	64.55
# 20 (0.85)	44.11	55.89
# 40 (0.42)	49.35	50.65
# 60 (0.25)	54.74	45.26
# 140 (0.106)	62.24	37.76
# 200 (0.075)	65.60	34.40

Piste Mont-Rolland : Creux		
TAMIS Pouces (mm)	% Retenu	% Passant
3" (75)		
2" (50)		
1 1/2" (37.5)		
1" (25)		
1/2" (13)	4.02	95.98
3/8" (9.5)	7.02	92.98
# 4 (4.75)	18.62	81.38
# 10 (2.00)	38.31	61.68
# 20 (0.85)	50.42	49.58
# 40 (0.42)	58.30	41.70
# 60 (0.25)	70.74	29.26
# 140 (0.106)	83.58	16.42
# 200 (0.075)	88.24	11.76

Piste Mont-Rolland : Bourrelets		
TAMIS Pouces (mm)	% Retenu	% Passant
3" (75)		
2" (50)		
1 1/2" (37.5)		
1" (25)		
1/2" (13)	1.45	98.55
3/8" (9.5)	4.33	95.67
# 4 (4.75)	16.29	83.71
# 10 (2.00)	31.90	68.10
# 20 (0.85)	42.89	57.11
# 40 (0.42)	58.62	41.38
# 60 (0.25)	93.14	6.86
# 140 (0.106)	97.73	2.27
# 200 (0.075)	98.47	1.53

Piste Mont-Rolland : Non affectée		
TAMIS Pouces (mm)	% Retenu	% Passant
3" (75)		
2" (50)		
1 1/2" (37.5)		
1" (25)		
1/2" (13)	0.29	99.71
3/8" (9.5)	1.22	98.78
# 4 (4.75)	20.02	79.98
# 10 (2.00)	50.63	49.37
# 20 (0.85)	67.09	32.91
# 40 (0.42)	75.84	24.16
# 60 (0.25)	86.25	13.75
# 140 (0.106)	90.36	9.64
# 200 (0.075)	91.29	8.71

Piste Notto-Tassette : Creux		
TAMIS Pouces (mm)	% Retenu	% Passant
3" (75)		
2" (50)		
1 1/2" (37.5)		
1" (25)	1.75	98.25
1/2" (13)	9.99	90.01
3/8" (9.5)	16.51	83.48
# 4 (4.75)	34.78	65.22
# 10 (2.00)	52.06	47.94
# 20 (0.85)	61.99	38.01
# 40 (0.42)	79.08	20.91
# 60 (0.25)	95.84	4.15
# 140 (0.106)	97.71	2.30
# 200 (0.075)	97.93	2.07

Piste Notto-Tassette : Bourrelets		
TAMIS Pouces (mm)	% Retenu	% Passant
3" (75)		
2" (50)		
1 1/2" (37.5)		
1" (25)		
1/2" (13)	4.72	95.28
3/8" (9.5)	9.03	90.97
# 4 (4.75)	23.86	76.14
# 10 (2.00)	40.46	59.54
# 20 (0.85)	49.49	50.51
# 40 (0.42)	67.67	32.33
# 60 (0.25)	96.02	3.98
# 140 (0.106)	97.60	2.40
# 200 (0.075)	98.23	1.77

Piste Notto-Tassette : Non affectée		
TAMIS Pouces (mm)	% Retenu	% Passant
3" (75)		
2" (50)		
1 1/2" (37.5)		
1" (25)	1.23	98.77
1/2" (13)	9.00	91.00
3/8" (9.5)	15.83	84.17
# 4 (4.75)	36.14	63.66
# 10 (2.00)	54.07	45.93
# 20 (0.85)	62.58	37.42
# 40 (0.42)	80.32	19.68
# 60 (0.25)	95.79	4.21
# 140 (0.106)	96.32	3.68
# 200 (0.075)	96.51	3.50

ANNEXE B

ANNEXE B

RESULTATS DE L'ESSAI DE COMPACTAGE

ASTM 1557-78

Latérite + 0% Ciment					
W%	13.52	16.49	16.79	17.21	18.33
γ_d (t/m ³)	1.75	1.87	1.89	1.91	1.87
W% corrigée	11.63	14.18	14.44	14.80	15.76
γ_d corrigé (t/m ³)	1.85	1.96	1.98	2.00	1.96

Latérite + 1% Ciment					
W%	13.13	13.68	14.23	17.87	18.38
γ_d (t/m ³)	1.80	1.86	1.92	1.85	1.82
W% corrigée	11.29	11.76	12.24	15.37	15.81
γ_d corrigé (t/m ³)	1.89	1.95	2.01	1.94	1.91

Latérite + 2% Ciment					
W%	9.56	12.58	15.50	17.73	18.84
γ_d (t/m ³)	1.72	1.84	1.91	1.89	1.82
W% corrigée	8.22	10.82	13.33	15.25	16.20
γ_d corrigé (t/m ³)	1.82	1.93	2.00	1.98	1.91

Latérite + 3% Ciment					
W%	13.26	14.76	15.94	16.05	19.87
γ_d (t/m ³)	1.84	1.90	1.94	1.91	1.81
W% corrigée	11.40	12.69	13.71	13.80	17.09
γ_d corrigé (t/m ³)	1.93	1.99	2.03	2.08	1.90

Latérite + 4% Ciment					
W%	13.72	15.53	17.42	19.89	21.24
γ_d (t/m ³)	1.84	1.89	1.88	1.82	1.75
W% corrigée	11.80	13.36	14.98	17.11	18.27
γ_d corrigé (t/m ³)	1.93	1.98	1.97	1.91	1.85