

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

Titre Laterite-matériau de construction
(phase V)

Auteur D _ DIAGNE
A _ H _ DIOUF
Génie CIVIL
Date JUIN 1984

Ecole Polytechnique de Thies
Département Génie Civil

PROJET DE FIN
D'ETUDES

Titre : LATERITE - MATERIAU
DE CONSTRUCTION
(Phase V)

Auteurs : Djibril DIAGNE
Abdoul-H-DIOUF

Directeur de projet : M^r Roger LUPIEN

Mai 1984

A mes parents
A mes frères et sœurs
A mes amis
A mes professeurs

Djibril DIAGNE

A mes parents
A mes professeurs
A mes amis

Abdoul Hamid DIOUF

ii)

REMERCIEMENTS

Nous remercions tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce projet et plus particulièrement :

— M^{re} ROGER LUPIEN notre directeur de projet, professeur de béton et de Structures à l'École Polytechnique de Thies pour sa grande disponibilité, la pertinence de ses idées et aussi son apport sur le plan de la documentation

— M^{re} Nicolas MALIAN TOVITCH responsable du laboratoire de béton pour son expérience, sa disponibilité et aussi pour les services prêtés lors des essais.

SOMMAIRE

L'étude menée dans cette phase a pour but
d'identifier les paramètres qui contrôlent la résistance en compression et le comportement des latérites
de déterminer l'influence relative de certains phénomènes sur ces mêmes latérites.

— D'abord une étude des caractéristiques des latérites rouge et brune

— et une analyse de l'influence sur la résistance des paramètres : paille - immersion - cure - densité sèche - érosion - énergie de compactage - teneur en eau - humidité - module d'élasticité
rapports ciment/Latérite + sable et eau/ciment
ont été faites.

— Ensuite une étude statistique a permis de déterminer les probabilités auxquelles on peut s'attendre pour un dosage fixé et une résistance spécifiée.

— Enfin des recommandations ont été faites quant à l'exploitation des courbes Résistance versus ciment/Latérite + sable, et Résistance versus eau/ciment, l'humidité et l'affaissement à viser, le compactage, la granulométrie et les étapes à suivre pour effectuer le mélange.

TABLE DES MATIERES

Introduction	1
a. But	1
b. Objectifs	3
 Chapitre 1	 4
1.1	4
1.2	9
1.3	10
 Chapitre 2	 14
2.1	14
2.2	14
2.3	16
2.4	16
2.4.1	16
2.4.2	17
2.5	17
2.6	18
2.7	18
2.8	18
2.9	18
2.10	18
 Chapitre 3	 20
3.1	20
3.2	20
3.2.1	20
3.2.2	22
3.2.3	22
3.2.4	22
3.2.5	22
3.2.6	23
 Chapitre 4	 24
4.1	24
4.2	26
4.3	27
4.4	28

4.5	Influence de l'érosion	---	30
4.6	Influence de l'énergie de compactage et de la teneur en eau	---	30
4.7	Humidité	---	31
4.8	Rapport ciment/l'argile + sable	---	33
4.9	Rapport Eau/ciment	---	36
4.10	Module d'élasticité	---	38
Chapitre 5 Analyse statistique			41
Conclusion et recommandations			43
Références			
a.	Annexes	---	47
b.	Bibliographie	---	83

INTRODUCTION

a). But

Un examen approfondi des différentes phases de l'évolution de l'habitat africain conduit aux constatations suivantes :

1) Traditionnellement les hommes s'étaient toujours contents - eu égard à leurs déplacements fréquents causés par la nature et les conditions socio-économiques - d'un type d'habitat temporaire, non durable.

2) Ces constructions généralement faites en terre latéritique (banco) ou en terre argileuse séchée au soleil (adobe) étaient bien adaptées aux conditions climatiques locales.

3) Durant ces dernières décennies, avec le progrès social, une aspiration vers une plus grande stabilité a incité à construire "en dur". Cette manière de concevoir l'habitat africain orientait les constructions plus vers les matériaux importés des pays développés et une application grossière de la technologie européenne que vers l'utilisation des matériaux locaux et des techniques

2-

traditionnelles. Elle n'intégrait pas de ce fait les facteurs climatiques et économiques de nos régions.

Cependant dans les pays où les fonds manquent alors que la main d'œuvre est abondante et sous utilisée, que les matières premières sont gratuites, et la plupart des pays africains sont dans ce cas, on peut concevoir une politique de logement qui permet de dépendre le moins possible des matériaux de construction importés en faisant appel aux ressources locales : matériaux et savoir-faire, en utilisant des technologies appropriées.

L'élaboration d'une telle politique implique l'étude des matériaux et des techniques qui consomment le moins possible de ressources nationales rares tels que le capital, l'énergie, les moyens de transport mais qui en revanche utilisent le maximum de main d'œuvre c'est-à-dire qui favorisent l'investissement humain plutôt que l'investissement en capital.

Cette politique implique aussi l'élaboration d'un catalogue de matériaux de base avec leurs caractéristiques : résistance, qualité thermique, étanchéité, durabilité.

C'est dans cet ordre d'idée que l'École Polytechnique de Thies a entrepris des recherches

sur les possibilités d'utilisation des matériaux locaux dans des constructions durables et bien adaptées aux conditions climatiques de nos régions.

b). Objectifs

Le projet de l'E.P.T. a porté sur l'étude de la laterite en raison de sa disponibilité sur la quasi totalité du territoire national et de ses caractéristiques géotechniques intéressantes. Seulement ces propriétés de la laterite, de par la géologie différente aussi bien au niveau régional que sous régional, varient selon les localités.

Cette grande variabilité ainsi que les contraintes de temps nous ont obligés à limiter notre étude à un nombre assez restreint de types de laterite et à nous concentrer sur les objectifs suivants :

- identifier les paramètres qui contrôlent la résistance et le comportement des laterites.
- déterminer l'influence relative de certains phénomènes (LUR, immersion, érosion... etc) sur cette même laterite.

CHAPITRE 1

CARACTERISTIQUES DES LATERITES LOCALES

1.1 Définition et types étudiés

Sous l'optique de l'ingénieur civil, la latérite constitue tous les sols résiduels rougeâtres et tous les sols non résiduels ayant subi les processus d'altération locale.

Dans le cadre de ce projet, deux types de latérite ont été étudiés : la latérite brune et la latérite rouge toutes deux provenant de Thiès.

Nous nous proposons de présenter leurs caractéristiques géotechniques en vue de leur classification.

Concernant la latérite brune, une question se posait : à savoir si c'est une latérite à problème ou non. En effet, on notait une influence non négligeable du compactage et surtout de l'eau sur sa granulométrie.

(Voir fig 1). Pour lever cette équivoque, des essais complémentaires ont été effectués : indice d'agrégation, sensibilité au remaniement, gonflement...

Tableaux des caractéristiques géotechniques

	γ_{opt}	$w_{opt} \%$	D_{60}	D_{10}	C_u	C_c
Laterite rouge	2.05	13.8	5.5	0.07	107.1	4.2
Laterite brune	1.88	15.2	4.8	1.2	4.98	0.044

	$w_L \%$	$w_p \%$	I_p	Densité en vrac (g/cm^3)	Densité pilonnée (g/cm^3)	Durabilité % pertes
Laterite rouge	33	21.3	11.7	1.55	1.80	53.06
Laterite brune	44	24.46	19.54	1.41	1.72	57.46

Indice d'agrégation	$I.A = 1.25$
Sensibilité au remaniement	sensible
Gonflement	$< 10\%$ de la hauteur initiale

6.

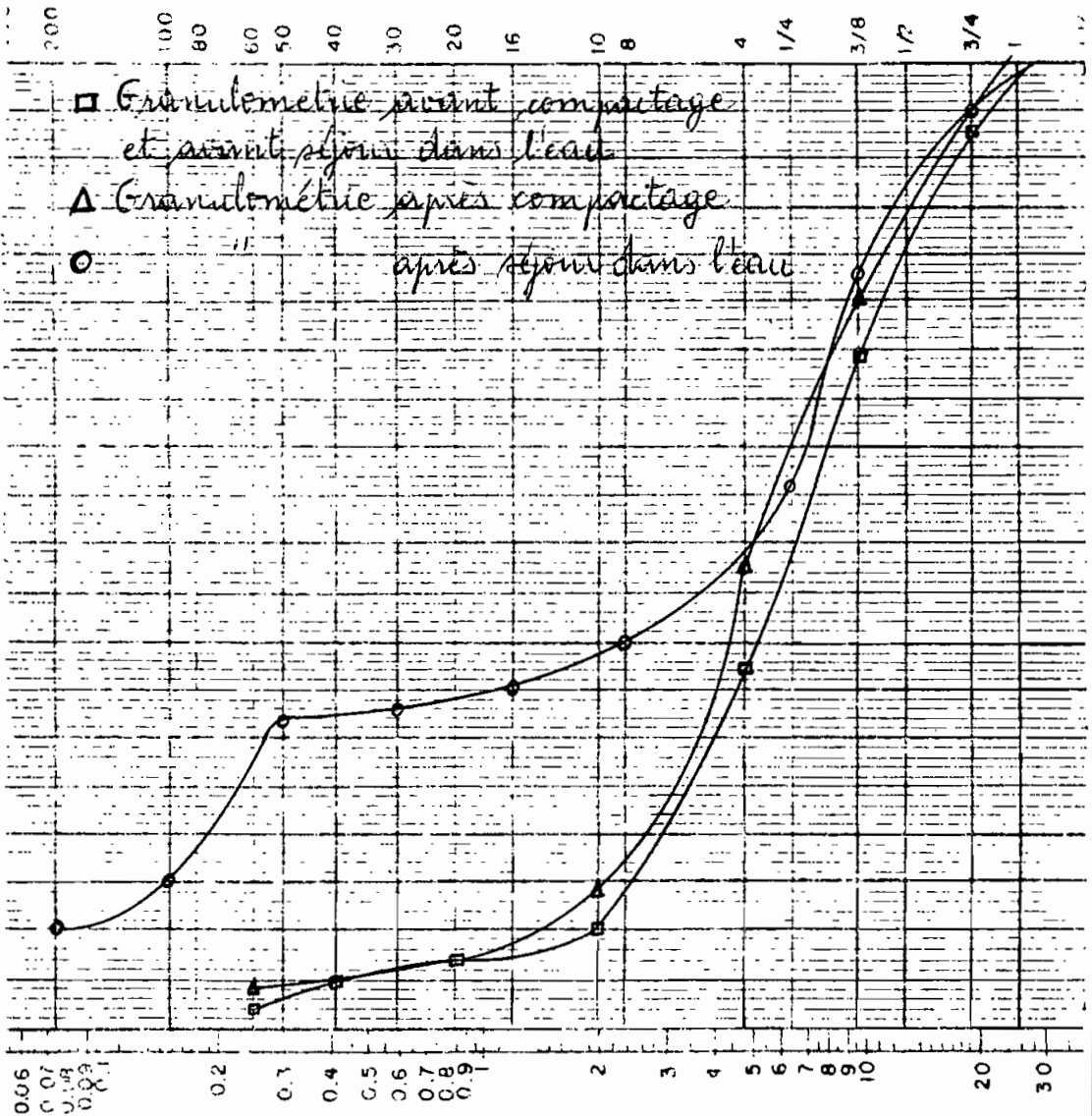


FIG 1 Effet du compactage et de l'eau
sur la granulométrie de la laterite
BRUNE

Après analyse des résultats tabulés, on constate que la laterite brune semble être à un stade intermédiaire entre les laterites normales et les laterites à problème. Nous la classerons dans les laterites normales compte tenu de l'indice d'agrégation qui excède

Tableau 1 : Tableaux des différents mélanges

Cylindres Dosages	DA 1 26.6%	DA 2-3-4 17.2%	DA 5-6-7 9.6%	DA 8-9-10 6%	DA 11-12-13 14%	DA 14-15-16-17 6%	DA 18-19-20-21 8%
Lait Sable Ciment Eau	18.28 kg 7.84 kg 6.95 kg 5.31 kg	30.43 kg 13.06 kg 7.47 kg 7.18 kg	36.48 kg 15.65 kg 5 kg 7.65 kg	28 kg 12 kg 2.4 kg 5.79 kg	25.9 kg 11.1 kg 5.18 kg 5.85 kg	31.85 kg 13.65 kg 2.73 kg 6.32 kg	31.29 kg 13.41 kg 3.57 kg 6.78 kg
Cylindres standards	Tous les échantillons ont été fabriqués à l'aide des cylindres standards utilisés en béton soit hauteur : 304 mm et diamètre : 151 mm						
Pilonnage manuel	Les cylindres sont remplis avec 3 couches de matériaux pilonnés à 25 coups chacune avec un marteau proctor						
Cure	Tous les cylindres ont été placés pendant 28 jours dans la chambre humide sauf les cylindres DA 14- DA 15- DA 18- DA 19 qui ont séjourné pendant 28 jours à l'air.						
Procédure de mélange	<p>Pour les cylindres DA 1- DA 2- DA 3- DA 4- DA 5- DA 6- DA 7 : toute l'eau et tout le ciment sont utilisés ; les agrégats (latérite + sable) sont ajoutés en quantité telle que l'affaissement avoisine mm ou que le mélange soit ouvrable</p> <p>Pour les autres cylindres DA 8 à DA 21, les agrégats retenus sur le tamis # 4 sont immergés pendant 30 mn puis maintenus humides pendant 12 h avant d'être mélangés avec l'eau prévue pour le gâchage, le ciment, le sable et les particules passant le tamis # 4.</p>						

Tableau 2 : Caractéristiques et résultats des mélanges

Dosage en ciment Laterite + sable	Dosage en volume (vrai) ciment Laterite + sable	Dosage en ciment en ciment (kg/m ³) (gobélin)	Eau brut Ciment	Eau vrai Ciment	Humidité	Teneur en eau	Teneur en air	Affaissement (mm)	Cylindres	Masse volumique humide (kg/m ³)	Résistance (MPa)	Résistance moyenne (MPa)
6%	1/12.69	111	2.41	1.68	9.5%	15.3%	4.1%	40	DA 8	2226	2.51	2.41
									DA 9	2226	2.26	
									DA 10	2215	2.44	
		112.5	2.32	1.58	9%	15%	3.4%	50	DA 14	2248	2.04	2.08
									DA 15	2260	2.13	
									DA 16	2242	3.96	
DA 17	2242	3.35	3.66									
8%	1/9.53	144.7	1.90	1.35	10%	15.7%	3.5%	50	DA 18	2232	3.28	3.23
									DA 19	2239	3.18	
									DA 20	2230	4.76	
									DA 21	2225	4.86	
9.6%	1/7.94	172.7	1.53	1.07	9.4%	15.1%	3.8%	75	DA 5	2234	5.43	5.54
									DA 6	2234	5.82	
									DA 7	2243	5.38	
14%	1/5.44	243	1.13	0.82	10%	15.6%	3.5%	40	DA 11	2260	13.41	13.07
									DA 12	2255	13.24	
									DA 13	2250	12.56	
17.2%	1/4.44	290	0.96	0.70	10.3%	15.8	3.7%	70	DA 2	2257	13.92	14.09
									DA 3	2255	13.75	
									DA 4	2257	14.60	
26.6%	1/2.86	410	0.76	0.60	12.6%	17.5%	—	65	DA 1	2263	17.88	17.88

Mélange : 70% de laterite
30% de sable

Taux d'absorption du mélange : 4.4%

de peu la limite admissible et du degré de gonflement qui est faible, négligeable.

La sensibilité au remaniement peut, elle, être liée à la friabilité des agrégats ; en effet on a 53.06% et 57.46% de pertes respectivement pour la latérite rouge et la latérite brune alors que pour la basalte généralement utilisé dans le béton, les pertes sont de 15% (essai LOS ANGELES).

D'après la classification unifiée des Etats-Unis adaptée aux latérites, nous avons des sols graveleux non étalés avec très peu de fines.

1.2 : Avantages et faiblesses du matériau

— La latérite présente une certaine cohésion naturelle, lorsqu'elle est séchée, il y a une liaison entre les différentes particules. Mais en présence d'eau, cette cohésion est brisée ; la latérite se délite.

— Le taux d'absorption de ce matériau est élevé :

* 9.89% de son poids pour la latérite brune

* 10.82% de son poids pour la latérite rouge

— Les granulats sont friables - Par l'essai Los Angeles, on a déterminé :

* 53.06% de pertes en poids pour la latérite rouge

* 57.46% de pertes en poids pour la latérite brune

10.

— La granulométrie est non étalée et on note très peu de fines.

1.3. Amélioration suggérée

Les sols peuvent présenter parfois des caractéristiques susceptibles d'amélioration au moyen d'apports ou de coupures granulaires ; c'est ainsi que l'on peut corriger une teneur trop forte ou trop faible en fines ou graviers. Un sol trop plastique pourra ainsi être amélioré par un apport de sable cependant qu'un sol trop peu plastique le sera par apport de fines.

Or selon Atterberg, nous avons :

- une plasticité élevée pour la latérite brune $I_p = 19.54 > 17$
- une plasticité moyenne pour la latérite rouge $7 < I_p = 11.7 < 17$

Une amélioration sensible de la granularité des deux types de latérite a été constatée après addition de sable de dune qui est fin ; son module de finesse est $M.F = 0.85$

Sachant que la résistance augmente avec la densité du sol, on a essayé de déterminer le pourcentage optimum de sable par l'essai de densité optimale.

