



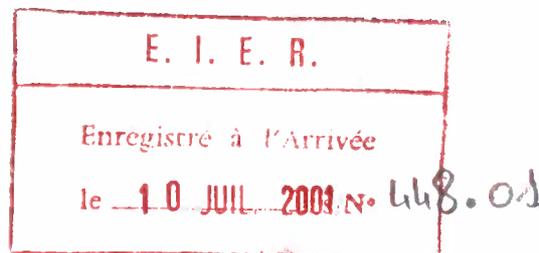
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES 2001

Présenté par :

SEBABE Sayibou

Adaptation des paramètres empiriques de la méthode de DREUX-GORISSE aux matériaux usuels de construction au BURKINA FASO

MENTION :



Encadrement
A. CISS

SOMMAIRE

<i>DEDICACE</i>	4
<i>REMERCIEMENT</i>	5
LISTE DES TABLEAUX.....	6
LISTE DES FIGURES.....	7
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	8
LISTE DES NOTATIONS.....	8
RESUME.....	9
INTRODUCTION	10
Chapitre I PRESENTATION DE LA METHODE DE DREUX.GORISSE	12
I-1- PRINCIPE DE LA METHODE.....	13
I-2- DETAIL DES PRINCIPALES ETAPES DE LA METHODE.....	13
I-2-1- Données de base.....	13
I-2-2- Tracé des courbes granulaires.....	15
I-2-3- Détermination du dosage en eau et en ciment.....	15
I-2-4- Tracé de la courbe de référence.....	16
I-2-5- Détermination des proportions en volume absolu des granulats.....	18
I-2-6- Détermination du coefficient de compacité du béton et calcul de la composition théorique.....	18
I-2-7- Gâchée expérimentale.....	20
I-2-8- Récapitulation des coefficients et abaques de la méthode de D.G.....	21
Chapitre II : LES CONSTITUANTS DU BETON AU BURKINA FASO	22
II-1 LES GRANULATS.....	23
II-1-1- Les sables.....	23
II-1-2- Les gravillons.....	23
II-1-3- Les caractéristiques des granulats utilisés.....	24
II-2- LES CIMENTS.....	32
II-2-1 Détermination de la masse volumique apparente.....	32
II-2-2 Détermination de la masse volumique absolue.....	33
II-2-3 Mesure de la surface spécifique.....	33
II-2-4 L'essai de consistance.....	34

II-2-5 L'essai de prise	34
II-2-6 L'essai d'expansion sur pâte pure	35
II-2-7 Les essais mécaniques	35
Chapitre III LA CONDUITE DE L'ETUDE ET LES RESULTATS OBTENUS	37
III-1 PRINCIPE DE L'ETUDE	38
III-2 LES RESULTATS ATTENDUS	38
III-3 LE CHOIX DES GRANULATS	39
III-3-1 Le sable	39
III-3-2 Le gravier	39
III-4 DETERMINATION DE LA COMPOSITION DU BETON	40
III-4-1 Les hypothèses de calcul	40
III-4-2 Dosage des différents composants	40
III-5 MODE DE FABRICATION ET DE MISE EN ŒUVRE DU BETON POUR LA CONFECTION DES EPROUVETTES	42
III-5-1 Matériel utilisé	42
III-5-2 Mode de fabrication du béton	42
III-6 LES TESTS REALISES SUR LE BETON	43
III-6-1 Mesure de la teneur en eau du béton frais	43
III-6-2 Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams	43
III-6-3 Mesure du poids volumique du béton frais	43
III-6-4 Les essais de compression	43
III-6-5 Les essais sclérométriques	48
III-7 DETERMINATION DU COEFFICIENT DE COMPACTE	53
III-7-1 Définition et procédé	53
III-7-2 L'analyse des résultats	54
III-8 RELATION ENTRE LE DOSAGE EN CIMENT, LE DOSAGE EN EAU ET L'AFFAISSEMENT AU CONE D'ABRAMS	61
III-9 LE COEFFICIENT GRANULAIRE ET LA FORMULE DE BOLOMEY	65
III-10 ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON EN FONCTION DE L'AGE	69
III-10-1 Observation générale	69
III-10-2 L'influence du dosage en eau et en ciment	72
III-10-3 L'influence de la dimension maximale du granulat	72
III-11 COMPARAISON DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION AU SCLEROMETRE ET A L'ECRASEMENT	75

III- 12 RECAPITULATION DES RESULTATS OBTENUS POUR L'ADAPTATION DE LA METHODE DE DREUX-GORISSE	77
III-12-1 Les matériaux utilisés	77
III-12-2 Les résultats obtenus	77
III-13 COMPARAISON DE LA METHODE DE DREUX-GORISSE ET LA METHODE ADAPTEE	79
III-13-1 L'abaque de détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport $\frac{C}{E}$	79
III-13-2 Les autres éléments de comparaison	81
III-14 AUTRE METHODE DE COMPOSITION DU BETON : L'UTILISATION DES MOINDRES CARRES	82
III-14-1 Objet	82
III-14-2 Principe	82
III-14-3- l'intérêt de la méthode	83
III-14-4 Exemple pratique	83
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	85
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	88
ANNEXES	89
II-1 Courbes granulométriques du sable fin et du sable peu grossier	90
II-2 Composition de béton 0/20 par la méthode de D.G	91
II-3 Composition de béton 0/25 par la méthode de D.G	92
II-4 Détermination du type granulaire	93
III-1 Valeurs des indices sclérométriques enregistrés	94
III-2 Abaque du scléromètre permettant la déterminer la résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique	100

DEDICACE

« « « « « « « « « «

- **A l'Éternel**

Force de la vie, en dehors de toi aucune réussite n'est possible.

- **A mes parents Adam SEBABE et Adjia Alima SEBABE**

« IN MEMORIUM »

*Votre courage et votre dévouement pour la famille sont pour moi un exemple.
Ce travail est le fruit de votre éducation.*

- **A mes frères et sœurs**

Qu'Allah nous unisse plus.

- **A mon épouse Zeïna SEBABE, née KORIKO :**

Grâce à ton soutien et ton courage pour supporter la solitude pendant les trois années d'absence, j'ai pu terminer ma formation. Ce travail est le tien et je te réitère encore mon amour et ma tendresse.

- **A mes beaux-parents**

Reconnaissance profonde.

- **A mon enfant Zayd SEBABE**

Qu'Allah te garde et te guide dans la bonne voie.