(Voir FIG 2)

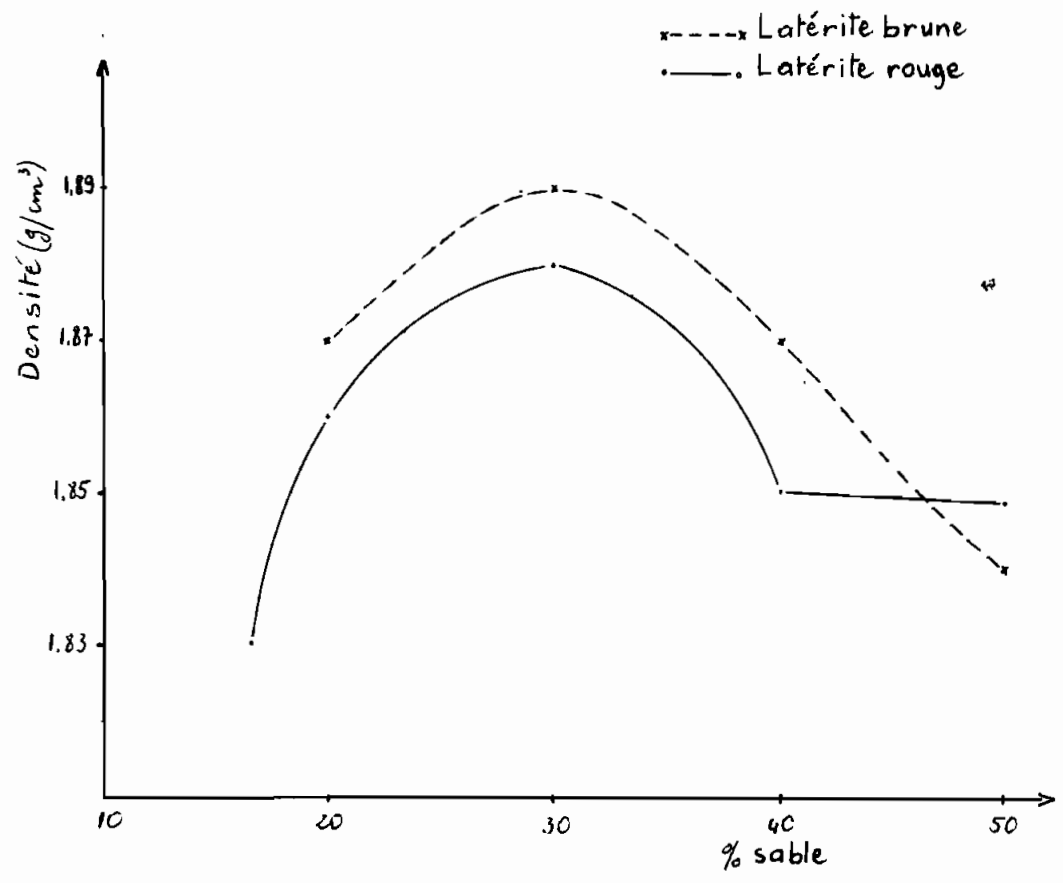


FIG 2 : Courbe de la densité versus pourcentage de sable pour la latérite brune améliorée et pour la latérite rouge améliorée

	Densité en vrac (g/cm ³)	Densité pilonnée (g/cm ³)
Latérite brune brute	1.41	1.72
Latérite rouge brute	1.55	1.80

Tableau 3 Densité en vrac et densité pilonnée des latérites brune et rouge non améliorées (brutes)

FIG 3: Courbe granulométrique de la latérite brune

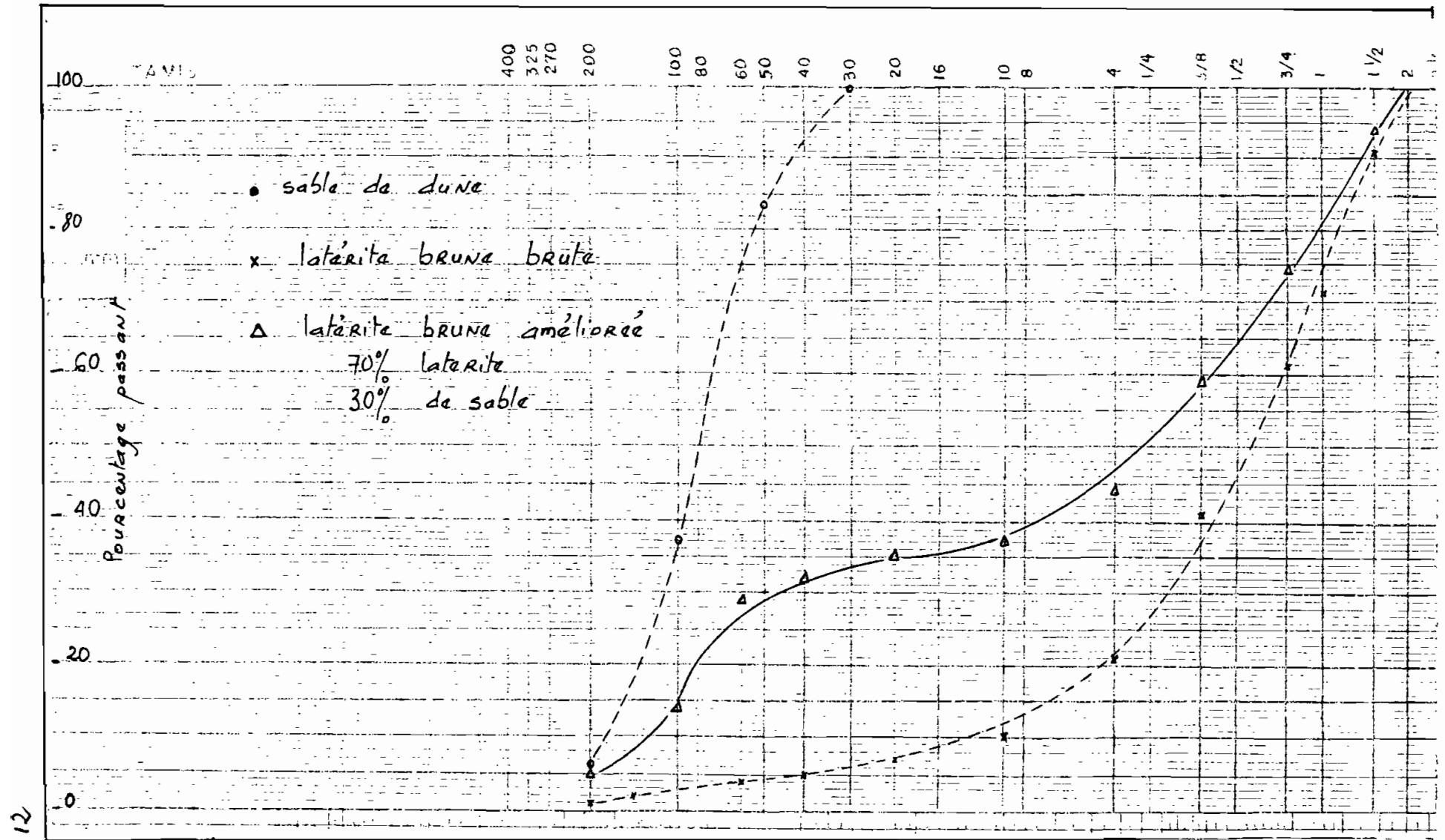
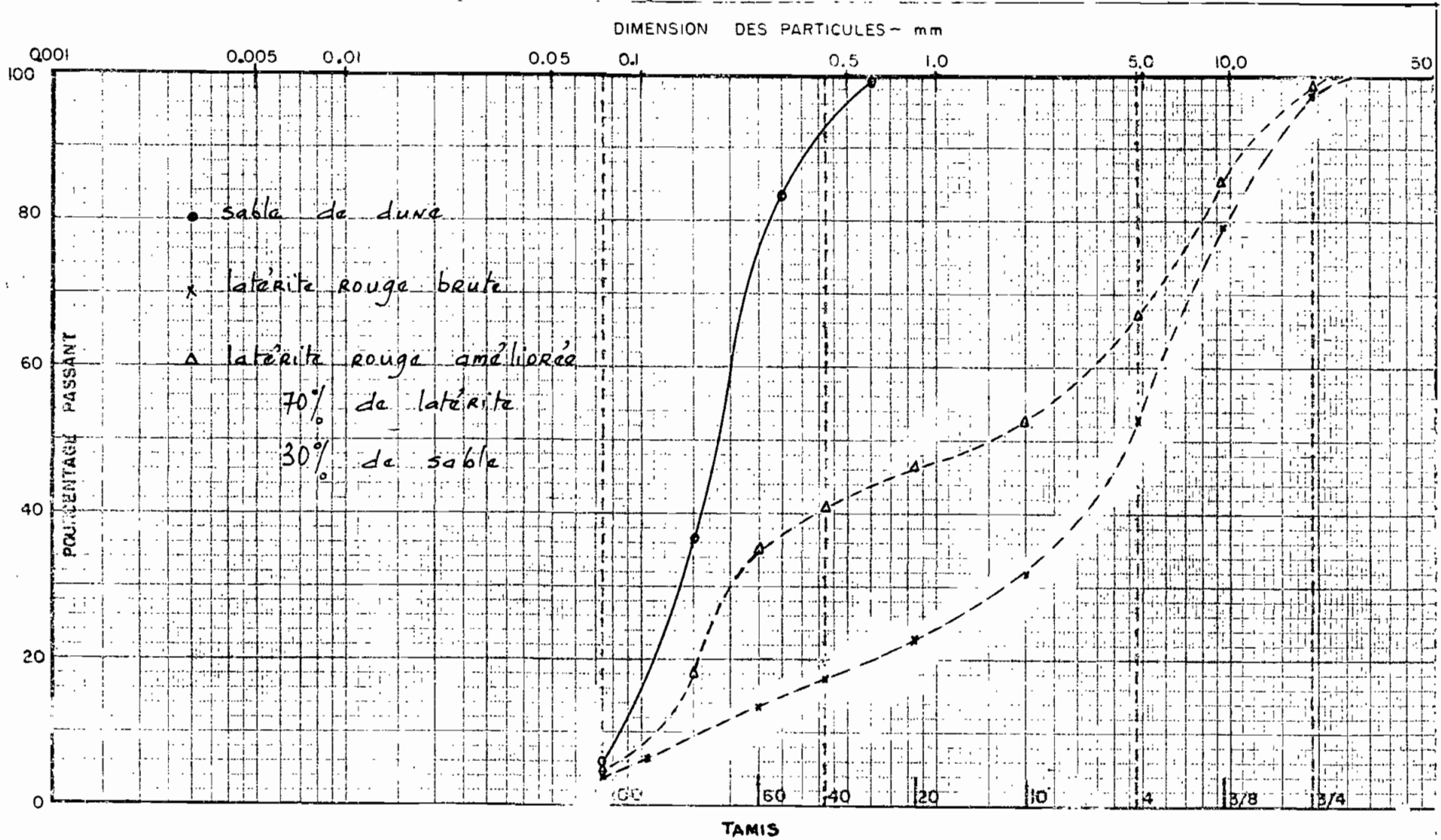


FIG 4: Courbe granulométrique de la latérite rouge

15



CHAPITRE 2

PROCEDURE EXPERIMENTALE

2.1 Densité optimale

Pour déterminer cette densité optimale et le pourcentage optimal de sable :

- ajouter une certaine quantité de sable à de la latérite pure
- brasser manuellement ces 2 matériaux
- remplir le moule proctor en 3 couches compactées à 25 coups chacune à l'aide du marteau proctor
- déterminer le poids et la densité du mélange.
- faire varier le pourcentage de sable et répéter la procédure. Ce qui permet d'avoir une courbe de la densité versus le pourcentage de sable.

2.2 Absorption du gros granulat

(Norme A 23.2 - 12 A)

- Rejeter toutes les particules passant le tamis 5mm
- Selon la grosseur nominale du granulat, déterminer à partir de la norme A 23.2 - 12 A la masse minimale de l'échantillon (voir le tableau ci-après)

Grossueur nominale (mm) du granulat	Masse minimale (kg) de l'échantillon
14 et moins	2
20	3
28	4
40	5
56	10
80	18

- Bien laver les particules de l'échantillon pour enlever la poussière et/ou les autres enduits.
- Les faire sécher à une température de $110 \pm 5^\circ$ jusqu'à masse constante.
- Les refroidir à la température ambiante pendant 1 à 3 heures
- Ensuite immerger l'échantillon dans de l'eau à la température de la pièce pendant 24 ± 4 heures.
- Retirer l'échantillon de l'eau, l'envelopper dans un linge absorbant et le rouler jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de traces visibles d'eau.
- Essuyer les grosses particules une à une en

ayant soin de ne pas laisser évaporer l'eau contenue dans les pores des particules.

- Déterminer la masse de l'échantillon à l'état saturé superficiellement sec (A).
- Faire sécher l'échantillon à une température de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante.
- Le refroidir à l'air à la température ambiante pendant 1 à 3 heures.
- Mesurer sa masse (B).

Le taux d'absorption est alors : $\frac{A-B}{B} \times 100\%$

2.3 Type d'échantillon

Les cylindres utilisés sont des cylindres métalliques de dimensions standards :

- * diamètre intérieur $d = 151 \text{ mm}$
- * hauteur $h = 304 \text{ mm}$

2.4. Types de mélange

Deux méthodes ont été utilisées

2.4.1 Mélange avec pré-mouillage

- Rajouter les particules retenues sur le tamis de 25 mm
- Peser la quantité de latérite et de sable nécessaire pour le mélange.
- Immerger pendant 30 mn environ les gros granu-

lats (le retenu tamis # 4)

- Les retirer de l'eau et les peser
- Les maintenir humides pendant 12 heures puis les repeser
- Mélanger le sable, les particules passant le tamis # 4 et la latérite mouillée puis brasser manuellement
- Verser le ciment dans le mélange puis malaxer.
- Verser l'eau de gâchage prévue puis malaxer
- Ajouter de l'eau s'il y a lieu jusqu'à avoir l'affaissement voulu et/ou un mélange ouvrable.

2.4.2 Mélange sans prémouillage

- Peser la quantité de latérite et de sable nécessaire pour le mélange.
- En prélever une certaine quantité puis mélanger
- Ajouter tout le ciment et toute l'eau prévus
- Ajouter progressivement du mélange latérite-sable jusqu'à avoir l'affaissement voulu et/ou un mélange maniable.
- Déterminer le poids du mélange latérite-sable utilisé.

2.5 Façon de compacter

Remplir les cylindres standards avec le mélange préparé en 3 couches compactées manuellement à

raison de 25 coups chacune à l'aide du marteau Proctor.

2.6 Mode et temps de séchage

- Démouler les cylindres après 1 à 3 jours selon les dosages.
- Les placer dans la chambre humide pendant 28 jours.

2.7 Mesure de la masse volumique

- Déterminer le poids des cylindres avant l'essai de compression (P_d) et après le mélange (P).

2.8 Type de presse et taux de chargement

Les essais ont été réalisés avec une presse TINUS OLSEN SUPER "L" WILLOW GROVE PA. USA à un taux de chargement de 20% de l'échelle choisie à la minute.

2.9 Type de surfacage

Le surfacage des cylindres s'est fait au soufre

2.10 Types de mesures

Lors des essais de compression, les charges ont

été directement lues sur la presse et les déplacements sur un micromètre de précision $1/100$ mm.

CHAPITRE 3

DOSAGES ET PARAMETRES ETUDIES

3-1 Tableau des différents mélanges

Dans le cadre de notre étude, plusieurs essais ont été réalisés.

Les tableaux 1 et 2 donnent respectivement les différents mélanges et les caractéristiques et résultats obtenus avec ces derniers.

3-2 Signification et intérêt des paramètres étudiés

3.2.1 Teneur en eau du mélange (T.E)

Elle représente la quantité totale d'eau (eau ajoutée + eau absorbée + eau contenue dans le matériau à l'état naturel) sur le matériau sec (laterite + sable + ciment)

$$T.E = \left[\frac{E_s}{(\text{laterite} + \text{sable} + \text{ciment})} \right] \times 100\%$$

Ce paramètre n'a pas tellement de signification pratique pour le calcul de l'eau de gâchage. Dépendamment du type de matériau, il peut varier considérablement à cause de l'absorption mais on prendra soin de le maintenir le plus près possible de la teneur en eau optimale (T.E.O) déterminée par l'essai Proctor.

En effet un écart en plus ou en moins par rapport à cette teneur en eau optimale peut diminuer considérablement la résistance.

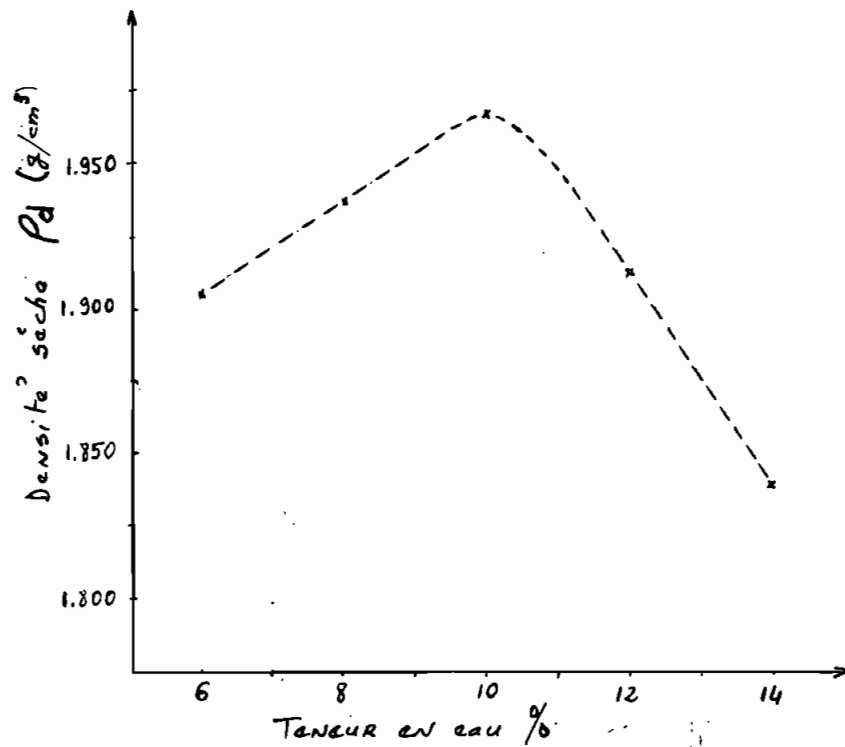


FIG 5 DENSITÉ SÈCHE VERSUS TENEUR EN EAU
POUR LA LATÉRITE BRUNE AMÉLIORÉE

En conformité avec notre définition de teneur en eau, il faudra en plus de cette teneur en eau optimale (ajoutée) considérer l'absorption du mélange (4.4%). D'où la teneur en eau optimale

$$T.E.O = 10\% + 4.4\% = 14.4\%$$

L'estimation de l'absorption du mélange latérite brune - sable est présentée en annexe (page 56)

22.