REMERCIEMENT

« « « « « « « « « « « « « « « «

Au terme de notre formation, nous tenons à remercier :

- *Monsieur **Abibou CISS** : Maître du projet, pour son assistance éclairée, sa disponibilité et sa rigueur dans la réalisation de cette étude.*
- *A la Direction et le corps enseignant de l'EIER pour nous avoir assuré une bonne formation.*
- *A tout le personnel du service technique, surtout Messieurs **DRAGO Issa** et **BANCE Yacouba** du laboratoire de mécanique des sols de l'EIER pour leur collaboration.*
- *Le Directeur Général du Laboratoire National des Bâtiments et des Travaux Publics (LNBTP) de Ouagadougou pour avoir mis son service à notre disposition.*
- *Monsieur **TRAORE Issiaka** et son équipe du LNBTP de Ouagadougou pour leur disponibilité et le soin des travaux qui relèvent de leur domaine.*
- *Le Directeur Général des T.P. Lomé pour avoir accepté nous mettre en position de stage afin de terminer notre formation d'ingénieur.*
- *Mes collègues de la 30^e promotion de l'EIER pour l'ambiance et l'esprit du groupe qui a régné durant la formation.*
- *Tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.*

LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre
I	Evaluation approximative de D dimension maximale (tamis) des granulats en fonction des caractéristiques de la pièce à bétonner.
II	Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement.
III	Valeurs approximatives du coefficient granulaire G
IV	Correction du dosage en eau en fonction de la dimension maximale du granulat (si $D \neq 25$ mm)
V	Valeur du terme correcteur K
VI	Valeur du coefficient de compacité γ
VII	Récapitulation des coefficients et abaques de la méthode de D.G
VIII	Analyse granulométrique
IX	Détermination du type granulaire
X	Type granulaire des matériaux utilisés
XI	Equivalent de sable
XII	Nombre de coups de masse pour chaque classe granulaire
XIII	Caractéristiques des granulats
XIV	Résultat des essais sur le ciment
XV	Récapitulatif de la composition de béton par la méthode de D.G pour la confection des éprouvettes
XVI	Teneur en eau et poids volumique du béton frais
XVII	Résultat des essais d'écrasement
XVIII	Valeur de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du dosage en ciment, de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams
XVIIIbis	Détermination de la résistance à la compression à 7 jours (R'7) au scléromètre
XIX	Résistance à la compression au scléromètre en fonction de l'âge du béton et de l'affaissement au cône d'Abrams
XX	Valeur du dosage en eau réel en fonction de l'affaissement et du dosage en ciment
XXI	Valeur du coefficient de compacité en fonction de l'affaissement et du dosage en ciment.
XXII	Variation de la compacité en fonction du dosage en ciment et de la consistance du béton.
XXIII	Valeur du coefficient de compacité
XXIV	Résistance à la compression du béton en fonction de l'âge (issue des essais sclérométriques)
XXV	Résistance à la compression à 28 jours au scléromètre et au

test d'écrasement en fonction du dosage en ciment, du rapport C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

XXVI Comparaison de l'abaque de D.G et l'abaque adapté pour la détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport C/E

XXVII Comparaison des coefficients et formules de D.G avec les résultats obtenus

XXVIII Détermination de la composition de béton par l'application de la méthode des moindres carrés

LISTE DES FIGURES

N°	Titre
1	Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône) d'après G. DREUX
2	Courbe de compacité en fonction de l'affaissement et du dosage en ciment (béton 0/25)
3	Courbe de compacité en fonction de l'affaissement et du dosage en ciment (béton 0/20)
4	Ajustement pour la détermination de l'abaque de dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport C/E
5	Abaque de détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport C/E (adapté aux matériaux du Burkina Faso)
6	Résistance à la compression en fonction de C/E : Béton 0/20
7	Résistance à la compression en fonction de C/E : Béton 0/25
8	Résistance à la compression en fonction de l'âge : exemple du béton 0/25
9	Résistance à la compression du béton en fonction de l'âge et du dosage en ciment
10	Influence de la résistance maximale du granulat sur la résistance à la compression
11	Comparaison de la résistance à la compression à 28 jours au scléromètre et aux tests d'écrasement : exemple du béton 0/20.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

D.G. :	D.G
Mf :	Module de finesse
ES :	Equivalent de Sable
LNBTB :	Laboratoire National des Bâtiments et des Travaux Publics

LISTE DES NOTATIONS

Symbole	Désignation	Unité S.I.
R'28	Résistance à la compression à 28 jours	Pa
R'14	Résistance à la compression à 14 jours	Pa
R'7	Résistance à la compression à 7 jours	Pa
G	Coefficient Granulaire	Sans unité
σ_c	Classe vraie du ciment	Pa
C	Dosage en Ciment	Kg/m ³
E	Dosage en Eau	l/m ³
γ	Coefficient de compacité	sans unité
A	Affaissement au cône d'Abrams	m
D	Dimension maximale des granulats	m
Ma	Moyenne arithmétique	sans unité
S	Ecart type	sans unité
V	Coefficient de variation	sans unité
R	Coefficient de corrélation	sans unité

RESUME

La méthode de composition de béton de D.G est basée sur l'utilisation d'abaques de calcul et de la formule de Bolomey qui font intervenir des coefficients empiriques. La base de cette méthode résulte de nombreuses expériences avec des matériaux de construction disponibles en France. Ces matériaux n'ayant pas les mêmes caractéristiques que ceux du Burkina Faso, il faut donc déterminer les abaques et coefficients empiriques applicables localement tout en respectant la méthodologie de D.G.

A l'issue de cette étude, les caractéristiques de quelques composants du béton couramment utilisés ont été obtenues.

Des adaptations de la méthode au contexte du Burkina Faso sont proposées ; certaines peuvent présenter un intérêt plus général.

Nous nous sommes appesantis à déterminer les coefficients granulaires, la compacité et sa variation en fonction de la consistance du béton, de la dimension maximale des granulats et du dosage en ciment.

Nos expériences ont aussi vérifié les affirmations de M. G. DREUX concernant l'influence de la dimension maximale des granulats, du dosage en eau et du ciment sur la résistance et l'ouvrabilité du béton.

Les adaptations proposées permettront d'avoir une meilleure adéquation des coefficients et abaques de la composition du béton avec les caractéristiques des matériaux usuels de construction au Burkina Faso et d'améliorer les résultats de la méthode de D.G.

Nous estimons nécessaire de poursuivre cette étude avec d'autres matériaux usuels de construction pour avoir des résultats plus représentatifs.

Mots clés :

Dreux-Gorisse, Burkina Faso, Bolomey, Abrams, Ciment, Sable, Gravier, Eau, Béton, Affaissement, Coefficient de compacité, Coefficient granulaire, Classe vraie du ciment.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Depuis la nuit des temps, l'homme a construit avec des matériaux locaux disponibles ; mais les performances de ces matériaux sont restées limitées compte tenu du faible niveau de la technologie de l'époque.

L'activité de la construction s'est développée au fil des années pour aboutir à un niveau nécessitant l'amélioration des qualités des matériaux de construction. Pour satisfaire à ce besoin, l'homme a pensé confectionner un matériau artificiel homogène composé de matériaux naturels. Ce matériau artificiel est appelé béton. Sa composition fut étudiée pour la première fois en 1737 par l'ingénieur Belidor.

Aujourd'hui, cette évolution s'accompagne de textes réglementaires et normatifs en vigueur mais aussi en perpétuelle adaptation auxquels les bâtisseurs sont assujettis.

S'il est vrai que les techniques de construction connaissent un essor remarquable dans les pays industrialisés, il n'en demeure pas moins dans les pays en développement où les partenaires de la construction doivent éviter la transposition entière des techniques de construction occidentales mais leurs adaptations au contexte du milieu.

Au Burkina Faso, le béton est le matériau artificiel le plus utilisé dans le secteur de construction en génie civil. La détermination de sa composition nécessite des améliorations compte tenu de l'inadéquation des méthodes avec les caractéristiques des matériaux usuels de construction du pays. La méthode de D.G. ne fait pas exception malgré son emploi courant parce qu'applicable aisément par un personnel de niveau de qualification moyen.

Cette méthode s'appuie sur des paramètres empiriques qui ont été déterminés expérimentalement avec les matériaux disponibles en France. Ces matériaux n'ayant pas les mêmes caractéristiques avec les matériaux du Burkina Faso, il est nécessaire de rechercher de nouveaux abaques et coefficients empiriques applicables localement, tout en respectant la méthode de D.G.

Pour atteindre cet objectif, nous adoptons la méthodologie suivante :

- En premier lieu, nous présenterons la méthode de D.G. qui nous conduira à l'établissement de la liste des abaques et coefficients utilisés.
- Le second chapitre portera sur les constituants du béton au Burkina Faso. Il s'agit de déterminer les caractéristiques de quelques matériaux couramment utilisés pour la formulation de béton.
- Le troisième chapitre présentera la conduite de l'étude et les résultats obtenus.
- Nous terminerons par des recommandations pour améliorer encore les résultats de la méthode de D.G.

Chapitre I PRESENTATION DE LA METHODE DE DREUX.GORISSE

I- PRESENTATION DE LA METHODE DE DREUX-GORISSE

I-1- PRINCIPE DE LA METHODE

La méthode de D.G. est une méthode expérimentale conçue à partir des résultats d'une enquête ayant porté sur plusieurs centaines d'études de béton.

La synthèse des résultats de cette enquête, complétée par des recherches effectuées au Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP), a conduit les auteurs à mettre au point une méthode de composition des bétons simplifiée exposée par M. Dreux dans son ouvrage « nouveau guide du béton ». L'établissement d'une composition de béton par la méthode de D.G comprend les étapes suivantes :

Tracé des courbes granulaires ;

Détermination des dosages en ciment et en eau ;

Tracé de la courbe de référence du béton ;

Détermination des proportions des granulats ;

Détermination du facteur de compacité du béton et calcul de la composition théorique ;

Réalisation d'une gâchée expérimentale et ajustement éventuel de la composition théorique.

I-2- DETAIL DES PRINCIPALES ETAPES DE LA METHODE

I-2-1- Données de base

I-2-1-1- Dimension maximale des granulats

La dimension maximale des granulats est importante dans la composition du béton car nous ne devons pas perdre de vue qu'un béton tire du granulat une bonne part de sa résistance et plus particulièrement du gros granulat. De plus, le dosage en ciment est d'autant moins élevé que les grains sont plus gros. Nous voyons donc l'intérêt de l'emploi des granulats de qualité et de dimension D suffisante, celle-ci devant rester compatible avec une bonne facilité de mise en œuvre. Mais, la dimension D du granulat se trouve limitée par différentes considérations concernant l'ouvrage à bétonner : épaisseur de la pièce, espacement des armatures, densité du ferrailage, complexité du coffrage, possibilité et efficacité du serrage à la mise en œuvre, risque de ségrégation etc...

L'évaluation approximative de D (exprimée en mailles de tamis) des granulats en fonction des caractéristiques de la pièce à bétonner est consignée dans le tableau I ci-après :

Tableau I : Evaluation approximative de D dimension maximale (tamis) des granulats en fonction des caractéristiques de la pièce à bétonner :

Caractéristiques de la pièce à bétonner	Granulats D (tamis)	
	Roulés	Concassés
E espacement horizontal entre les armatures.....	$D \leq 0,8 e$	$D \leq 0,7 e$
H espacement vertical entre les armatures.....	$D \leq h$	$D \leq 0,9 h$
R rayon moyen des mailles de ferrailage.....	$D \leq 1,4 r$	$D \leq 1,3 r$
R rayon moyen de moule.....	$D \leq R$	$D \leq 0,9 R$
Hm épaisseur minimale.....	$D \leq hm/5$	

I-2-1-2- Résistance souhaitée

Elle est en général définie par la résistance en compression sur cylindre à 28 jours. C'est elle qui nous conduit directement vers le choix du dosage approximatif en ciment dont nous devons connaître la classe vraie σ_c' sur laquelle nous pouvons compter en moyenne.

En général, les projets imposent la résistance nominale σ_n' en compression à 28 jours et compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique, on adopte une marge de sécurité de 15%. On vise alors une résistance moyenne à 28 jours égale à :

$$R'_{28} \approx 1,15 \sigma_c'$$

I-2-1-3- Consistance désirée

Elle se définit en général par la plasticité désirée mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams. La mesure de l'affaissement au cône d'Abrams ne nécessite qu'un moule en tôle tronconique ($D = 20 \text{ cm}$, $d = 10 \text{ cm}$, $h = 30 \text{ cm}$).

L'opération consiste en un remplissage du moule par du béton ; le remplissage s'exécute en quatre couches tassées par une tige d'acier pointue de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche ; on soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement.

Ces mesures caractérisent la consistance d'un béton et permettent le classement approximatif indiqué au tableau II ci-après :

Tableau II : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône :

Affaissement A en cm	Plasticité	Mise en œuvre
0 à 2	Béton très ferme	Vibration puissante
3 à 5	Béton ferme	Bonne vibration
6 à 9	Béton plastique	Vibration courante
10 à 13	Béton mou	Piquage
≥ 14	Béton liquide	Léger piquage

I-2-2- Tracé des courbes granulaires

Il s'effectue sur un graphique normalisé AFNOR comprenant en abscisses une graduation logarithmique et en ordonnées les tamisats en pourcentage .

I-2-3- Détermination du dosage en eau et en ciment

Il s'agit tout d'abord d'évaluer le rapport $\frac{C}{E}$ en fonction de la résistance moyenne en compression désirée, on utilise pour cela la formule de Bolomey.

$$R'_{28} = G \cdot \sigma'_c \cdot \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

avec

- R'_{28} résistance moyenne en compression désirée à 28 jours en bars
- σ'_c classe vraie du ciment à 28 jours en bars
- C dosage en ciment en kg/m^3
- E dosage en eau totale sur matériaux secs en l/m^3
- G coefficient granulaire (compris entre 0,35 et 0.65) à prendre dans le

Tableau III en fonction de la qualité estimée a priori des granulats et de leurs dimensions.