3.2.2 Humidité (h)

L'humidité est le rapport entre l'eau réellement utilisée pour l'hydratation [(E_h) c'est-à-dire l'eau contenue dans le matériau à l'état naturel plus l'eau ajoutée totale moins l'eau absorbée] et la poids des matériaux secs (latérite + sable + ciment).

Elle donne la quantité de l'eau de gâchage et contrôle la résistance du cylindre - On aura intérêt à la maintenir au minimum nécessaire

$$h = \left[\frac{E_h}{(L+S+C)} \right] \times 100\%$$

3.2.3 Dosage en pourcentage de ciment (d)

C'est un pourcentage pondéral qui exprime le poids de ciment utilisé par rapport au poids du mélange latérite-sable.

$$d = \left[\frac{C}{(L+S)} \right] \times 100\%$$

3.2.4 Rapport Eau/ciment brut : $(E/C)_{\text{brut}}$

Il exprime la quantité totale d'eau (E_t) utilisée par rapport au poids de ciment utilisé

$$(E/C)_{\text{brut}} = E_t/C$$

3.2.5 Rapport Eau/ciment vrai : $(E/C)_{\text{vrai}}$

C'est le rapport entre l'eau de gâchage (E_R) et le

ciment utilisé

$$(E/c)_{\text{rai}} = E_R/C$$

Il est en relation directe avec l'humidité. En effet, il est bien connu que la résistance d'un mélange de béton dépend surtout de son rapport eau/ciment.

Ce rapport caractéristique doit être maintenu à la valeur constante du strict minimum nécessaire pour le mélange. Etant donné que l'on peut mesurer facilement et avec précision les quantités de ciment et d'eau mélangés, le problème du maintien du rapport eau/ciment à cette valeur constante se ramène à un problème de correction pour tenir compte de l'humidité des granulats. (teneur en eau totale moins l'absorption) qui elle varie selon le matériau.

3.2.6 Façon de calculer certains paramètres

Pour les différents paramètres, la méthode de calcul est exposée en annexe. (page 57)

CHAPITRE 4

ANALYSE DES RESULTATS

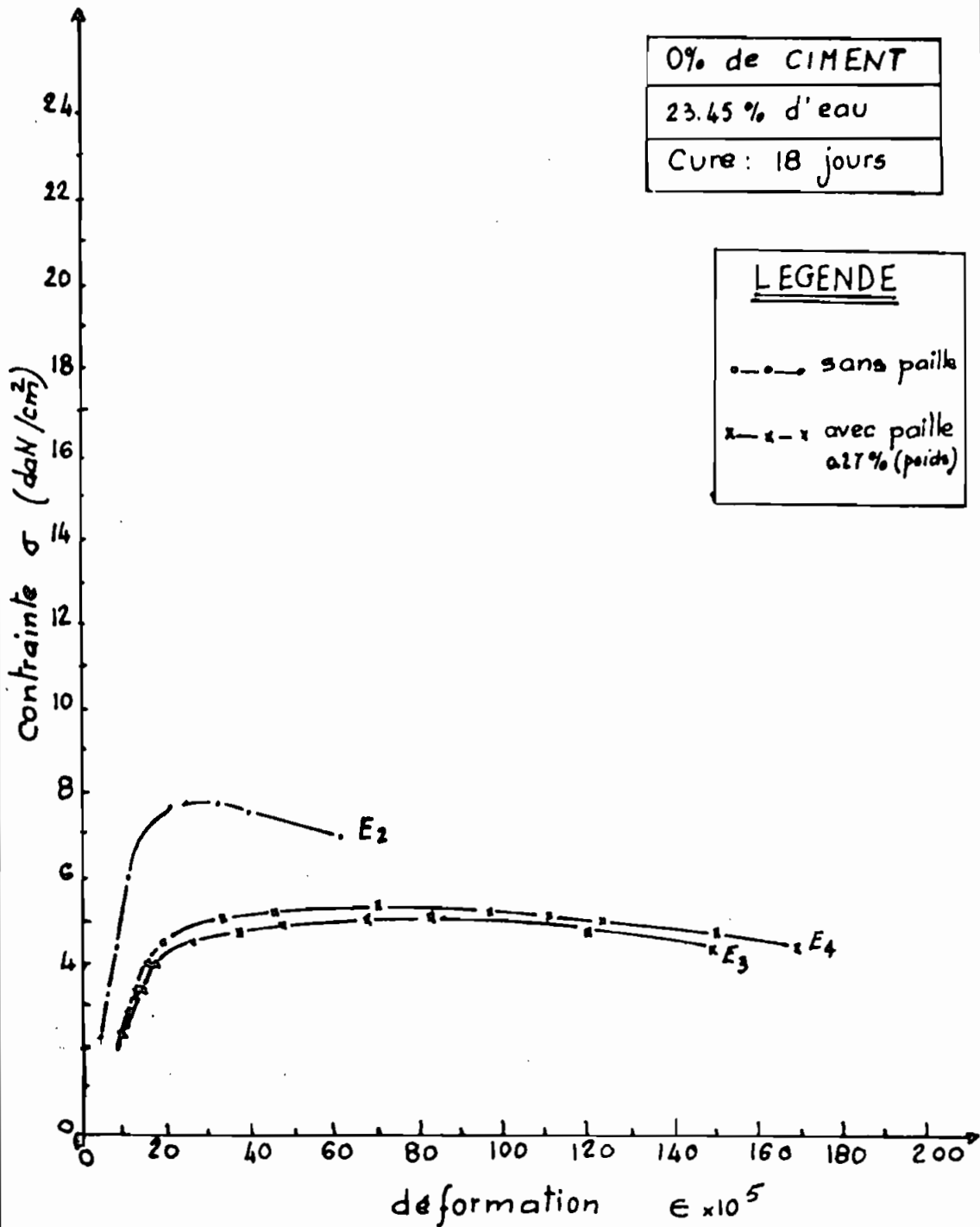
Cette partie constitue l'étude détaillée des résultats de l'ensemble des cinq phases.

On a d'abord analysé l'effet de divers stabilisants (paille, ciment), l'action de l'immersion et de la cure. Ensuite une étude plus détaillée a été faite sur les principaux paramètres qui guident la résistance : teneur en eau, rapport Eau/ciment vrai, rapport ciment/agrégats, humidité... etc.

4-1 Influence de la paille

Les courbes E_3 , E_4 comparées à E_2 et 1, 2, 3, 4, 5, 6 comparées à $1P_0$, $2P_0$, $3P_0$, $4P_0$, $5P_0$, $6P_0$ témoignent de la diminution de résistance que provoque la présence de paille. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'ajout de paille diminue la densité sèche ; en effet l'élasticité de la paille rend le compactage difficile.

En revanche, cette comparaison montre une nette augmentation de la plage plastique : une fois la cohésion du sol rompue, les brindilles de paille entrecroisent les fissures et présentent alors une résistance suffisante.



* Fig.1.1 : Courbes contrainte-déformation
 Influence de la paille sur la
 résistance à la compression
 (cylindres standards)
 FIG 6

* Référence bibliographique N° 10

pour permettre une rupture plus lente.

(Voir FIG 6 et tableau A-1)

4.2 Influence de l'immersion

L'immersion des échantillons cause une baisse très sensible de la résistance à la compression simple des cylindres. Cette baisse de l'ordre de 46 à 58% peut s'expliquer

- l'eau diminue la cohésion entre les particules : en perdant leur cohésion, elle atténue les liaisons mécaniques entre particules.

- la présence d'eau dans les pores de l'échantillon peut entraîner des pressions interstitielles non négligeables si l'indice des vides (ou encore teneur en air) est élevé.

La perte de résistance observée lorsqu'après immersion de 7 jours, on laisse l'échantillon encore sécher pendant 1 jour à l'air est de l'ordre de 30%

Si maintenant, l'échantillon est exposé 8 jours à l'air après immersion de 7 jours, on obtient un gain de résistance de 18% qui du reste s'explique par l'effet bénéfique de la cure. (Voir tableau A-2)

Cet effet n'a pas été étudié pour les forts dosages mais on peut penser que la perte de résistance serait plus faible.

4-3 Influence de la cure

Le but essentiel de la cure est de permettre une hydratation complète du ciment. Elle permet également de minimiser les fissures de retrait et ainsi d'obtenir des gains de résistance relativement importants.

Le tableau suivant illustre l'influence du mode et du temps de cure sur la résistance.

Tableau 4 Influence de la cure

Mode de cure	Temps de séchage	Résistance moyenne (MPa)	Accroissement par rapport au mode de cure	Accroissement par rapport au temps de séchage	Caractéristiques
Au soleil	18j	0.408	-	-	T.E = 21.6% %C = 0 Laterite rouge brute
A l'ombre	18j	0.479	17.4%	-	
Au soleil	28j	0.355	-	-14.9%	T.E = 21.6% %C = 0 Laterite rouge brute
A l'ombre	28j	0.506	42.5%	5.6%	
Coffrage	21j	1.127	-		$E_{\text{vrai}} = 1.6$ %sable : 20-30% %C = 6% Laterite brute améliorée
A l'ombre	28j	2.085	85%		
Chambre humide	28j	3.655	224%		
A l'ombre	28j	3.23	-		$E_{\text{vrai}} = 1.35$ Humidité : 10% T.E = 16.2% T.A = 3.5% %sable : 30% Laterite brute améliorée
Chambre humide	28j	4.81	49%		

28-

Au regard de ce tableau, les conclusions qui se dégagent sont que les conditions de cure ont une influence notable sur la résistance.

Les essais effectués sur la latérite rouge brute montrent que le séchage à l'ombre offre un accroissement de la résistance de l'ordre de 20% par rapport au séchage au soleil.

Comparé à la cure à l'ombre, le séchage dans la chambre humide augmente la résistance de la latérite brune améliorée de l'ordre de 50%.

Cet effet n'a pas été étudié pour les dosages plus forts mais on peut s'attendre à une influence moindre.

4.4 Influence de la densité sèche

La densité sèche a une influence assez nette sur la résistance en compression; en effet, cette dernière est d'autant plus grande que le matériau est dense. Seulement le contrôle de cette densité passe par celui des paramètres suivants :

- énergie et mode de compactage
- teneur en eau
- granulométrie

Le mode de compactage généralement utilisé avec nos cylindres a été le pilonnage manuel. Les variations

observées pour un même mélange et les mêmes conditions de cure sont peu importantes ; l'effet sur la résistance est alors faible.

Seulement même si les conditions de cure et le dosage en ciment/l'arête + sable sont identiques pour des mélanges différents, la seule mesure de la masse volumique à l'état sec ne permet pas de connaître de façon précise la résistance à laquelle on peut s'attendre à partir des résultats de l'un des mélanges. En effet, la densité sèche est fonction d'autres paramètres importants susceptibles de varier d'un mélange à un autre (absorption, teneur en eau, énergie et mode de compactage ... etc) - Une variation ou une mauvaise connaissance de ces derniers peut rendre difficile l'interprétation de la densité sèche -

Tableau 5 Influence de la densité sèche

Mode de cure	Dosage en ciment	Cylindres	Masse volumique à l'état sec (kg/m ³)	Résistance (MPa)
28 jours de cure dans la chambre humide	6%	DA 8	2187	2.51
		DA 9	2195	2.26
		DA 10	2177	2.44
		DA 16	2184	3.96
		DA 17	2188	3.35

4.5 Influence de l'érosion

Cet essai est conçu pour simuler l'effet de la précipitation sur les briques en latérite stabilisée.

Un jet d'une vitesse de 7.43 m/s c'est-à-dire une pression de 27.6 kN/m² est appliqué pendant 33 heures sur un trou de 1cm aménagé sur la brique.

L'augmentation de profondeur observée n'est que de 1mm. On peut donc dire que les cylindres résistent bien à l'arrosage. Seulement ce test n'intègre pas les processus répétitifs d'"humidification-déshumidification" lors de l'utilisation de ces briques.

(Voir la référence bibliographique N°11)

4.6 Influence de l'énergie de compactage et de la teneur en eau

Une plus grande énergie de compactage diminue la teneur en eau optimale et conduit à une plus grande densité sèche d'où une plus grande résistance

(Voir tableau A-3)

Cependant, de très fortes énergies de compactage peuvent produire des phénomènes annexes nuisibles à la qualité du matériau comme par exemple la bris des agrégats.

D'autre part, la teneur en eau totale du mélange doit être maintenue le plus près possible de l'optimum (FIG 5)

Un écart en plus ou en moins par rapport à la teneur en eau optimale diminue la densité. Une teneur en eau qui excède l'optimum peut diminuer considérablement l'effet bénéfique de l'augmentation de la pression de compactage sur la résistance. Ce qui peut s'expliquer par le fait que la fluidité du mélange est telle que l'augmentation de l'énergie de compactage crée plus une ségrégation des particules qu'elle ne contribue à leur compaction effective (Voir FIG-7)

D'après ces courbes, les remarques suivantes se dégagent :

- * Diminution de la résistance de l'ordre de 70% lorsque la teneur en eau passe de 16% à 22%
- * Le module de YOUNG passe de 4571 MPa à 700 MPa
- * Augmentation de la plage plastique aussi quand la teneur en eau passe de 16% à 22%

4.7 Humidité

L'analyse des résultats du tableau 2 montre que l'humidité (rapport eau d'hydratation sur matière sèche) est en moyenne de 10% contre 9% pour le béton usuel

(Voir tableau A-5)

Le mélange obtenu est ouvrable, maniable, toutefois l'affaissement obtenu en moyenne 50 mm est inférieur à celui généralement visé avec le béton (80 mm)

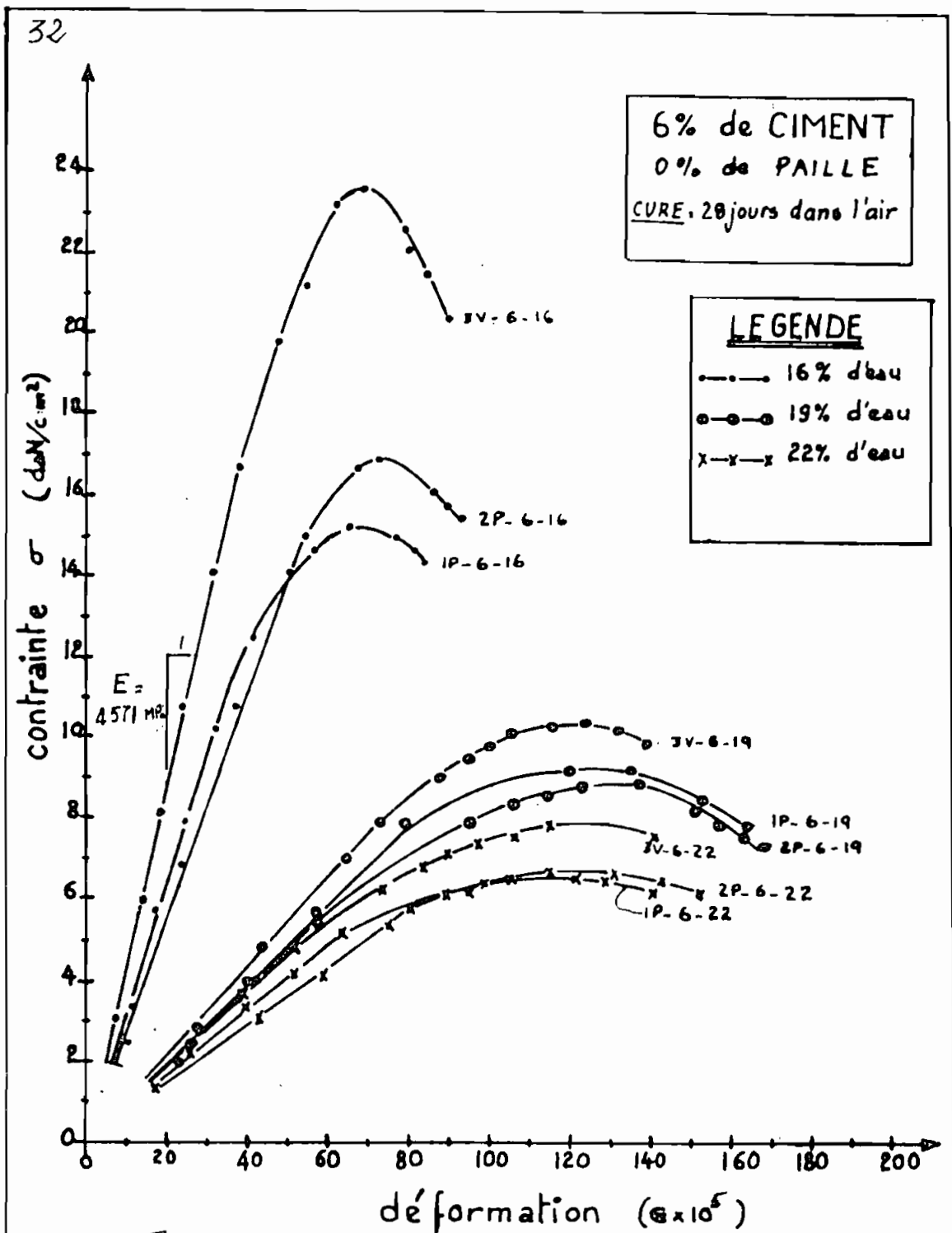


FIG 7

* Fig 4.3: Courbes contrainte-déformation

Influence de la teneur en eau et du compactage

* Référence bibliographique N° 10

4.8 Rapport $\frac{\text{ciment}}{\text{Laterite + sable}}$

L'addition du ciment permet l'obtention d'un matériau aux caractéristiques améliorées. Son effet principal est une insensibilisation à l'eau.