Tableau III : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins ($D \leq 16$ mm)	Moyens ($25 \leq D \leq 40$ mm)	Gros ($D \geq 63$ mm)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Le coefficient 0,5 de la formule de Bolomey est susceptible de varier selon la nature du matériau et des ajustements des résultats issus des expériences.

A partir de la valeur de $\frac{C}{E}$ ainsi calculée l'abaque de la figure 1, permet en fonction de l'affaissement au cône désiré, d'obtenir le dosage en ciment nécessaire. La connaissance de C permet de déterminer E puisque $\frac{C}{E}$ est connu.

La valeur de E est ensuite éventuellement ajustée en fonction de D dimension du plus gros granulat grâce à un tableau de correction présenté comme suit :

Tableau IV : Correction du dosage en eau en fonction de la dimension maximale du granulat (si D ≠ 25 mm)

Dimension maximale des granulats D en mm	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau (en %)	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

1-2-4- Tracé de la courbe de référence

La courbe de référence est tracée sur le graphique des courbes granulaires. Cette courbe de référence est dénommée OAB (voir l'exemple à annexe III-2) :

le point B correspond :

☞ en abscisse à la dimension D du plus gros granulat

☞ en ordonnée 100% de tamisat

le point A ,appelé point de brisure a pour coordonnées :

☞ en abscisse

si $D \leq 20$ mm l'abscisse est $\frac{D}{2}$,

si $D \geq 20$ mm l'abscisse est située au milieu du « segment gravier » limité par le module 38 (5mm) et le module correspondant à D.

☞ en ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_S + K_P$$

K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats. Les valeurs de K sont consignées dans le tableau V ci-dessous :

Figure 1 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée. (affaissement au cône). D'après G. DREUX

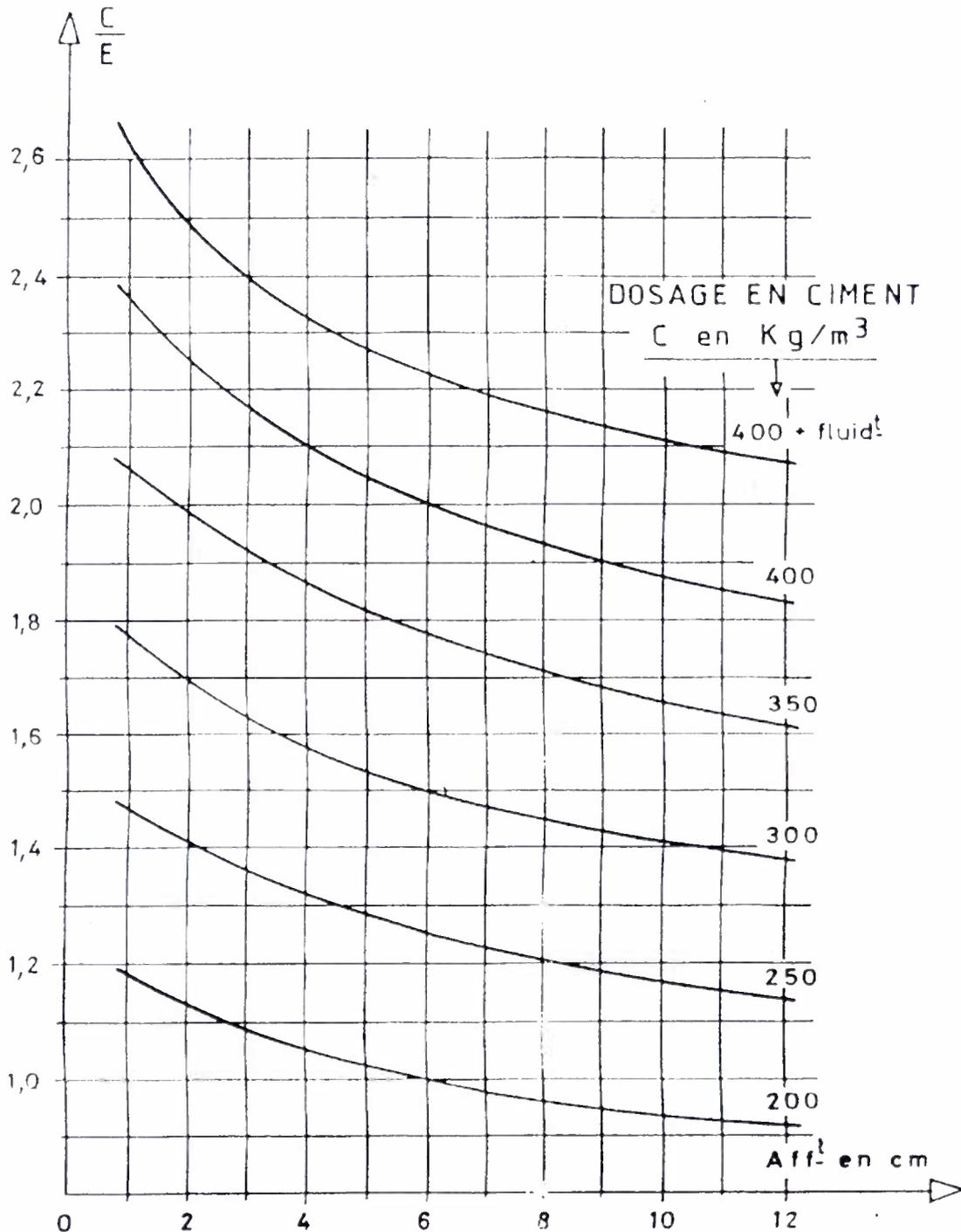


Tableau V : Valeur du terme correcteur K

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Forme des granulats (du sable en particulier)							
Dosage en ciment	400+ fluid ⁱ	-2	0	-4	-4	-6	-4
	400	0	+2	-2	-2	-4	-2
	350	+2	+4	0	0	-2	0
	300	+4	+6	+2	+2	0	+2
	250	+6	+8	+4	+4	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+6	+4	+6

K_s est une correction liée au module de finesse (Mf) du sable. Elle est calculée par l'expression :

$$K_s = 6.Mf - 15 .$$

K_p est une correction supplémentaire sur les bétons pompés. Elle est comprise entre +5 et +10 et vise à enrichir le mélange en sable (selon le degré de plasticité désiré).

I-2-5- Détermination des proportions en volume absolu des granulats

Sur le graphique des courbes granulaires, on trace les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point de 5% de la courbe granulaire du suivant, et ainsi de suite.

On lit alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats.

I-2-6- Détermination du coefficient de compacité du béton et calcul de la composition théorique

Le coefficient de compacité γ du béton représente le rapport du volume des matières solides (granulats + ciment) au volume total du béton vibré.

Il est déterminé par lecture directe dans le tableau ci-après en fonction des facteurs suivants : la consistance du béton, le serrage et la dimension D du plus gros granulats.

Tableau VI : valeurs du coefficient de compacité γ

Consistance	Serrage	Coefficient de compacité γ						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	Vib. faib.	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	Vib. norm.	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vib. faib.	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Vib. norm.	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	Vibrat. Puis.	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	Vib. faib.	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	Vib. norm.	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	Vibrat. Puis.	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855

Des corrections sont prévues qui font intervenir la forme des granulats et le dosage en ciment C :

- sable roulé gravier concassé : -0.010
- sable et gravier concassé : -0.030
- dosage en ciment différent de 350 kg/m³ : $\frac{C-350}{5000}$

La composition théorique est ensuite établie de la façon suivante :

Soit r_s , r_g les proportions de sable et de gravier de masses spécifiques respectives ω_s et ω_g

Volume absolu des granulats :

$$V = 1000 \cdot \gamma - \frac{C}{\omega_c} \text{ avec } \omega_c \text{ la masse spécifique de ciment.}$$

Masses respectives des différents granulats :

$$\text{Sable : } P_s = r_s \cdot V \cdot \omega_s$$

$$\text{Gravier : } P_g = r_g \cdot V \cdot \omega_g$$

Masse totale des granulats :

$$G = P_s + P_g$$

Densité théorique du béton frais vibré :

$$d_o = \frac{G+C+E}{1000}$$

I-2-7- Gâchée expérimentale

D'une façon générale, cette gâchée permet de vérifier les hypothèses prises en compte pour le calcul de la composition théorique, et d'apporter au béton les corrections nécessaires en fonction des qualités à obtenir :

- résistance mécanique ;
- ouvrabilité ;
- absence de ségrégation ;
- aspect etc...

Sur cette gâchée, on procède à la détermination de la densité « d » du béton frais.

Si « d » est différente de d_0 , il faut ajuster au mètre cube la composition de béton, en enlevant ou en ajoutant des granulats.

La correction à apporter sur la masse totale de granulat G est en valeur algébrique :

$$\Delta = 1000(d-d_0)$$

Les corrections sur les masses de divers granulats sont alors :

Pour le sable: $r_s \Delta$

Pour le gravier : $r_g \Delta$

I-2-8- Récapitulation des coefficients et abaques de la méthode de D.G.

Tableau VII

Désignation des coefficients	Symbole	Principal domaine d'utilisation
1- Coefficients granulaires	G	Dans la formule de Bolomey
Classe vraie du ciment	σ_c'	Dans la formule de Bolomey
Le scalaire 0,5 de la formule de Bolomey	néant	Dans la formule de Bolomey
Coefficients de compacité	γ	Pour la détermination des dosages des granulats
Indices de ségrégation	I	Influence de la consistance du béton sur la ségrégation.
5- Coefficients correctifs en fonction de C, serrage, forme granulats	K	Calcul de l'ordonnée du point de brisure de la courbe de référence
Coefficients correctifs à appliquer selon le module de finesse des sables.	Ks	Calcul de l'ordonnée du point de brisure de la courbe de référence
Coefficients correctifs sur les bétons pompés	Kp	Calcul de l'ordonnée du point de brisure de la courbe de référence
Coefficients Correctifs du dosage en E en fonction de D (dim. Max granulats)	Néant	Obtenir le dosage en eau.
Abaque donnant pour chaque dosage en C, l'évolution de l'affaissement en fonction de C/E		Obtenir le dosage en ciment

Chapitre II : LES CONSTITUANTS DU BETON AU BURKINA FASO

II LES CONSTITANTS DU BETON AU BURKINA FASO

II-1 LES GRANULATS

II-1-1- Les sables

Les sables utilisés au Burkina Faso peuvent être classés en trois grandes familles en tenant compte de leur nature et de leur origine.

II-1-1-1- Le sable de rivière

C'est un matériau roulé qui est exploité dans le lit de certaines rivières. Il se présente sur le lit sous forme de gisements localisés. Ce sable est généralement bien gradué et contient peu d'impureté.

II-1-1-2- Le sable d'emprunt

Ces sables sont utilisés lorsqu'il n'existe pas de sable de rivière. Ce sont des sables qui proviennent d'emprunt plus ou moins argileux. Avant lavage, l'équivalent du sable (ES) est faible. Les exploitations sont généralement artisanales. Le lavage du sable n'est effectué que lorsque l'importance du chantier nécessite la confection d'un béton de qualité.

II-1-1-3 Le sable de concassage

Lorsqu'il n'existe pas à proximité d'un chantier l'un des sables cités ci-dessus, on a parfois recours au sable de granite concassé. Son utilisation est relativement peu fréquente car son coût est élevé.

Notons aussi qu'on rencontre du sable provenant du concassage des quarts graveleux.

II-1-2- Les gravillons

Les gravillons couramment utilisés au Burkina Faso pour la confection des bétons peuvent être classés en 4 groupes.

II-1-2-1 Les concassées de quartz

Les concassés de quartz proviennent des carrières. L'exploitation de ces carrières est souvent artisanale mais elle peut être aussi industrielle quand elle est destinée à un grand chantier. Ces carrières offrent généralement des granulats propres et de dureté acceptable.

II-1-2-2 Les roulés de quartz

Ce sont des matériaux d'aspect lisse dont la dureté est généralement bonne mais dont l'adhérence au ciment n'est pas satisfaisante. Ils proviennent des alluvions des cours d'eau. Comme pour le sable de rivière, les gisements sont également très localisés. Il n'y a pratiquement pas d'exploitation permanente.

II-1-2-3 Les concassés de granite

Ils proviennent des carrières généralement couvertes à l'occasion de la construction des routes. Ils offrent une bonne adhérence mais une résistance relativement faible par rapport aux gravillons quartzeux.

II-1-2-4 Les graveleux latéritiques

Ils se présentent sous forme de nodules de dimensions généralement inférieures à 20 mm et de couleur de rouille.

II-1-3- Les caractéristiques des granulats utilisés

Les granulats utilisés pour l'expérience sont les sables de rivière et les gravillons quartzeux concassés. Ces matériaux sont couramment utilisés dans la construction au Burkina Faso.

L'identification de ces matériaux passe par la détermination de leurs caractéristiques, notamment :

la nature,

la forme,

la granulométrie (type granulaire d/D),

l'équivalent de sable piston et le module de finesse (pour le sable),

la masse spécifique,

la densité apparente,

le coefficient de fragmentation dynamique,

La nature et la forme des granulats sont obtenues par une simple appréciation visuelle. Par contre, les autres caractéristiques sont déterminées par des expériences de laboratoire.

II-1-3-1 L'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a pour objet d'établir la courbe granulométrique qui traduit la répartition des particules qui composent le matériau en fonction de leur taille.

Le principe de l'analyse granulométrique consiste à prélever une certaine quantité de matériau (500g par exemple pour le sable et 2000 g pour le gravier), après avoir séché celui-ci. L'échantillon prélevé est passé sur différents tamis. Le poids des tamisats successifs permet de déterminer les pourcentages du tamisat correspondant à chacun des tamis utilisés. Les résultats suivants ont été obtenus :

E.I.E.R.