Lorsque le rapport ciment/laterite + sable passe de 0 à 4%, on observe un palier horizontal.

À partir de 4%, la résistance en compression augmente en fonction du pourcentage de ciment.

(Voir FIG-8)

L'analyse de cette courbe montre une nette diminution de la pente à partir de 14% de ciment.

Ceci s'explique par le fait qu'à ce niveau, la résistance n'est plus assurée principalement par la pâte mais plutôt par les granulats. En effet, la capacité des granulats a été totalement mobilisée : la rupture de l'échantillon se faisait au niveau des granulats mêmes.

(Voir le tableau 6)

À partir de ce niveau donc, une augmentation du pourcentage de ciment ne garantit plus un gain substantiel de résistance.

Cependant quelques réserves sont à apporter quant aux résistances :

— le ciment ordinaire CPA 325 utilisé présente

34-

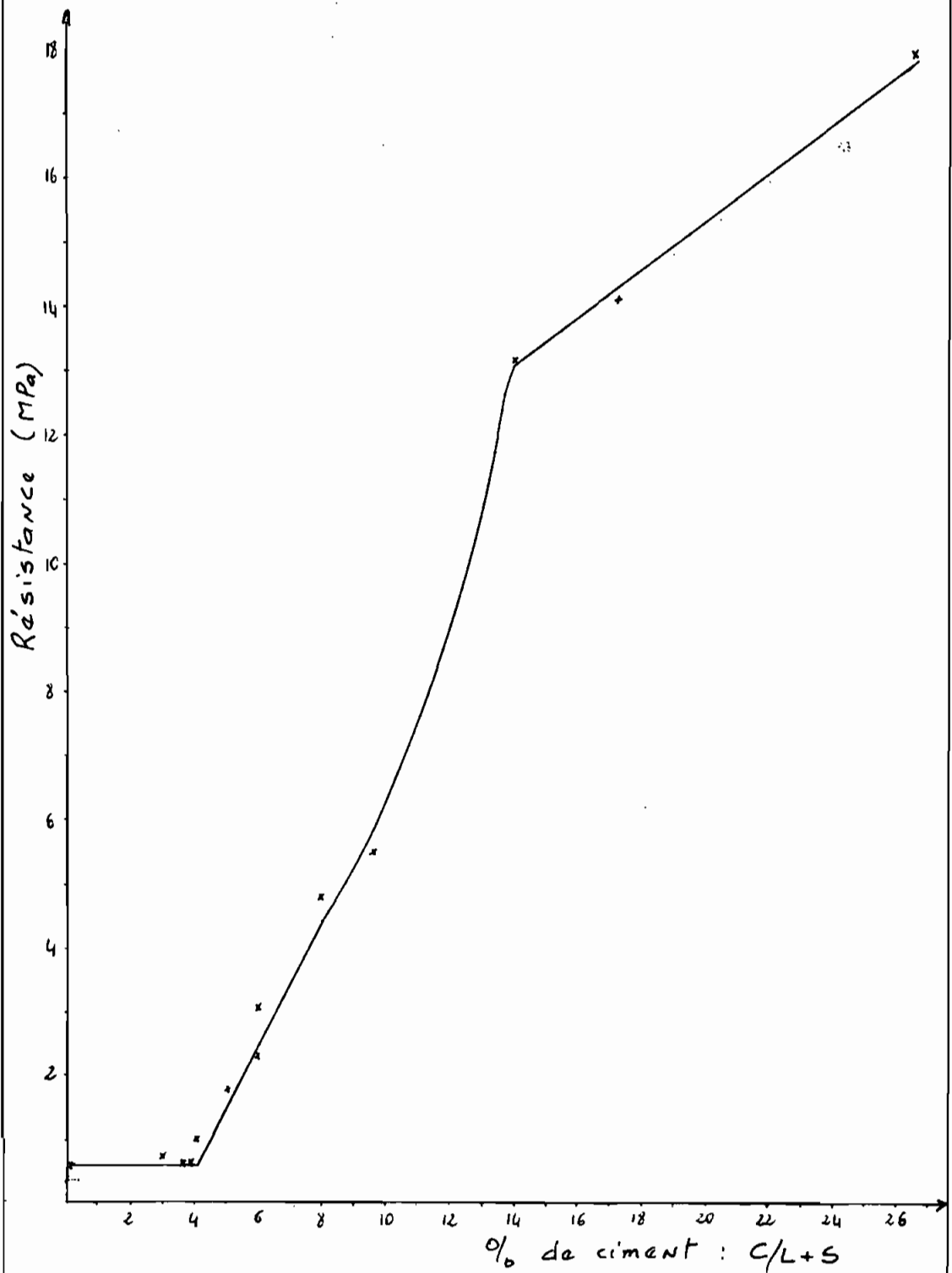


FIG 8 Courbe : Résistance versus pourcentage de ciment

Tableau 6 : Mode de rupture des cylindres comprimés

Dosage en ciment	Cylindres	Mode de rupture observé
6%	DA 8 DA 9 DA 10	Rupture de la pâte
	DA 14 DA 15	Rupture de la pâte
	DA 16 DA 17	Rupture de la pâte et quelques granulats
8%	DA 18 DA 19	Rupture de la pâte
	DA 20 DA 21	Rupture de la pâte et quelques granulats
9.6%	DA 5 DA 6 DA 7	Rupture de la pâte et un peu de granulats
14%	DA 11 DA 12 DA 13	Rupture des granulats
17.2%	DA 2 DA 3 DA 4	Rupture des granulats
26.6%	DA 1	Rupture des granulats

des propriétés fluctuantes. Une défaillance au niveau du ciment se répercute obligatoirement sur la résistance en compression surtout pour les dosages où la résistance est essentiellement assurée par la pâte.

L'analyse des résultats obtenus sur l'étude du ciment (des cubes de mortier) permet cependant d'affirmer que le ciment utilisé donnait les résultats escomptés.

(Voir tableau A-6)

— Le cylindre DA 1 (25.6% de ciment) offrirait certainement une résistance plus élevée si l'humidité était de 10% et non 12%. Cette constatation montre la côte sécuritaire de la courbe au-delà de 14% de ciment.

4.9 Rapport $\frac{\text{Eau}}{\text{ciment}}$

Ce paramètre contrôle essentiellement la résistance en compression. Il doit être surveillé attentivement de façon à le maintenir le plus faible possible comme pour les bétons normaux.

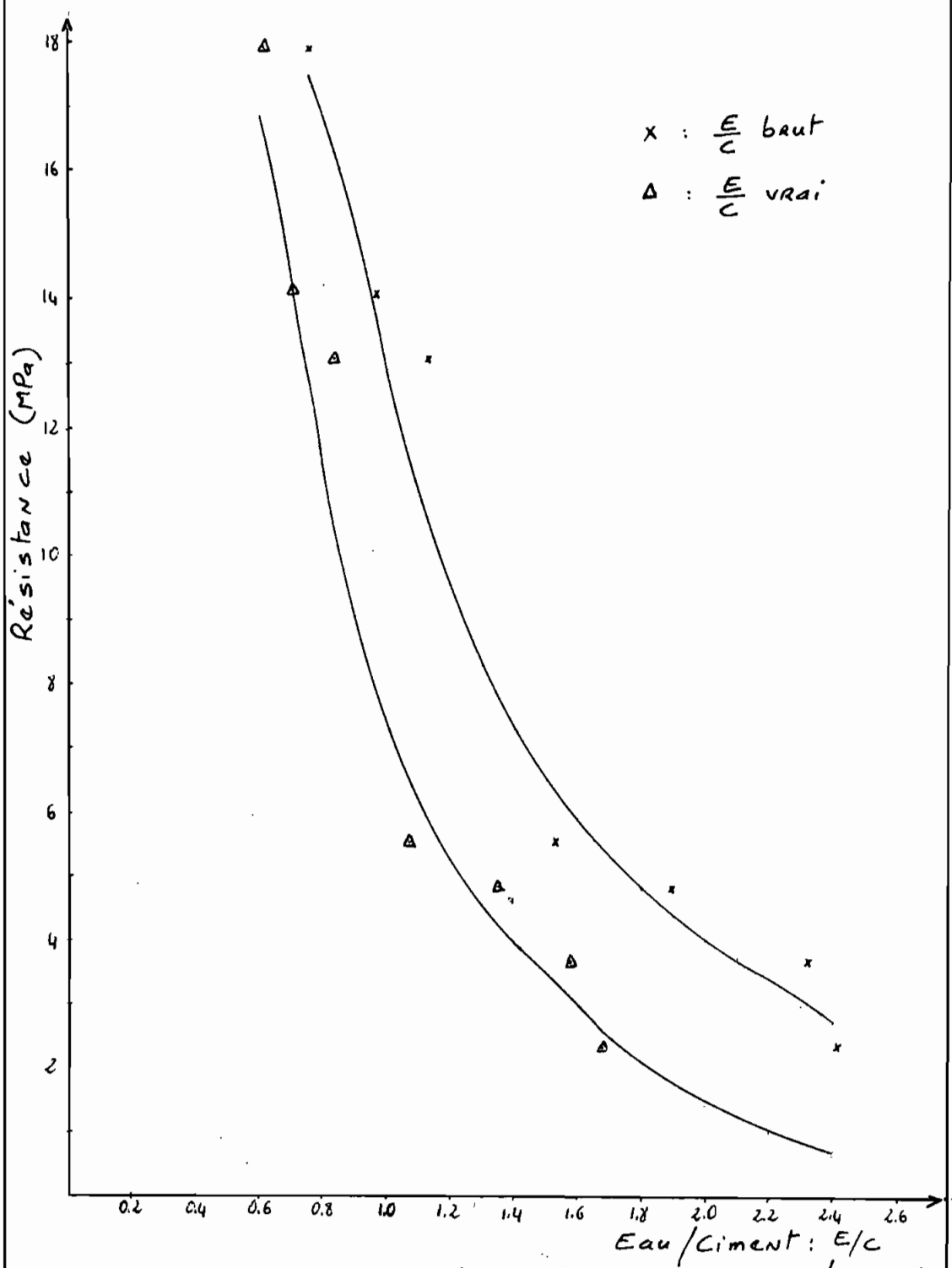


FIG 9 Courbes resistance versus Eau/ciment

Les courbes Résistance versus $\frac{E}{C}$ vrai d'une part et Résistance versus $\frac{E}{C}$ brut d'autre part présentant une allure générale semblable à celle obtenue avec le béton (Voir FIG 9)

La différence entre les deux courbes s'explique par le taux d'absorption pris en compte dans le rapport $\frac{E}{C}$ brut.

Cependant les rapports $\frac{E}{C}$ obtenus avec nos mélanges sont plus élevés que ceux généralement obtenus avec le béton (0.4 - 0.8) - Ceci s'explique par le fait que avec la latérite on a plus de fines - Pour rendre le mélange ouvrable, la quantité d'eau nécessaire augmente à cause de la plus grande plasticité de la latérite.

4.10 Module d'élasticité

Comme avec le béton, la latérite n'a pas un rapport contrainte-déformation constant qui justifie le terme "module d'élasticité". En effet ce dernier varie avec la résistance.

Il dépend aussi de l'âge, du taux de chargement, des propriétés du ciment et des

agrégats.

Le module calculé est : $E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon}$ dans le domaine élastique.

Tableau 7 : Module d'élasticité

Pourcentage de ciment	Module d'élasticité E (MPa)	Mode de cure (28j)	Humidité	Résistances (MPa)	Déformations ultimes
6%	2000	A l'ombre	9%	2.08	0.0044
6%	3667	Chambre humide	9%	3.66	0.0027
6%	2133	Chambre humide	9.5%	2.40	0.0022
8%	3000	A l'ombre	10%	3.23	0.0049
8%	5062	Chambre humide	10%	4.81	0.0024
9.6%	5750	Chambre humide	9.4%	5.54	0.0028
14%	8055	Chambre humide	10%	13.07	0.0028
17.2%	8222	Chambre humide	10.3%	14.09	0.0026
26.6%	7000	Chambre humide	12.6%	17.88	0.0032

Lorsqu'on consulte le tableau, les remarques suivantes se dégagent :

— le module d'élasticité augmente avec la résistance, en effet un matériau plus résistant a une ductilité plus faible.

Seulement le cylindre au dosage de 26.6% de ciment a un module moindre que ceux pour les dosages de 17.2% et 14%. Comme indiqué (dans le paragraphe

40-

4-8 du rapport)

ON aurait pu avoir une résistance plus grande et par conséquent un module plus grand pour ce cylindre.

- La déformation ultime ϵ_u au moment de l'écrasement varie de 0.002 à 0.005 alors que celle du béton varie généralement de 0.003 à 0.008.

CHAPITRE 5

ANALYSE STATISTIQUE

La latérite stabilisée qui est une masse durcie de matériaux hétérogènes est soumise à l'influence d'un grand nombre de paramètres qui peuvent faire varier sa résistance. Principalement, on peut dire que les différences de résistance proviennent :

- * des variations des paramètres qui contrôlent la résistance : E_c vrai, mûrissement, variations excessives dans la teneur en eau des granulats... etc

- * des variations inhérentes aux essais : coffrage des cylindres, mauvaise technique d'essai... etc

Cependant, selon les exigences spécifiées, on doit pouvoir utiliser correctement les résultats des essais et d'en connaître les limites.

C'est le but de cette étude statistique faite sur l'ensemble des résultats des cinq phases et qui permet de garantir les probabilités indiquées pour les résistances ci-spécifiées.

Tableau 8 : Probabilités garanties pour les résistances 0.5 et 1.0 MPa

Type de latérite	Dosage en ciment	Moyenne \bar{x}	Ecart type σ	Résistance spécifiée (MPa)	Probabilité garantie
Latérite brune	6%	1.145	0.843	0.5	77.8%
		1.145	0.843	1.0	56.8%
Latérite Rouge	6%	1.443	0.612	0.5	93.8%
		1.443	0.612	1.0	76.4%
Latérites Rouge et brune	6%	1.287	0.757	0.5	85%
				1.0	64.8%

Ayant considéré dans notre analyse statistique tous les résultats sans considération des paramètres qui les différencient (voir tableaux A-7 A-8 et A-9) les probabilités ci-dessus pourraient être augmentées ; par exemple les échantillons immergés, comme on le sait, diminuent la résistance de 60% environ.

En ce qui concerne nos tests (phase V) à 6%, la probabilité d'obtenir 1.0 MPa serait près de 100% même si on admettait une saturation des échantillons.

(voir tableau 2)

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

— Pour les faibles dosages, l'ajout de paille diminue la résistance de l'ordre de 35%. En revanche, il augmente la plage plastique.

Pour les forts dosages, l'effet de la paille n'a pas été étudié. Mais on peut à juste titre, s'attendre à avoir une influence moindre sur la résistance.

— La saturation des échantillons avant test, cause une baisse de l'ordre de 50%.

Seulement si une immersion de 7 jours est utilisée comme cure supplémentaire pour les échantillons séchés pendant 28 jours à l'air, on observe pour les faibles dosages :

* si après immersion l'échantillon est exposé 1 jour à l'air, la baisse de résistance passe de 50% à 30% (par rapport au séchage à l'air)

* si maintenant après immersion l'échantillon est exposé 8 jours à l'air, on obtient un gain de 18% par rapport à la résistance obtenue après un séchage de 28 jours à l'air.

— Les conditions de cure influent sur la résistance pour les faibles dosages :

* le séchage à l'ombre offre un gain de résistance

44-

de l'ordre de 20% par rapport au séchage au soleil.

* Le séchage dans la chambre humide augmente la résistance de la latérite brune améliorée de l'ordre de 50% par rapport à la cure à l'ombre.

L'étude n'a pas été faite pour les forts dosages mais on pourrait penser que l'effet serait moindre à ce niveau.

— L'influence de la densité sèche ne se faisait pas sentir avec le pilonnage manuel utilisé

— Même avec de faibles dosages (6%), nos cylindres résistent à l'arrosage.

— Une humidité de 9 à 10% et/ou un affaissement de 40 à 50 mm offrent des mélanges ouvrables.

— Pour les faibles dosages de ciment (ciment/Latérite + sable) de 0 à 4%, l'augmentation de résistance est négligeable.

Au delà de 4%, la résistance augmente très sensiblement avec le dosage en ciment.

Après le développement de la pleine capacité des granulats (bris à 14%), la résistance est contrôlée essentiellement par ces derniers. Une augmentation du ciment ne garantit plus un gain substantiel de résistance.

— Les rapports $\frac{\text{Eau}}{\text{Ciment}}$ vrai obtenus avec nos mélanges sont plus élevés que ceux généralement utilisés avec le béton.

— Le module d'élasticité augmente avec la résistance

et la déformation ultime au moment de l'écrasement varia de 0.002 à 0.005.

— Généralement, l'influence des différents paramètres qui guident la résistance a été étudiée uniquement avec la latérite brune pour des dosages faibles (6% de ciment) ce qui s'expliquait par le fait qu'à l'état brut, la latérite brune était moins dense et par conséquent susceptible de fournir moins de résistance.