Laboratoire de mécanique des sols

Provenance: laboratoire EIER
 Echantillon: *Sable fin*
 Prélèvement: 500 g

Tableau VIII ANALYSE GRANULOMETRIQUE
 Opérateur: SEBABE S.
 Nature: *roulé*
 Date: 27-3-2001

MODULE	38	36	34	32	30	28	26	26	24	24	22	22	20
POIDS DES REFUS (g)	2,60	4,00	10,10	9,30	23,10	75,60	105,60	75,50	90,30	90,30	55,50	55,50	55,50
POIDS DES TAMISATS (g)	497,40	493,40	483,30	474,00	450,90	375,30	269,70	194,20	103,90	48,40	48,40	48,40	48,40
POURCENTAGE DES TAMISATS	99,48	98,68	96,66	94,80	90,18	75,06	53,94	38,84	20,78	9,68	9,68	9,68	9,68

Provenance: Chantier de l'EIER
 Echantillon: *Sable grossier*
 Prélèvement: 500 g

Opérateur: SEBABE S.
 Nature: *roulé*
 Date: 3-4-2001

MODULE	38	36	34	32	30	28	26	26	24	24	22	22	20
POIDS DES REFUS (g)	1,30	11,60	59,60	76,10	97,40	107,20	74,80	42,00	21,00	21,00	3,20	3,20	3,20
POIDS DES TAMISATS (g)	498,70	487,10	427,50	351,40	254,00	146,80	72,00	30,00	9,00	9,00	5,80	5,80	5,80
POURCENTAGE DES TAMISATS	99,74	97,42	85,50	70,28	50,80	29,36	14,40	6,00	1,80	1,80	1,16	1,16	1,16

Provenance: EIER
 Echantillon: *Sable*
 Prélèvement: 500 g

Opérateur: SEBABE S.
 Nature: *roulé (mélange de 21,28% sable fin + 78,72% sable grossier)*
 Date: 14-04-2001

MODULE	38	36	34	32	30	28	26	26	24	24	22	22	20
POIDS DES REFUS (g)	2,20	8,00	37,65	65,65	78,00	102,20	98,80	57,25	28,00	16,95	16,95	16,95	16,95
POIDS DES TAMISATS (g)	497,80	489,80	452,15	386,50	308,50	206,30	107,50	50,25	22,25	5,30	5,30	5,30	5,30
POURCENTAGE DES TAMISATS	99,56	97,96	90,43	77,30	61,70	41,26	21,50	10,05	4,45	1,06	1,06	1,06	1,06

E.I.E.R.

Laboratoire de mécanique des sols

Provenance: Chantier de l'EIER
 Echantillon: Gravier (0/25)
 Prélèvement: 2000 g

Tableau VIII (suite): ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Opérateur: SEBABE S.
 Nature: Quartzzeux
 Date: 17-4-2001

MODULE	45	44	42	40	38	36	34	32		
POIDS DES REFUS (g)	0,00	319,80	1256,80	349,20	59,70	9,70	2,90	1,30		
POIDS DES TAMISATS (g)	2000,00	1680,20	423,40	74,20	14,50	4,80	1,90	0,60		
POURCENTAGE DES TAMISATS	100,00	84,01	21,17	3,71	0,73	0,24	0,10	0,03		

Provenance: Chantier de l'EIER
 Echantillon: Gravier (0/20)
 Prélèvement: 2000 g

Opérateur: SEBABE S.
 Nature: Quartzzeux
 Date: 17-4-2001

MODULE	46	44	42	40	38	36	34	32		
POIDS DES REFUS (g)	0,00	0,00	129,40	947,30	684,80	150,80	64,50	5,40		
POIDS DES TAMISATS (g)	2000,00	2000,00	1870,60	923,30	238,50	87,70	23,20	17,80		
POURCENTAGE DES TAMISATS	100,00	100,00	93,53	46,17	11,93	4,39	1,16	0,89		

Les courbes granulométriques des deux (2) sables de rivière figurent en annexe II-1, celles des gravillons concassés 0/20 et 0/25 figurent respectivement en annexe II-2 et II-3.

A partir des courbes granulométriques, nous pouvons classer les granulats en type granulaire (d/D) dont le principe est consigné en annexe II-4.

Prenons le sable grossier dont la courbe granulométrique est en annexe II-1.

Tableau IX Détermination du type granulaire : exemple du sable grossier.

(les bonnes réponses sont soulignées)

Choix de d et de D	d = 0.08 mm et D = 5 mm			
$D/d = 62.50 \leq 1.56$?	OUI		<u>NON</u>	
Refus cumulé sur la maille D = ... 0,26 ... %	$\leq 20\%$		<u>$\leq 15\%$</u>	
Tamisat pour le tamis d = 1,16 %	$\leq 20\%$		<u>$\leq 15\%$</u>	
Refus cumulé sur le tamis 1.56 D = 0 %	0		<u>0</u>	
Tamisat pour le tamis 0.63 d = 0 %	<3% et D > 5mm	$\leq 5\%$ et D \leq 5mm	<3% et D > 5mm	<u>$\leq 5\%$</u> et <u>D \leq 5mm</u>
d est-il inférieur à 0.5mm ?	si oui alors d=0		<u>Si oui alors d =0</u>	
TYPE GRANULAIRE d/D	<u>0/5</u>			

En suivant le même procédé, nous obtenons le résultat consigné dans le tableau X ci-après :

Tableau : X type granulaire des matériaux utilisés

Matériau	Sable de rivière fin	Sable de rivière grossier	Gravier quartzeux	Gravier quartzeux
Type granulaire (d/D)	0/5	0/5	1.6/20	4/25

II-1-3-2- Le module de finesse du sable (Mf)

Le module de finesse du sable est égal au $1/100^e$ de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de module : 23 – 26 – 29 – 32 – 35 – 38.

Le module de finesse est une caractéristique importante du sable. En effet :

si $1.80 \leq Mf \leq 2.20$: le sable est un peu trop fin ; son béton nécessitera plus de dosage en eau.

si $2.20 \leq Mf \leq 2.80$: c'est un bon sable pour le béton.

si $2.80 \leq Mf \leq 3.20$: le sable est un peu trop grossier ; son béton n'aura pas une bonne ouvrabilité.

En se référant aux courbes granulométriques en annexe II-1, nous obtenons les modules de finesse suivants :

Pour le sable dont la provenance est le Laboratoire de l'EIER:

$$Mf = \frac{70+46+15+5+2+0.5}{100} \approx 1.39$$

C'est un sable très fin car son Mf est largement inférieur à la fourchette des sables fins.

Pour le sable dont la provenance chantier EIER :

$$Mf = \frac{97+85+60+30+8+0}{100} \approx 2.80$$

C'est un sable peu grossier.