Cependant avec l'amélioration suggérée (70% de latérite - 30% de sable), on constate que la latérite brune devient plus dense que la latérite rouge. Par conséquent on devra s'attendre avec la latérite rouge à des résistances moindres.

D'autre part l'influence des divers paramètres étudiés devra être étudiée avec les dosages forts.

— Nous recommandons une humidité de 9 à 10%. Seulement le calcul de ce paramètre fait intervenir l'absorption. Cette caractéristique de la latérite est variable et un peu difficile à maîtriser. C'est pourquoi nous recommandons de viser sur le chantier des affaissements de 40 à 50 mm avec un pré-mouillage au préalable des gros granulats (granulats supérieurs à 5 mm).

— L'exploitation des résultats a permis d'établir les courbes :

46-

* Résistance versus $\frac{E}{C}$ brut et $\frac{E}{C}$ vrai d'une part

* Résistance versus $\frac{C}{L+S}$ d'autre part

Pour l'exploitation de ces courbes, nous recommandons de considérer la plus petite des deux résistances déterminées à partir de ces dernières.

Seulement il est plus facile d'exploiter la courbe résistance versus $\frac{C}{L+S}$ du fait que les rapports $\frac{E}{C}$ brut et $\frac{E}{C}$ vrai font intervenir l'absorption qui varie selon la type de latérite.

- Du fait de la friabilité des granulats, l'énergie et la mode de compactage doivent être bien contrôlés.

- Quant à la méthode de mélange, nous recommandons le pré-mouillage préalable des granulats supérieurs à 5 mm.

- Le pourcentage minimum passant le tamis 200 (15%) fixé par certains auteurs (Grésillon Jean Michel) n'a pas été un facteur prépondérant pour nos essais.

Au contraire, on remarque que les latérites ayant une granulométrie qui donne un minimum de 30% passant le tamis 2mm, donnant d'assez bonnes résistances.

ANNEXES

Liste des figures et tableaux
en annexe

Fig A-1	:	Courbe contrainte-déformation du cylindre DA 1	49
Fig A-2	:	Courbes contrainte-déformation des cylindres DA 2. DA 3. DA 4	50
Fig A-3	:	Courbes contrainte-déformation des cylindres DA 5. DA 6. DA 7	51
Fig A-4	:	Courbes contrainte-déformation des cylindres DA 8. DA 9. DA 10	52
Fig A-5	:	Courbes contrainte-déformation des cylindres DA 11. DA 12. DA 13	53
Fig A-6	:	Courbes contrainte-déformation des cylindres DA 14. DA 15. DA 16. DA 17	54
Fig A-7	:	Courbes contrainte-déformation des cylindres DA 18. DA 19. DA 20. DA 21	55
Tableau A-1	:	Influence de la paille	60
Tableau A-2	:	Influence de l'immersion	60
Tableau A-3	:	Influence de l'énergie de compactage	
Tableau A-4	:	Essai Proctor du mélange latérite-sable	61
Tableau A-5	:	Résistance en compression et humidité pour du béton usuel	62
Tableau A-6	:	Résistance en compression à 28 jours sur cubes de mortier	63
Tableau A-7	:	Symboles des paramètres différenciant les échantillons de l'analyse statistique	64
Tableau A-8	:	Caractéristiques des échantillons de l'analyse statistique pour la latérite rouge	65
Tableau A-9	:	Caractéristiques des échantillons de l'analyse statistique pour la latérite brune	66
Tableau A-10	:	Contrainte-déformation pour les cylindres DA 1. DA 2. DA 3. DA 4	67
Tableau A-11	:	Contrainte-déformation pour les cylindres DA 5. DA 6. DA 7. DA 8. DA 9. DA 10	68
Tableau A-12	:	Contrainte-déformation pour les cylindres DA 11. DA 12. DA 13	69

Tableau A-13	Contrainte - déformation pour les cylindres DA 14 - DA 15 - DA 16 - DA 17	70
Tableau A-14	Contrainte - déformation pour les cylindres DA 18 - DA 19 - DA 20 - DA 21	71
Tableau A-15	Masse volumique des mélanges T _a	72
Tableau A-16	Essai de densité optimale pour la latérite brune	74
Tableau A-17	Essai de densité optimale pour la latérite rouge	74
Tableau A-18	Densité pilonnée et en vrac pour la latérite brune brute	75
Tableau A-19	Densité pilonnée et en vrac pour la latérite rouge brute	75
Tableau A-20	Teneur en eau naturelle des latérites brune et rouge	76
Tableau A-21	Test d'absorption des latérites rouge et brune	78
Tableau A-22	Analyse granulométrique des latérites brune et rouge	80
Tableau A-23	Analyse granulométrique du sable de dune	81
Tableau A-24	Pourcentage des essais inférieurs à la résistance spécifiée lorsque la moyenne dépasse cette résistance spécifiée	82