II-1-3-3 L'équivalent de sable (ES)

Cet essai a pour objet de déterminer la proportion relative de poussières fines ou d'éléments argileux nuisibles. Il est réalisé sur des sables destinés à la confection de bétons. Le principe consiste à opérer sur un échantillon de sable un lavage énergique de manière à le séparer de ses matières ultra fines de nature argileuse que l'on fait flocculer.

Le mode opératoire

On utilise une solution de lavage contenant :

- du chlorure de calcium,
- du formol,
- de la glycérine.

Pour réaliser l'essai, on utilise la fraction du matériau inférieure à 5 mm, la fraction supérieure à 5 mm étant lavée pour récupérer toutes les fines. Une fois le matériau séché, on introduit dans une éprouvette spéciale contenant une hauteur de 10 cm de solution, 90 cm³ de matériau foisonné. On laisse imbiber le matériau 10 minutes, puis on agite rigoureusement l'éprouvette 90 fois en 30 secondes sur une course de 20 cm. On introduit un tube laveur dans l'éprouvette et on lave par piquage le matériau contenu dans l'éprouvette de façon à remplir l'éprouvette jusqu'à 38 cm. On laisse reposer le tout pendant 20 minutes exactement et on lit h1 = hauteur du floculat et du sable pris à partir du bas de l'éprouvette et h'2 = hauteur du sable mesurée à vue d'œil, puis h2 = hauteur du sable mesurée au piston lesté de 1 kg.

♣ *Calculs et résultats*

L'équivalent de sable est le rapport entre la lecture de niveau supérieur du sable et celle du niveau supérieur de l'argile ramené en pourcentage.

Ainsi :

$$\text{Equivalent de sable à « vue »} \quad \text{E.S.V.} = \frac{h'_2}{h} \cdot 100$$

$$\text{Equivalent de sable « au piston »} \quad \text{E.S.} = \frac{h_2}{h} \cdot 100$$

Les résultats de l'analyse figurent dans le tableau XI ci-après :

Tableau XI Equivalent de sable

Nature du matériau		Sable fin EIER (1)		Sable du chantier EIER (2)		Mélange sable (1) et (2) (*)		
		1	2	1	2	1	2	
Prise d'essai n°								
HEU-RES	Temps d'addition du matériau	11h23	11h28	10h45	10h50	11h28	11h30	
	Agitation-lavage+10mn	11h33	11h38	10h55	11h00	11h38	11h40	
	Temps de la mise au repos	11h37	11h42	11h02	11h04	11h46	11h54	
	Lecture temps + 20 mn	11h57	12h02	11h22	11h24	12h06	12h14	
MESU-RES	Hauteur de floculation h1(cm)		10,8	9	10	10,6	9,5	9,6
	Hauteur du sédiment au piston h2		7,2	7	7,7	8	7	7,3
	Hauteur du sédiment à vue h'2		8	7,7	8	8,6	7,5	8
	ES sur prise	Piston	67	78	77	75	74	76
		à vue	74	86	80	81	79	83
	ES sur Echantillon	Piston	72		76		75	
		à vue	80		81		81	

(*) Les raisons du mélange des deux sables sont données au paragraphe III-3-1

II-1-3-4 La masse spécifique

C'est la masse d'un corps par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains (volume absolu).

Nous avons utilisé la méthode de l'éprouvette graduée pour la détermination de la masse spécifique. Cette méthode consiste à :

- mettre dans une éprouvette graduée un volume V1 d'eau,
- Peser une masse M du matériau (de l'ordre de 500 g), et l'introduire dans l'éprouvette. Bien éliminer les bulles d'air.
- lire le nouveau volume V2.

Le volume absolu est $V=V2-V1$, et la masse spécifique est : $\frac{M}{V2-V1}$

II-1-3-5 La densité apparente

La densité apparente est à la masse volumique ce que la densité absolue est à la masse spécifique, c'est donc un rapport sans dimension dont la valeur est égale au millième de la masse volumique ; sachant que la masse volumique est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains le constituant (volume apparent).

II-1-3-6 Le coefficient de fragmentation dynamique

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.60 mm produit en soumettant le matériau aux chocs d'une masse normalisée.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les trois classes granulaires biens définies et à chaque classe correspond un nombre de chocs donnés au matériau.

Tableau XII: Nombre de coups de masse pour chaque classe granulaire.

Classe granulaire (mm)	Nombre de coups de masse
4 – 6.3	16
6.3 – 10	22
10 – 14	28

La masse M du matériau soumis à l'essai est constante . Elle vaut 350 g ± 1g.

Si m est la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation dynamique (FD) est exprimée par la quantité :

$$FD = 100 \cdot \frac{m}{M}$$

Par définition, cette quantité sans dimension est appelée coefficient de fragmentation dynamique et doit être inférieur à 40 pour un bon matériau.

L'essai sur le concassé de quartz a donné :

Après les coups de masse et tamisage sur tamis de 1,6 mm (Module 33) du granulat recueilli, nous obtenons un refus $m' = 236,6$ g

La masse des éléments inférieurs à 1.60 est donc = 350-236,6 = 113,40 g

Le coefficient de fragmentation dynamique est donc égal à :

$$FD = 100 \cdot \frac{113,40}{350} = 32,40$$

$$FD = 32$$

Le tableau XIII ci-après résume les caractéristiques des granulats utilisés.

Tableau XIII: Caractéristiques des granulats au Burkina Faso

- Sable

Type de Sable	Nature	Forme	Type granulaire (d/D)	ES au Piston	Module de finesse	Masse spécifique (T/m ³)	Densité apparente	Observations
Rivière (1)	Quartz	Roulé	0/5	72	1.39	2.63	1.58	Très fin Un peu grossier
Rivière (2)	Quartz	Roulé	0/5	76	2.80	2.63	1.56	
Mélange (1)+(2) *	Quartz	Roulé	0/5	75	2.50	2.63	1.56	Bon pour béton

* : Les raisons du mélange des deux sables sont données au paragraphe III-3-1

- Gravier

Nature	Forme	Type granulaire	Masse Spécifique	Densité apparente			Coefficient de fragmentation	Observations
				1.6/20	4/25	4/31.5		
Quartz	Concassé	0/20	2.63	1.42	1.43	1.46	32	
Quartz	Concassé	0/25	2.56					

II-2- LES CIMENTS

Le Burkina importe du calcaire pour la production du ciment. Mais sa production revient chère pour le Burkina et sa qualité n'est pas aussi satisfaisante que les autres ciments de la sous-région. Le ciment est donc importé par voie terrestre du Togo et de la Côte d'Ivoire. Celui du Togo est le plus utilisé car il satisfait les attentes des utilisateurs par la qualité qu'il donne au béton notamment la résistance à la compression. Les importations concernent particulièrement les CPA 45 et CPJ 35.

Les essais suivants ont été menés :

- Détermination de la masse volumique apparente,
- Détermination de la masse volumique absolue,
- Mesure de la surface spécifique,
- L'essai de consistance,
- La détermination de la classe vraie du ciment,
- Les essais de prise,
- Les essais mécaniques : essai de rupture par flexion et essai de rupture par compression.