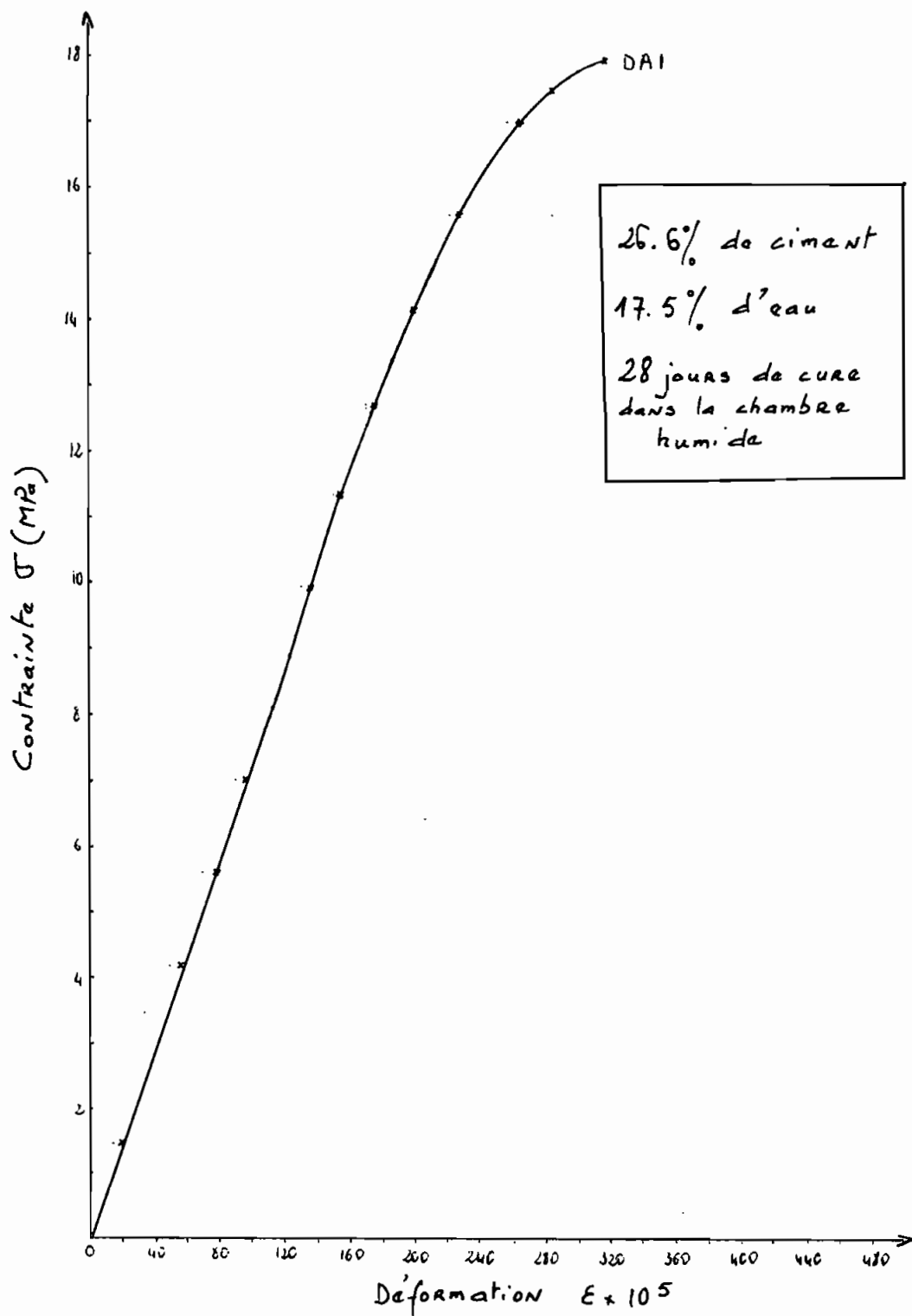


Fig A-1 : Courbe contrainte - déformation

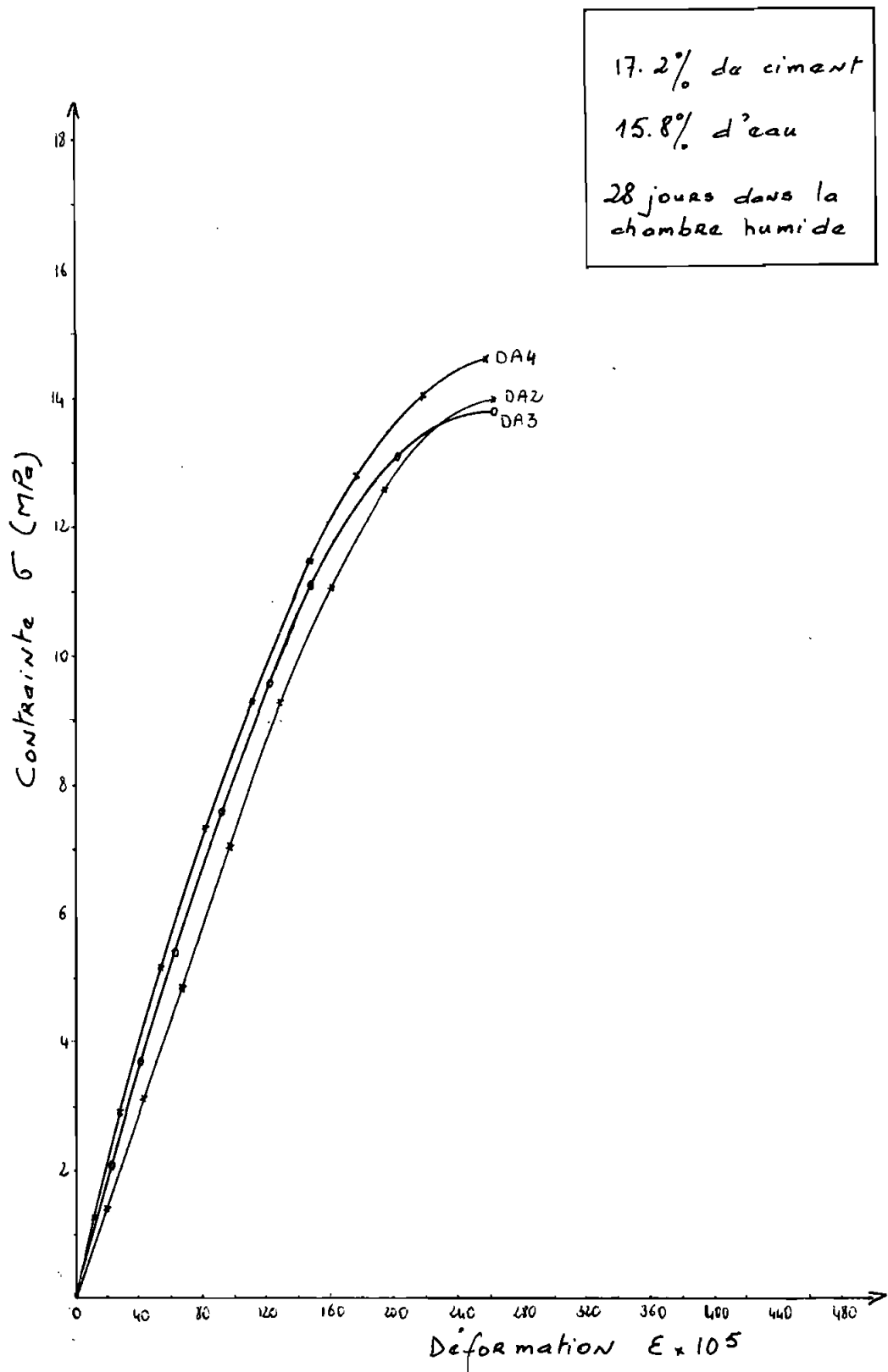


Fig A-2 : Courbes Contrainte - Déformation

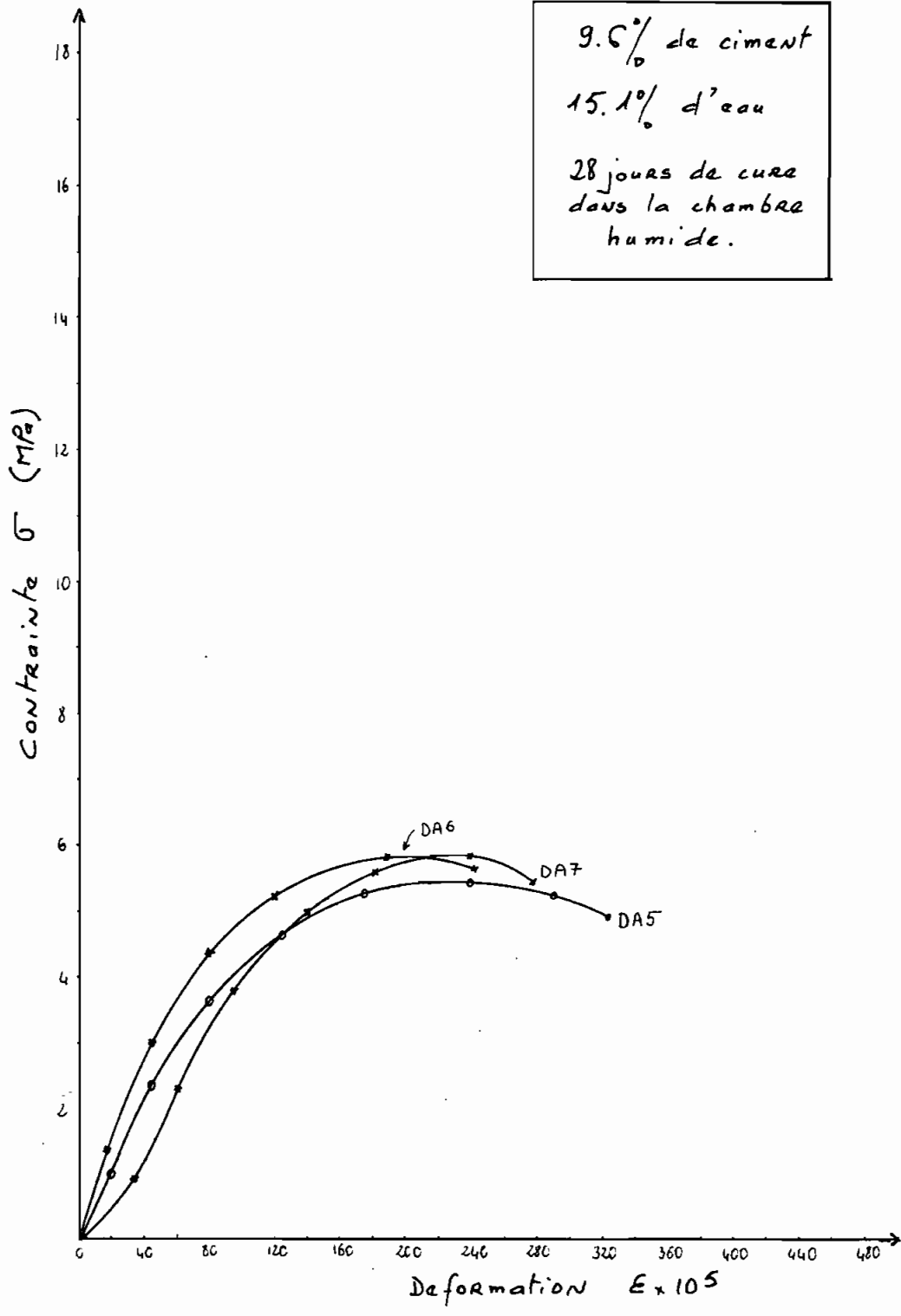


Fig A-3 : Courbes Contrainte - déformation

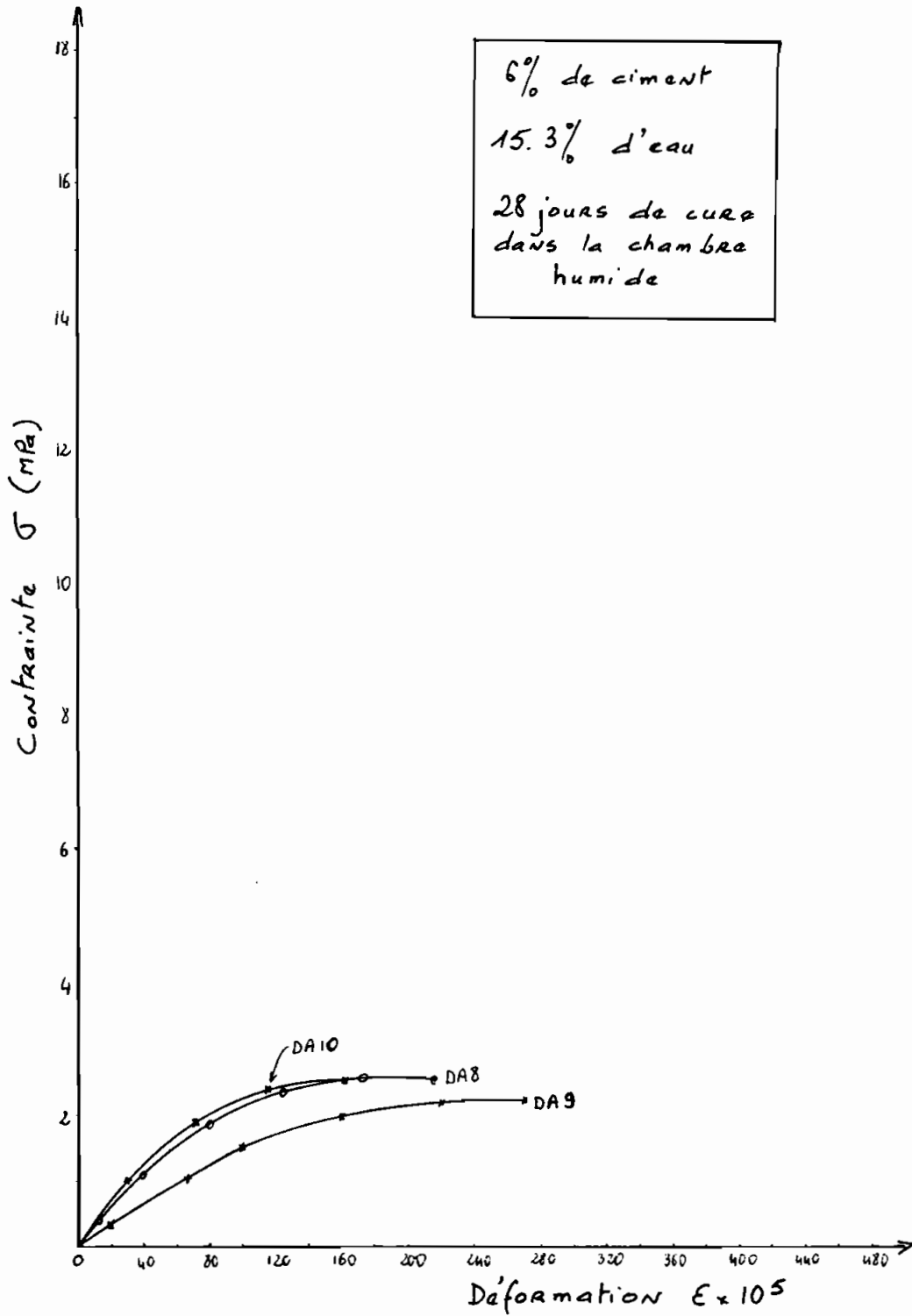


Fig A-4 : Courbes Contrainte - déformation

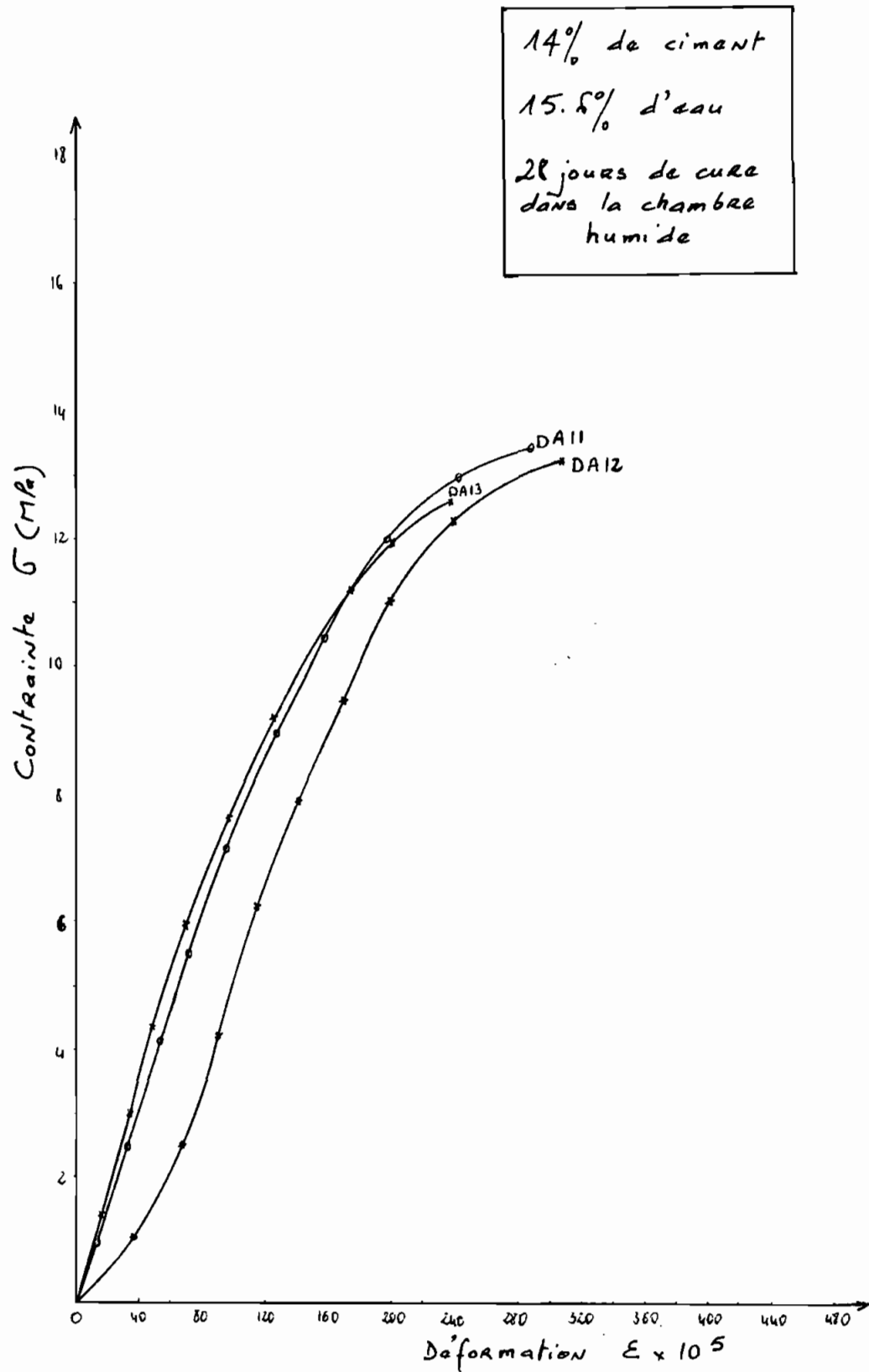


Fig A-5: Courbes Contrainte - déformation

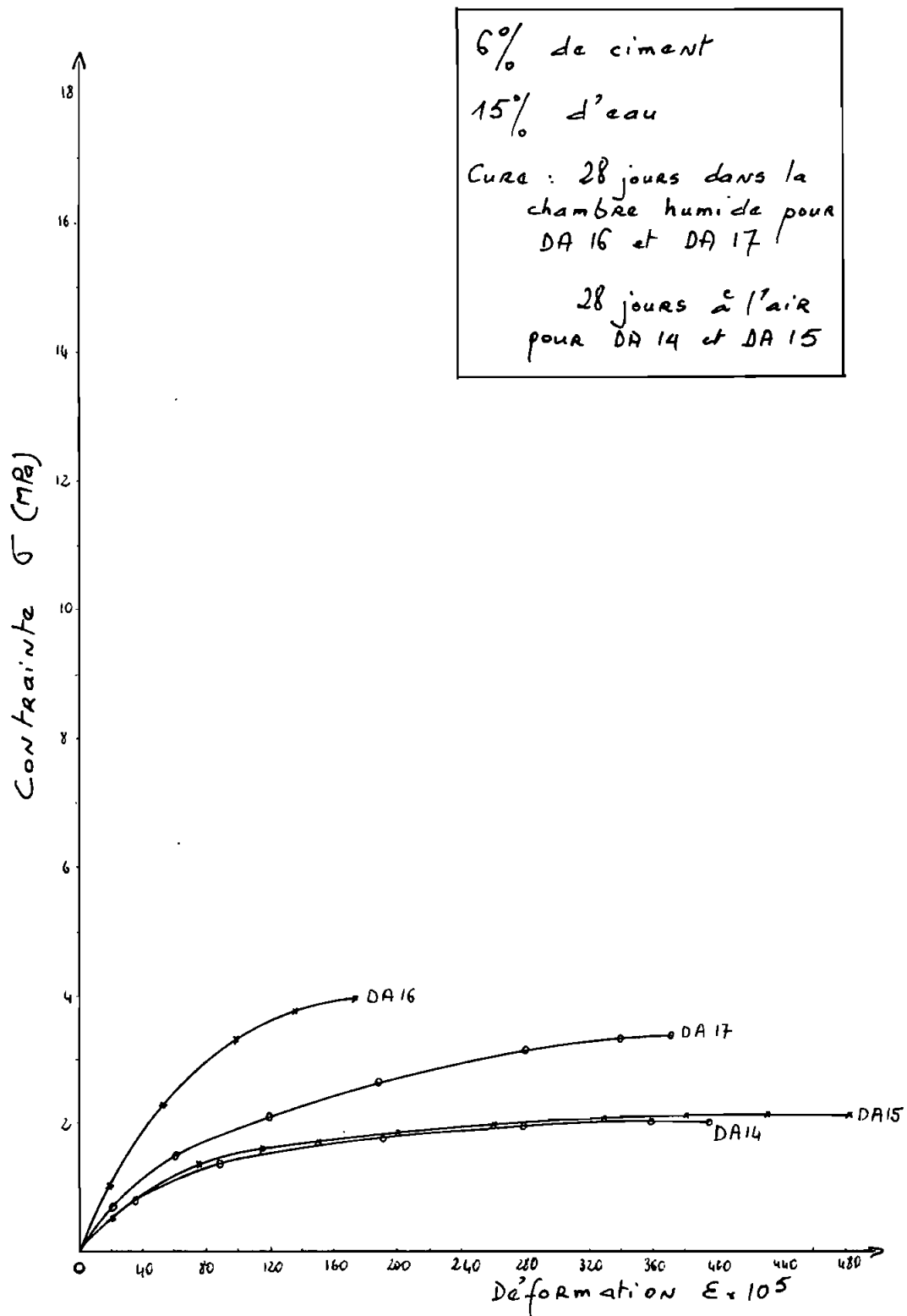


Fig A-6 : Courbes Contrainte - déformation
(Influence de la cure)

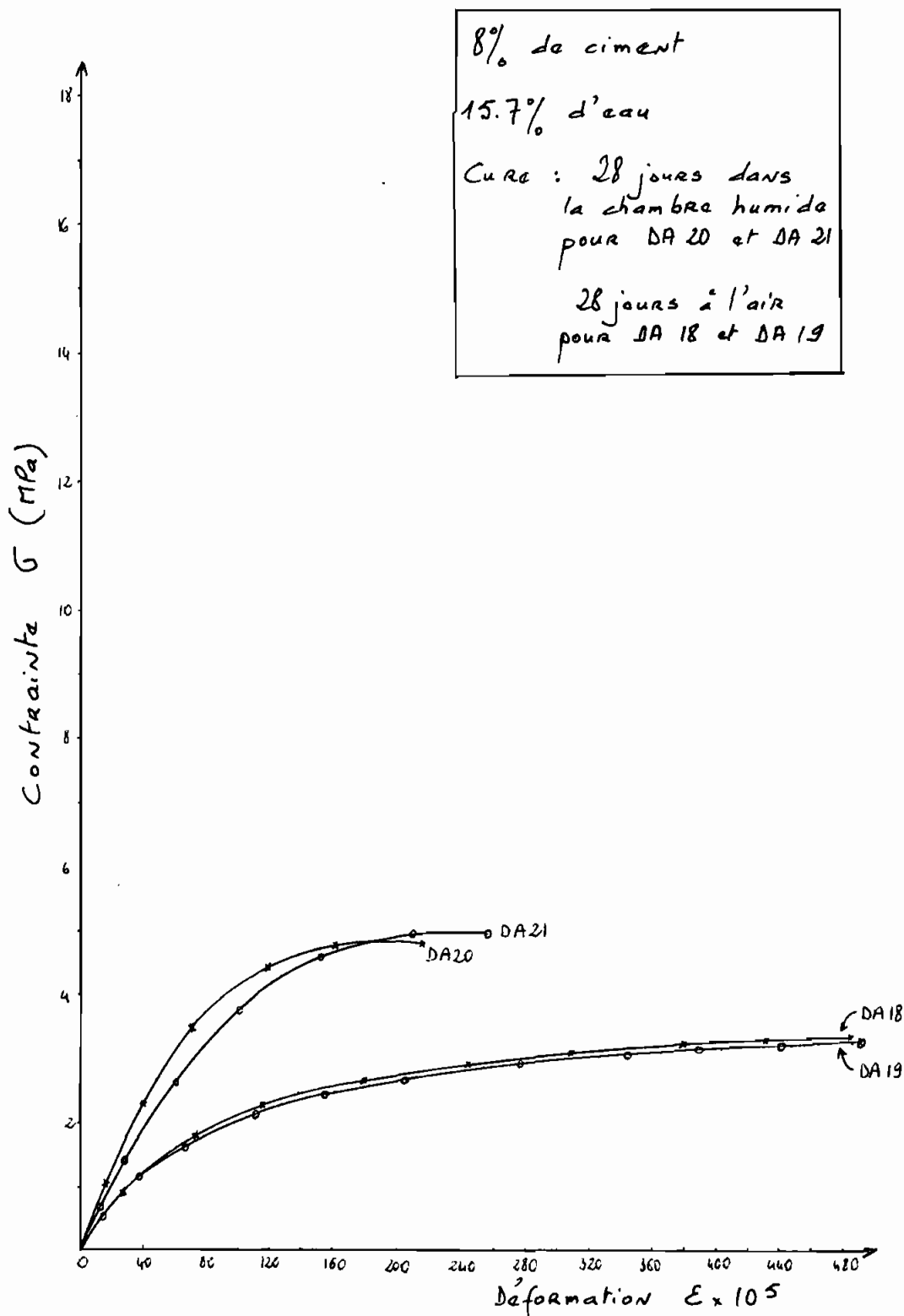


Fig A-7 : Courbes Contrainte - déformation
(Influence de la cure)

Estimation de l'absorption du
mélange latérite brune - sable

Teneur en eau naturelle de la latérite brune

$$\frac{1}{2} (2.09 + 2.31) = 2.2\%$$

L'absorption des granulats supérieurs à 5mm est 9.9%

L'absorption du granulat fin : 1%

De la courbe granulométrique du mélange latérite brune - sable on tire :

* environ 50% retenu tamis # 4

d'où l'absorption estimée pour le mélange

$$50\% (9.9 - 2.2) + 50\% \times 1 = 4.35\% \\ \approx 4.4\%$$

Methode de calcul des parametres

Taux d'absorption du mélange laterite-sable: 4.4% du poids

Densité en vrac du mélange laterite-sable: 1.55 g/cm³

Densité en vrac du ciment : 1.18 g/cm³

$$* \text{ Dosage } \frac{\text{ciment}}{\text{laterite + sable}} \left(\frac{C}{L+S} \right)$$

Soient les cylindres DA 8. DA 9. DA 10

Poids de ciment mis dans le mélange: 2.4 kg

Poids de laterite + sable mis dans le mélange: 40 kg

$$\text{d'où } \frac{C}{L+S} = \frac{2.4}{40} = 0.06 = 6\%$$

$$* \text{ Dosage en volume (VRAC)} : \frac{\text{Volume de ciment}}{\text{Volume de laterite + sable}}$$

Soit le cylindre DA 1

Poids de laterite + sable dans le mélange: 26.12 kg

$$\text{d'où le volume: } V_{L+S} = \frac{26.12 \cdot 10^3}{1.55 \cdot 10^6} = 1.685 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$$

Poids de ciment utilisé: 6.95 kg

$$\text{d'où le volume en vrac } V_c = \frac{6.95 \cdot 10^3}{1.18 \cdot 10^6} = 5.89 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Le dosage en volume est alors:

5.89 10⁻³ m³ de ciment pour 1.685 10⁻² m³ de laterite + sable

soit: 1 ciment pour $\frac{1.685 \cdot 10^{-2}}{5.89 \cdot 10^{-3}} = 2.86$ laterite + sable

soit 1/2.86

58-

* Dosage en ciment/m³ de mélange

Soient les cylindres DA8-DA9-DA 10

La masse volumique humide moyenne est :

$$\rho = \frac{1}{3}(2226 + 2226 + 2215) = 2222 \text{ kg/m}^3$$

La composition du mélange est :

$$\text{Poids de latérite + sable} = 40 \text{ kg}$$

$$\text{Poids de ciment} = 2.4 \text{ kg}$$

$$\text{Poids de l'eau} = 5.79 \text{ kg}$$

soit 48.19 kg de mélange

Le pourcentage pondéral du ciment dans le mélange

$$\text{est : } \frac{2.4}{48.19} = 4.98\%$$

d'où le dosage en ciment

$$\text{dosage} = 4.98\% \times 2222 = 110.7 \approx 111 \text{ kg/m}^3$$

* Rapport $\frac{\text{Eau brut}}{\text{Ciment}}$: $\frac{E \text{ brut}}{C}$

Soit le cylindre DA 1

Poids de l'eau totale du mélange : 5.31 kg

Poids du ciment mis dans le mélange : 6.95 kg

$$\text{d'où } \frac{E \text{ brut}}{C} = \frac{5.31}{6.95} = 0.76$$

* Rapport $\frac{\text{Eau vrai}}{\text{Ciment}}$: $\frac{E \text{ vrai}}{C}$

Soit toujours le cylindre DA 1

Le poids de l'eau absorbée est : $26.12 \times 4.4\% = 1.15 \text{ kg}$

d'où l'eau de gâchage : E_h

$$E_h = 5.31 - 1.15 = 4.16 \text{ kg}$$

On obtient alors

$$\frac{E}{C} \text{ vrai} = \frac{4.16}{6.95} = 0.60$$

$$* \text{ Humidité } h = \frac{E_h}{\text{Laterite} + \text{sable} + \text{ciment}}$$

Toujours avec le cylindre DA 1

$$E_h = 4.16 \text{ kg}$$

$$\text{Poids de Laterite - ciment - sable} = 33.07 \text{ kg}$$

d'où

$$h = \frac{4.16}{33.07} \times 100\% = 12.6\%$$

$$* \text{ Teneur en eau totale (T.E)} = \frac{E_T}{\text{Laterite} + \text{sable} + \text{ciment}}$$

Cylindre DA 1

Absorption du sable : 1%

Teneur en eau naturelle de la laterite brune : 2.2%

Poids de laterite : 18.28 kg

Poids de sable : 7.84 kg

Poids du ciment : 6.95 kg

On obtient : avec le poids de l'eau ajoutée : 5.31 kg

$$T.E = \frac{5.31}{18.28 + 7.84 + 6.95} + \frac{18.28 \times 2.2\% + 1\% \times 7.84}{18.28 + 7.84 + 6.95}$$

$$T.E = 17.5\%$$

Tableau A-1: Influence de la paille

Identification de l'échantillon	Numero de la référence	% de ciment	Teneur en eau	% de paille	Résistance moyenne (MPa)	Accroissement de résistance
1P _A - 2P _A - 3P _A 4P _A - 5P _A - 6P _A	10	6%	16%	0.5%	1.50	-
1. 2. 3. 4. 5. 6	10	6%	16%	0	2.03	35%

Tableau A-2 : Influence de l'immersion

Identification de l'échantillon	Numero de la référence	% de ciment	Teneur en eau	CURE	Résistance moyenne (MPa)	Accroissement de résistance
J1. J2	11	6%	16%	A	1.66	-
J3	11	6%	16%	B	0.83	-50%
1. 2. 3. 4. 5. 6	10	6%	16%	C	2.03	-
1I. 2I. 3I	10	6%	16%	D	1.41	-30%
4I. 5I. 6I	10	6%	16%	E	2.39	18%

N.B Cure A : 28 jours dans l'air
 Cure B : 28 jours dans l'air puis saturation avant test

Cure C : 28 jours dans l'air
 Cure D : 28 jours dans l'air - 7 jours dans l'eau - 1 jour dans l'air

Cure E : 28 jours dans l'air. 7 jours dans l'eau. 8 jours dans l'air.

Tableau A-3: Influence de l'énergie de compactage

Identification de l'échantillon	N° de la référence	% de ciment	Teneur en eau	% de sable	Pression de compactage (MPa)	Résistance moyenne (MPa)	Accroissement de résistance
1-2	12	6%	-	20	0	0.97	-
5-6	12	6%	-	20	1.5	1.24	27.8%
3-4	12	6%	-	20	3.0	1.75	80%
16-15	12	6%	-	0	0	0.478	-
17	12	6%	-	0	1.5	0.566	18%
20	12	6%	-	0	3.0	1.064	122%

Tableau A-4: Essai de compactage du mélange latérite + sable

% d'eau ajoutée	6	8	10	12	14
$W_T + T$ (g)	9914				
T (g)	5526	5526	5526	5525	5526
W_T	4388	4530	4690	4644	4539
P (g/cm ³)	2.066	2.133	2.208	2.186	2.137
P_d (g/cm ³)	1.906	1.937	1.968	1.913	1.841

Teneur en eau

Capsule n°	1	2	3	4	5
$W_T + T$ (g)	541.28	546.86	653.82	633.21	621.53
$W_S + T$ (g)	503.66	501.69	588.90	560.68	543.07
W_W	37.62	45.17	64.92	72.53	78.46
Tare	55.80	54.50	56.75	53.45	55.73
W_S	447.86	447.19	532.15	507.23	487.34
W%	8.4	10.1	12.2	14.3	16.1

W_T : poids de l'échantillon humide

T: poids de la tare

W_S : poids de l'échantillon sec

W_W : poids de l'eau dans l'échantillon humide

	Dosage au m ³ de béton	Dosage de gâchée	Poids (kg)		Age au test	Affaissement mesuré (mm)	Rapport $\frac{E}{C}$	Résistance (MPa)	Humidité
			10/1/84	14/2/84					
Cylindres maintenus dans la chambre humide pendant 35 jours	Ciment : 360 kg/m ³ Eau : 190 Pierre : 1114 Sable : 600 <u>2264 kg/m³</u>	2.26 1.34 7.43 4.14	-	13.292	39 j	-	0.57	25.7	9.2%
	Ciment : 377 kg/m ³ Eau : 207 Pierre : 1288 Sable : 564.7 <u>2437 kg/m³</u>	2.71 1.49 9.26 4.06	13.940	13.720	38 j	80	0.53	34.3	8.9%
	Ciment : 444 kg/m ³ Eau : 207 Pierre : 1288 Sable : 433 <u>2372 kg/m³</u>	3.18 1.48 9.23 3.10	13.885	13.742	38 j	77	0.45	35.3	9.2%
	Ciment : 377 kg/m ³ Eau : 207.4 Pierre : 1288 Sable : 490.6 <u>2363 kg/m³</u>	2.16 1.19 7.37 3.08	13.805	13.624	38 j	30	0.53	33.1	9%

Tableau A-5 : Résistances en compression
et humidité pour du béton usuel

Absorption gros granulat : 0.3%

Absorption granulat fin : 1%

	1 ciment/2.5 sables (en poids)			1 ciment/3 sables (en poids)			1 ciment/3.5 sables (en poids)		
	$\frac{E}{C} = 0.5$	$\frac{E}{C} = 0.6$	$\frac{E}{C} = 0.7$	$\frac{E}{C} = 0.5$	$\frac{E}{C} = 0.6$	$\frac{E}{C} = 0.7$	$\frac{E}{C} = 0.5$	$\frac{E}{C} = 0.6$	$\frac{E}{C} = 0.7$
Cube 1 (MPa)	18.88	23.60	23.68	18.00	22.64	19.52	13.66	18.20	18.80
Cube 2 (MPa)	19.60	23.60	23.12	18.70	22.56	20.40	14.89	18.95	17.84
Cube 3 (MPa)	19.90	24.40	24.32	17.90	22.56	19.90	12.95	18.82	17.44
Resistance moyenne (MPa)	19.46	23.87	23.71	18.20	22.59	19.94	13.83	18.68	18.03

Tableau A6 : Résistance en compression à 28 jours sur cubes de mortier (ciment + sable de dune)

Tableau A-7: Symboles des paramètres différenciant les échantillons de l'analyse statistique

Symboles	Signification des symboles
A	6% de ciment
B1	0% de ciment
B2	20% de sable
B3	30% de sable
C1	Vibration mécanique
C2	Pilonnage manuel
C3	Pression 1.5 MPa
C4	Pression 3.0 MPa
C5	Pression 3.5 MPa
D1	Séchage au soleil
D2	Séchage à l'ombre
D3	séchage à l'air
D4	séchage dans la chambre humide
E1	3 jours de cure
E2	14 jours de cure
E3	21 jours de cure
E4	28 jours de cure
E5	90 jours de cure
E6	118 jours de cure
F1	28 jours de cure à l'air puis saturation
F2	28 jours à l'air. 7 jours dans l'eau. 1 jour à l'air
F3	28 jours à l'air. 7 jours dans l'eau. 8 jours à l'air
G	0.5% de paille
H1	16% d'eau
H2	19% d'eau
H3	22% d'eau
H4	15.8% d'eau
H5	15.3% d'eau

Tableau A-8 : Caractéristiques des échantillons
utilisés dans l'analyse statistique
pour la latérite rouge

Identification de l'échantillon	Numéro de la référence	Résistance (MPa)	Caractéristiques
1P. 6. 16	10	1.53	A. B1. C2. D2. E4. H1
2P. 6. 16	"	1.59	A. B1. C2. D2. E4. H1
3V. 6. 16	"	2.37	A. B1. C2. D2. E4. H1
1P. 6. 19	"	0.92	A. B1. C2. D2. E4. H2
2P. 6. 19	"	0.88	A. B1. C2. D2. E4. H2
3V. 6. 19	"	1.04	A. B1. C1. D2. E4. H2
1P. 6. 22	"	0.66	A. B1. C2. D3. E4. H3
2P. 6. 22	"	0.67	A. B1. C2. D3. E4. H3
3V. 6. 22	"	0.79	A. B1. C1. D3. E4. H3
3. 6. 16	"	2.08	A. B1. D3. E4. H1
1. 6. 16	"	1.53	A. B1. D3. E4. H1
4. 6. 16	"	2.72	A. B1. D3. E4. H1
2. 6. 16	"	1.69	A. B1. D3. E4. H1
5. 6. 16	"	2.15	A. B1. D3. E4. H1
6. 6. 16	"	2.01	A. B1. D3. E4. H1
1I. 6. 16	"	1.38	A. B1. F2. H1
2I. 6. 16	"	1.45	A. B1. F2. H1
3I. 6. 16	"	1.41	A. B1. F2. H1
4I. 6. 16	"	2.42	A. B1. F3. H1
5I. 6. 16	"	2.09	A. B1. F3. H1
6I. 6. 16	"	2.67	A. B1. F3. H1
1P _A . 6. 16	"	1.19	A. B1. D3. E4. G. H1
2P _A . 6. 16	"	1.66	A. B1. D3. E4. G. H1
3P _A . 6. 16	"	1.34	A. B1. D3. E4. G. H1
4P _A . 6. 16	"	1.73	A. B1. D3. E4. G. H1
5P _A . 6. 16	"	1.39	A. B1. D3. E4. G. H1
6P _A . 6. 16	"	1.69	A. B1. D3. E4. G. H1
1P _A I. 6. 16	"	0.45	A. B1. F2. G. H1
2P _A I. 6. 16	"	0.48	A. B1. F2. G. H1
3P _A I. 6. 16	"	0.69	A. B1. F2. G. H1
5P _A I. 6. 16	"	0.96	A. B1. F3. G. H1
6P _A I. 6. 16	"	0.69	A. B1. F3. G. H1
J ₁	11	1.62	A. B1. D3. E4. H1
J ₂	"	1.70	A. B1. D3. E4. H1
J ₃	"	0.83	A. B1. F1

Tableau A-9: Caractéristiques des échantillons utilisés
dans l'analyse statistique pour la latérite
brune

Identification de l'échantillon	Numéro de la référence	Résistance (MPa)	Caractéristiques
E1	11.	0.702	A-B1-D3-E4.
E2	"	0.860	A-B1-D3-E4
E3	"	0.724	A-B1-D3-E4
E4	"	0.549	A-B1-D3-E4
E5	"	0.600	A-B1-D3-E4
H1	11	1.245	A-B1-D3-E4
H2	"	1.313	A-B1-D3-E4
H3	"	1.596	A-B1-D3-E4
H4	"	1.404	A-B1-D3-E4
E6	"	0.34	A-B1-D3-E6
E7	"	0.418	A-B1-D3-E6
1	12	1.029	A-B2-C2-D3-E3
2	"	0.905	A-B2-C2-D3-E3
3	"	1.811	A-B2-C4-D3-E3
4	"	1.698	A-B2-C4-D3-E3
5	"	1.290	A-B2-C3-D3-E3
6	"	1.188	A-B2-C3-D3-E3
7	"	0.577	A-B2-C3-D3-E3
8	"	0.521	A-B2-C3-D3-E3
9	"	0.532	A-B2-C2-D3-E3
10	"	0.453	A-B2-C2-D3-E3
11	"	0.736	A-B2-C4-D3-E3
12	"	1.120	A-B2-C3-D3-E1
13	"	0.702	A-B2-C4-D3-E3
14	"	0.487	A-B2-C3-D3-E1
15	"	0.532	A-B2-C2-D3-E3
16	"	0.424	A-B2-C2-D3-E3
17	"	0.566	A-B2-C3-D3-E3
18	"	0.300	A-B2-C3-D3-E3
19	"	0.419	A-B2-C5-D3-E3
20	"	1.064	A-B2-C5-D3-E3
21	"	0.549	A-B2-C2-D3-E2
22	"	0.458	A-B2-C2-D3-E2
DA8	phase V	2.51	A-B3-C2-D4-E4-H4
DA9	"	2.26	A-B3-C2-D4-E4-H4
DA10	"	2.44	A-B3-C2-D4-E4-H4
DA14	"	2.04	A-B3-C2-D2-E4-H5
DA15	"	2.13	A-B3-C2-D2-E4-H5
DA16	"	3.96	A-B3-C2-D4-E4-H5
DA17	"	3.35	A-B3-C2-D4-E4-H5

Tableau A-10 : Contrainte - déformation pour
les cylindres DA1. DA2. DA3. DA 4

Taux de chargement : 160 kN/mn

Cylindre DA 1		Cylindre DA2		Cylindre DA3		Cylindre DA 4	
σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$	σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$	σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$	σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$
0.566	3.4	0.283	0	0.283	0	0.283	0
1.415	17	0.849	6.8	0.566	0	0.566	0
2.829	34.2	1.415	15.4	1.132	6.8	1.698	13.7
4.244	51.3	1.981	22.2	2.264	22.2	2.830	27.4
5.659	71.8	2.547	27.4	3.396	35.9	3.962	37.6
7.074	90.6	3.113	34.2	4.527	49.6	5.093	51.3
8.488	109	3.678	42.7	5.659	63.2	6.225	65
9.903	130	4.244	49.6	6.791	78.6	7.357	78.6
11.318	150	4.810	58.1	7.923	94	8.489	92.3
12.732	171	5.376	66.7	9.055	111	9.621	109
14.147	195	5.942	73.5	10.187	130	10.753	130
15.562	220	6.508	83.8	11.319	152	11.884	150
16.976	253	7.074	90.6	12.450	176	13.016	174
17.882	308	7.640	98.5	13.582	219	14.148	208
		8.206	107.7	13.752	260	14.601	250
		8.772	115.6				
		9.338	124.8				
		9.904	135				
		10.470	144.3				
		11.036	155.6				
		11.602	165.8				
		12.168	179.5				
		12.733	193.2				
		13.299	212				
		13.865	241				
		13.922	254.7				

Tableau A-11 : Contrainte - déformation pour les cylindres DA5 - DA6 - DA7 - DA8 - DA9 - DA10

Taux de chargement
 DA5-6-7: 320 kN/mn
 DA8-9-10: 32 kN/mn

Cylindre DA5		Cylindre DA6		Cylindre DA7		Cylindre DA8		Cylindre DA9		Cylindre DA10	
σ (MPa)	$\epsilon \times 10^5$	σ (MPa)	$\epsilon \times 10^5$	σ (MPa)	$\epsilon \times 10^5$	σ (MPa)	$\epsilon \times 10^5$	σ (MPa)	$\epsilon \times 10^5$	σ (MPa)	$\epsilon \times 10^5$
0.113	0	0.113	0	0.113	0	0.226	0	0.113	0	0.113	0
0.566	10.2	0.566	3.4	0.566	20.5	0.340	3.4	0.226	10.3	0.226	0
0.849	17.1	0.849	6.8	0.849	27.4	0.453	5.1	0.340	20.5	0.340	3.4
1.132	20.5	1.132	10.2	1.132	34.2	0.566	6.8	0.453	27.4	0.453	6.8
1.415	27.3	1.415	17	1.415	41	0.679	10.3	0.566	30.8	0.566	10.3
1.698	30.7	1.698	20.5	1.698	48	0.792	17.1	0.679	37.6	0.679	13.7
1.981	37.6	1.981	23.9	1.981	51	0.905	20.5	0.792	41	0.792	17
2.264	41	2.264	27.4	2.264	58	1.019	27.4	0.905	46	0.905	18.8
2.547	47.9	2.547	34.2	2.547	61.5	1.132	32.5	1.019	54.7	1.019	24
2.830	54.7	2.830	37.6	2.830	68	1.245	37.6	1.132	61.5	1.132	27.4
3.113	61.5	3.113	44.4	3.113	78.6	1.358	41	1.245	71.8	1.245	30.8
3.396	71.8	3.396	51.3	3.396	85	1.471	46	1.358	78.6	1.358	34
3.678	82	3.678	58	3.678	92	1.584	51	1.471	89	1.471	41
3.962	89	3.962	65	3.962	99	1.698	58	1.584	99	1.584	44
4.244	99	4.244	75	4.244	109	1.811	65	1.698	109	1.698	51
4.527	116	4.527	82	4.527	116	1.924	71.8	1.811	123	1.811	54.7
4.810	130	4.810	95.7	4.810	130	2.037	78.6	1.924	136.8	1.924	61
5.093	154	5.093	106	5.093	143.6	2.150	89	2.037	164	2.037	72
5.376	185	5.376	123	5.376	161	2.264	103	2.150	242.7	2.150	78.6
5.433	225.6	5.659	147	5.659	188	2.377	120	2.264	263	2.264	92.3
		5.818	198.3	5.772	232	2.490	161			2.377	113
				5.376	273	2.513	208			2.445	143.6

Tableau A-12 : Contrainte - déformation pour
les cylindres DA11- DA12- DA13.

Taux de chargement : 160 kN/mn

Cylindre DA 11		Cylindre DA 12		Cylindre DA 13	
σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$	σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$	σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$
0.283	0	0.283	0	0.283	0
0.566	0	0.566	17.1	0.566	0
1.132	10.3	1.132	34.2	1.132	3.4
2.264	27.4	2.264	51.3	2.264	17.1
3.395	37.6	3.395	65	3.395	27.4
4.527	51.3	4.527	78.6	4.527	41
5.659	65	5.659	92.3	5.659	54.7
6.791	82.1	6.791	109.4	6.791	71.8
7.922	99.1	7.922	126.5	7.922	92.3
9.054	123.1	9.054	147	9.054	116.2
10.186	143.6	10.186	170.9	10.186	140.2
11.318	170.9	11.318	194.9	11.318	170.9
12.449	205.1	12.449	219.1	12.563	229.1
13.411	280.3	13.242	294		

Tableau A-13 : Contrainte-déformation pour
les cylindres DA14-DA15-DA16-DA17

Taux de chargement : DA 14-DA 15 : 32 kN/mn
DA 16-DA 17 : 32 kN/mn

Cylindre DA 14		Cylindre DA 15		Cylindre DA 16		Cylindre DA 17	
σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$	σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$	σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$	σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$
0.113	0	0.113	0	0.113	0	0.113	0
0.226	1.71	0.226	1.7	0.226	0	0.226	0
0.340	5.1	0.340	5.1	0.340	0	0.340	3.4
0.453	8.5	0.453	12	0.453	1.7	0.453	8.6
0.566	11.96	0.566	17.1	0.566	3.4	0.566	12
0.679	15.4	0.679	22.2	0.679	5.1	0.679	15.4
0.792	22.2	0.792	29.1	0.792	6.8	0.792	18.8
0.905	32.5	0.905	34.2	0.905	10.3	0.905	22.2
1.012	42.7	1.102	39.3	1.012	12	1.012	25.6
1.132	56.4	1.132	46	1.132	13.7	1.132	29.1
1.245	66.7	1.245	53	1.245	17.1	1.245	36
1.358	83.8	1.358	63.2	1.358	20.5	1.358	42.7
1.471	100.8	1.471	80.3	1.471	24	1.471	53
1.584	125	1.584	94	1.584	27.4	1.584	63.2
1.698	155.6	1.698	117.9	1.698	30.8	1.698	76.9
1.811	196.6	1.811	148.7	1.811	34.2	1.811	87.2
1.924	258.1	1.924	189.7	1.924	41	1.924	100.8
2.037	391.4	2.037	258.1	2.037	44.4	2.037	111
		2.128	476.9	2.15	44.4	2.150	121.4
				2.264	47.9	2.264	139.5
				2.377	51.3	2.377	148.7
				2.49	58.1	2.49	165.8
				2.603	53.8	2.603	179.5
				2.716	63.2	2.716	193.2
				2.829	68.4	2.829	213.7
				2.943	71.8	2.943	234.2
				3.056	78.6	3.056	254.7
				3.170	112.82	3.169	285.47
				3.284	123.1	3.284	319.7
				3.398	136.8	3.35	364
				3.512	167.5		

Tableau A-14 : Contrainte-déformation pour les
cylindres DA 18. DA 19. DA 20. DA 21

Taux de chargement : 32 kN/mm.

Cylindre DA 18		Cylindre DA 19		Cylindre DA 20		Cylindre DA 21	
σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$	σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$	σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$	σ (MPa)	ϵ $\times 10^5$
0.113	0	0.113	0	0.113	0	0.113	0
0.226	0	0.226	0	0.226	0	0.340	0
0.340	3.4	0.340	3.4	0.340	0	0.566	6.8
0.453	6.8	0.453	6.8	0.679	6.8	0.792	10.3
0.566	10.3	0.566	10.3	0.905	10.3	1.012	17.1
0.679	13.7	0.679	13.7	1.012	13.7	1.245	20.5
0.792	17.1	0.792	20.5	1.132	13.7	1.471	23.9
0.905	20.5	0.905	23.9	1.358	20.5	1.698	27.4
1.012	23.9	1.012	27.4	1.471	20.5	1.811	30.2
1.132	27.4	1.132	27.4	1.584	23.9	2.037	34.2
1.245	30.8	1.245	34.2	1.811	27.4	2.264	41.
1.358	37.6	1.358	41.	2.037	30.8	2.490	47.9
1.471	44.4	1.471	47.9	2.264	34.2	2.716	54.7
1.584	51.3	1.584	54.7	2.490	37.6	2.943	61.5
1.698	61.5	1.698	64.9	2.603	41	3.056	64.9
1.811	71.8	1.811	75.2	2.716	44.4	3.169	68.4
1.924	82.1	1.924	85.5	2.943	47.9	3.282	71.8
2.037	92.3	2.037	95.7	3.056	51.3	3.508	82.
2.150	106	2.150	106	3.282	58.1	3.622	85.5
2.264	120	2.264	119.7	3.508	61.5	3.735	88.9
2.377	133.3	2.377	136.8	3.735	68.4	3.848	95.7
2.490	153.9	2.490	150.4	3.848	75.2	3.961	102.6
2.603	167.5	2.603	174.4	3.961	78.6	4.074	109.4
2.716	191.5	2.716	198.3	4.074	85.5	4.188	116.2
2.829	218.8	2.829	229.1	4.188	92.3	4.300	123.1
2.943	249.6	2.943	273.5	4.301	99.1	4.414	129.9
3.056	290.6	3.056	331.6	4.527	119.7	4.527	136.8
3.169	352.1	3.18	458.1	4.640	129.9	4.640	153.8
3.276	482.1			4.754	160.7	4.754	170.9
				4.765	211.9	4.855	249.6

Tableau A-15: Masse volumique des mélanges

Identification de l'échantillon	Masse volumique humide P (kg/m ³)	Masse volumique à l'état sec P_s (kg/m ³)	$\frac{P_s}{P} \times 100\%$
DA 1	2263	2239	99%
DA 2	2257	2234	99%
DA 3	2255	2236	99%
DA 4	2257	2208	98.8%
DA 5	2234	2209	98.9%
DA 6	2234	2218	98.8%
DA 7	2243	2187	98%
DA 8	2226	2195	98.6%
DA 9	2226	2177	98.3%
DA 10	2215	2236	98.9%
DA 11	2260	2230	98.9%
DA 12	2255	2227	99%
DA 13	2250	2024	90%
DA 14	2248	2003	89%
DA 15	2250	2184	97%
DA 16	2242	2188	97%
DA 17	2242	2027	91%
DA 18	2232	2032	91%
DA 19	2239	2185	98%
DA 20	2230	2178	98%
DA 21	2225		

Exemple de calcul

Masses volumiques humide ρ et sèche ρ_d

* Essai Proctor

Avec 6% d'eau ajoutée

$$\text{on a : } \rho = \frac{W_T}{V} = \frac{4388}{2124} = 2.066 \text{ g/cm}^3$$

La masse volumique sèche est liée à la masse volumique humide par la relation :

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w\%}$$

$$\text{d'où } \rho_d = \frac{2.066}{1 + 8.4\%} = 1.906 \text{ g/cm}^3$$

* Pour les cylindres

Soit le cylindre DA 2

Poids après mélange : 12.187 kg

Poids avant test : 12.093 kg

Volume du cylindre : 0.0054 m³

d'où

$$\text{la masse volumique humide } \rho = \frac{12.187}{0.0054} = 2257 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{la masse volumique à l'état sec } \rho_d = \frac{12.093}{0.0054} = 2239 \text{ kg/m}^3$$

74

Tableau A-16: Essai de densité optimale pour la latérite brune

	Pourcentage de sable			
	20%	30%	40%	50%
Poids moule (g)	5526	5526	5526	5526
Poids moule + latérite (g)	9563.5	9534	9501	9436
Poids latérite	3977.5	4008	3975	3910
Volume moule (cm ³)	2124	2124	2124	2124
Densité (g/cm ³)	1.87	1.89	1.87	1.84

Tableau A-17: Essai de densité optimale pour la latérite Rouge

	Pourcentage de sable				
	16.7%	20%	30%	40%	50%
Poids moule (g)	5526	5526	5526	5526	5526
Poids moule + latérite (g)	9415	9470.4	9524	9456	9454
Poids de latérite (g)	3889	3944.4	3998	3930	3928
Volume du moule (cm ³)	2124	2124	2124	2124	2124
Densité (g/cm ³)	1.83	1.86	1.88	1.85	1.85

Densité pilonnée et densité en vrac

Poids du moule : 5526 g

Volume du moule : 2124 cm³Tableau A-18 : Densité pilonnée et en vrac pour la latérite brune brute

	Densité en vrac		Densité pilonnée	
	Poids moule + latérite (g)	8528.5	8543	9185.5
Poids latérite (g)	3002.5	3017	3659.5	3684
Densité (g/cm ³)	1.41	1.42	1.72	1.73

Tableau : A-19 : Densité pilonnée et en vrac pour la latérite rouge brute

	Densité en vrac		Densité pilonnée	
	Poids moule + latérite (g)	8780.5	8879	9329
Poids latérite (g)	3254.5	3353	3803	3838.5
Densité (g/cm ³)	1.53	1.58	1.79	1.81

76

Tableau A-20 : Teneur en eau naturelle
des latérites brune et rouge

	Latérite rouge		Latérite brune	
	Essai #1	Essai #2	Essai #1	Essai #2
Poids latérite brute + contenant W_T (g)	498.91	560.26	371.07	380.10
Poids latérite sèche + contenant W_S (g)	492.90	553.58	364.53	372.75
Poids de l'eau W_W (g)	6.01	6.68	6.54	7.35
Poids du contenant (g)	55.08	53.66	51.83	55.04
Poids de latérite sèche W_S (g)	437.82	499.92	312.7	317.71
Teneur en eau	1.37%	1.34%	2.09%	2.31%

Teneur en eau naturelle des
latérites rouge et brune

Exemple de calcul

Soit la latérite brune.

Pour l'essai # 2 on a :

- Poids de l'eau à l'état naturel = (Poids de latérite à l'état naturel + contenant) - (Poids de latérite sèche + contenant)

$$W_w = 380.10g - 372.75g = 7.35g$$

- Poids de latérite sèche W_s = (Poids de latérite sèche + contenant) - Poids du contenant. D'où

$$W_s = 372.75g - 55.04g = 317.71g$$

- Teneur en eau de l'échantillon

$$T.E = \frac{W_w}{W_s} \times 100\%$$

$$T.E = \frac{7.35}{317.71} \times 100\% = 2.31\%$$

Tableau A-21: Test d'absorption des latérites rouge et brune

	Poids après tamisage (g)	Poids après lavage (g)	Poids après séchage avant immersion (g)	Poids après immersion (g)	Poids après séchage	Absorption
Latérite Rouge	4125.26	4022	3273.5	3562.5	3221.5	10.6%
	—	3717.5	3669	4034	3632	11%
Latérite brune	—	5939.5	5400.5	5921.5	5388.5	9.89%

Exemple de calcul

Soit la latérite brune

Masse de l'échantillon à l'état SSS : 5921.5 g

Masse de l'échantillon à l'état sec : 5388.5 g

d'où

$$\text{le taux d'absorption} : \frac{5921.5 - 5388.5}{5388.5} = 9.89\%$$

Lissage des courbes

Résistance versus $\frac{E}{C}$ brut

* Fonction exponentielle $y = 41.55 e^{-1.138 x}$

avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.958$

* Fonction puissance $y = 12.88 x^{-1.67}$

avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.956$

De 2.41 à 0.76 pour une valeur de $\frac{E}{C}$ brut donnée
on prend le minimum des 2 valeurs trouvées

Résistance versus $\frac{E}{C}$ vrai

De 1.58 à 0.50

* Fonction exponentielle $y = 48.06 e^{-1.74 x}$

avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.958$

* Fonction puissance $y = 7.46 x^{-1.85}$

avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.962$

Pour une valeur donnée de $\frac{E}{C}$ vrai, on prend le minimum des 2 valeurs trouvées

Tableau A-22: Analyse granulométrique des latérites brune et rouge

Latérite brune (Tamisage)
Fraction utilisée : 7029 g

Tamis N°	Diamètre (mm)	Poids Retenu (g)	% Retenu	% Passant
1.5	38.1	654	9.3	90.7
1	25.4	1428	29.6	70.4
3/4	19.1	539	37.3	62.7
3/8	9.52	1560.5	59.5	40.5
4	4.76	1421	79.7	20.3
10	2.00	739	90.2	9.8
20	0.84	189	92.9	7.1
40	0.42	127.5	94.7	5.3
60	0.250	110	96.3	3.7
140	0.105	130	98.1	1.9
200	0.074	48	98.8	1.2

Latérite rouge (Tamisage)
Fraction utilisée : 10 000 g

Tamis N°	Diamètre (mm)	Poids Retenu	% Retenu	% Passant
1.5	38.1	0	0	100
1	25.4	0	0	100
3/4	19.1	233.75	2.34	97.66
3/8	9.52	1872.05	21.06	78.94
4	4.76	2572.81	46.79	53.21
10	2.00	2116.62	67.96	32.04
20	0.84	862.84	76.59	23.41
40	0.42	569.65	82.29	17.71
60	0.250	420.17	86.49	13.51
140	0.105	710.61	93.60	6.40
200	0.074	237.13	95.97	4.03

Tableau A-23 Analyse granulométrique
du sable de dune

	Tamis N°	Diamètre (mm)	Poids Retenu (g)	Poids Retenu cumulatif (g)	% cumm latif Retenu	% passant
Sable de dune (Tamisage) Fraction utilisée : 300g	4	4.76	0	0	0	100
	8	2.36	0	0	0	100
	15	1.18	0	0	0	100
	30	0.60	1.36	1.36	0.005	99.5
	50	0.30	48.47	49.83	0.176	83.4
	100	0.150	140.21	190.04	0.673	36.6
	200	0.074	92.24	282.28	1	5.9

Calcul du module de finesse M.F

$$M.F = \frac{0.005 + 0.176 + 0.673}{100} \times 100 = 0.85$$

Tableau A-24

Pourcentage d'essais inférieurs
à la résistance spécifiée lorsque
la moyenne dépasse la résistance
spécifiée - f_s

Résistance moyenne \bar{X}	% d'essais inférieurs à f_s	Résistance moyenne \bar{X}	% d'essais inférieurs à f_s
$f_s' + 0,10\sigma$	46,0	$f_s' + 1,6\sigma$	5,5
$f_s' + 0,20\sigma$	42,1	$f_s' + 1,7\sigma$	4,5
$f_s' + 0,30\sigma$	38,2	$f_s' + 1,8\sigma$	3,6
$f_s' + 0,40\sigma$	34,5	$f_s' + 1,9\sigma$	2,9
$f_s' + 0,50\sigma$	30,9	$f_s' + 2,0\sigma$	2,3
$f_s' + 0,60\sigma$	27,4	$f_s' + 2,1\sigma$	1,8
$f_s' + 0,70\sigma$	24,2	$f_s' + 2,2\sigma$	1,4
$f_s' + 0,80\sigma$	21,2	$f_s' + 2,3\sigma$	1,1
$f_s' + 0,90\sigma$	18,4	$f_s' + 2,4\sigma$	0,8
$f_s' + \sigma$	15,9	$f_s' + 2,5\sigma$	0,6
$f_s' + 1,10\sigma$	13,6	$f_s' + 2,6\sigma$	0,45
$f_s' + 1,20\sigma$	11,5	$f_s' + 2,7\sigma$	0,35
$f_s' + 1,30\sigma$	9,7	$f_s' + 2,8\sigma$	0,25
$f_s' + 1,40\sigma$	8,1	$f_s' + 2,9\sigma$	0,19
$f_s' + 1,50\sigma$	6,7	$f_s' + 3,0\sigma$	0,13

Exemple de calcul

Soit la laterite rouge - Nombre d'échantillons: 35

La moyenne est $\bar{X} = 1.443 \text{ MPa}$

et l'écart-type $\sigma = 0.612 \text{ MPa}$

On calcule la variation $V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\% = \frac{0.612}{1.443} \times 100\% = 42.4\%$

et $t = \frac{\bar{X} - f_s}{\bar{X} V} = \frac{1.443 - f_s}{1.443 \times 42.4\%}$

Pour une résistance spécifiée $f_s = 0.5 \text{ MPa}$, on trouve

$$t = \frac{1.443 - 0.5}{1.443 \times 42.4\%} = 1.541$$

On trouve à partir du tableau A-24 la pourcentage d'essais inférieurs à f_s soit : 6.2%

d'où la probabilité : $100\% - 6.2\% = 93.8\%$

Bibliographie

1. GRESILLON Jean Michel Etude sur la stabilisation et la compression des terres pour leur utilisation dans la construction Annales de l'Institut Technique du Bâtiment; et des Travaux Publics N°49 Mai 1976
2. ADAUA SOGOGIM Rapport technique sur les études des matériaux locaux, Novembre 1977
3. GALDI Pascal L'habitat Rural au Sénégal Ministère de l'Enseignement supérieur
- 4 - UNESCO Vers une meilleure utilisation des ressources locales en construction - Centre de formation agricole à Nianning Senegal 1978
5. DREYFUS, C.E.R.E.Q Note sur l'utilisation de la terre stabilisée dans la construction - Ministère des Travaux Publics, de l'Urbanisme et des Transports (Sénégal)
6. LE CRATERRE Construire en terre Editions alternative et parallèle.
7. LBTP . Côte d'Ivoire Recommandations pour la conception et l'exécution de bâtiments économiques en géobéton
8. AITCIN Pierre Claude . JOLICOEUR Guy . POULIN Claude Essais et Contrôle des bétons Faculté des Sciences appliquées Université de Sherbrooke
9. THIAM El-hadj . DIAGNE Mamadou Latérite matériau de construction phase I . E.P.T 1980
10. SOUMA Gérard - DIAKITE Oumar Latérite matériau de construction phase II E.P.T Mai 1981

84

11. FALL Chaikh . GUETTE Ibrahima - A

Laterite matériau de construction phase III - E.P.T

Juin 1982

12. DIALLO Antoine J.M - GUEYE Mamadou

Laterite matériau de construction phase IV - E.P.T

Mai 1983

13. NORME ACNOR CAN 3 - A 23-2 . M 77 - 12 A

Essais concernant le béton