II-2-1 Détermination de la masse volumique apparente

Le principe consiste à prendre une mesure d'un mètre cube et en déterminer la masse.

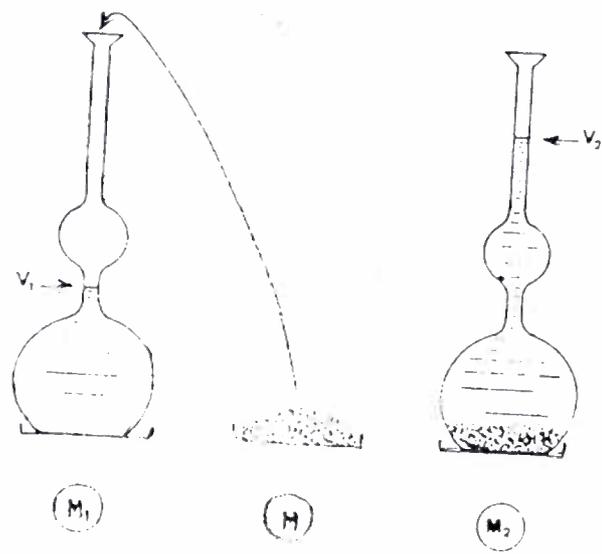
Le procédé consiste à :

- prendre le ciment dans les deux mains formant entonnoir,
- placer les deux mains à 10 cm environ au-dessus d'une mesure d'un litre, et laisser tomber le sable, ni trop vite, ni trop lentement
- Verser ainsi le ciment au centre de la mesure jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône. On arase à la règle et on pèse le contenu.

Il est recommandé de faire au moins trois essais et de prendre la moyenne.

II-2-2 Détermination de la masse volumique absolue

Le matériel utilisé est le densitomètre de Le châtelier



Le principe consiste à :

- mettre du benzène jusqu'en V1, voisin de zéro, noter V1 en valeur algébrique (négatif au-dessous du repère). Peser le tout, soit M1.
- Introduire le ciment jusqu'à ce que le niveau du liquide soit dans la partie utile de la graduation supérieure. Bien chasser les bulles d'air ; et noter V2. Peser le tout, soit M2.

La masse volumique absolue est : $\frac{M2-M1}{V2-V1}$

II-2-3 Mesure de la surface spécifique

C'est le total des surfaces de tous les grains contenus dans une masse donnée. Cette surface est d'autant plus grande que les grains sont plus petits ; donc que la finesse de mouture est plus grande.

Il est connu, par ailleurs, que la vitesse d'écoulement d'un fluide (air ou eau, par exemple) à travers un corps granulaire est d'autant plus faible que les grains qui composent ce corps sont plus fins : cette vitesse décroît donc quand la finesse de mouture augmente. L'aire massique et la vitesse d'écoulement sont ainsi liées par un même facteur qui est la finesse de mouture.

Cette finesse (surface spécifique) est mesurée par un appareil appelé « Perméabilimètre de Blaine »

A une augmentation de la finesse correspond une augmentation de la résistance précoce, mais aussi une tendance accrue au retrait.

II-2-4 L'essai de consistance

L'essai de consistance a pour objet de déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage.

La pâte pure gâchée avec la quantité d'eau ainsi déterminée est dite « pâte normale ».

Pour confectionner la pâte normale, on prend 350 kg de ciment que l'on tamise au tamis de module 20. On pèse ensuite une quantité d'eau comprise entre 25 et 28 % du poids sec de ciment.

On emploie l'appareil de Vicat qui est muni d'une sonde cylindrique de 10 mm de diamètre.

Son poids total est de 240 g. Il est nécessaire de rajouter un poids de 60 g pour obtenir un poids total de 300 g correspondant à la normalisation.

Le moule contenant la pâte est placé dans l'axe de la sonde ; on laisse descendre celle-ci en la retenant de manière à l'empêcher d'acquiescer une vitesse initiale ; la sonde pénètre dans la pâte et s'enfonce sous son propre poids. Lorsqu'elle est stabilisée, on note l'épaisseur de la pâte restant sous la sonde donnée par la lecture de la graduation.

On ne doit jamais effectuer deux essais sur la même pâte. On recommence l'essai en reconditionnant une pâte mais avec une quantité d'eau augmentée de 2% à 2%. On note à chaque fois la hauteur de pâte restant sur la sonde. Lorsque cette hauteur sera inférieure à 6 mm on arrête les mesures.

Par définition, la consistance de la pâte est dite normale quand la distance entre la sonde et le fond du moule, correspondant à l'épaisseur de la pâte, est égale à 6 mm 61 mm.

II-2-5 L'essai de prise

L'essai de prise a pour but de déterminer le temps de prise, c'est à dire la durée qui s'écoule entre l'instant où le liant a été mis en contact avec l'eau de gâchage et le « début de prise »

Il est donc indispensable que la mise en œuvre du béton soit terminée lorsque la prise commence.

Le principe de l'essai est de déterminer le « début de prise » à l'aide de l'aiguille de Vicat s'enfonçant dans un moule tronconique rempli de mortier.

Notons que le mortier utilisé est composé de ciment dont les caractéristiques sont connues, de « sable normal » et d'eau avec une composition de :

Ciment : 1 partie (en poids), par exemple : 450 g

Sable normal : 3 parties (en poids), par exemple : 1350 g

Eau : ½ partie (en poids), par exemple 225 g.

II-2-6 L'essai d'expansion sur pâte pure

Les essais d'expansion à froid et à chaud sont exécutés au moyen de moules permettant la mesure de la déformation.

L'essai consiste à placer les moules sur des plaques de verre, les remplir de pâte pure et recouvrir chacun d'eux d'une autre plaque de verre légèrement lestée ; les immerger aussitôt dans l'eau à $20 \pm 1^\circ\text{C}$ et mesurer l'écartement des pointes des aiguilles afin de le retrancher de l'écartement final pour obtenir la valeur de l'expansion.

II-2-6-1 L'expansion à froid

Les moules sont immergés dans l'eau maintenue à une température de $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Sept jours après le gâchage, on mesure de nouveau l'écartement final des pointes des aiguilles.

II-2-6-2 L'expansion à chaud

Les moules sont immergés dans de l'eau que l'on porte progressivement à l'ébullition en un temps qui doit être compris entre un quart d'heure et une demi-heure. Après ébullition pendant trois heures consécutives, on mesure de nouveau l'écartement final des pointes des aiguilles sans attendre le refroidissement.

II-2-7 Les essais mécaniques

On distingue, l'essai de rupture à la traction par flexion et l'essai de rupture par compression.

II-2-7-1 l'essai à la traction par flexion

L'éprouvette utilisée est une éprouvette prismatique $4 \times 4 \times 16$ en mortier ou en pâte pure. La rupture est effectuée sous charge concentrée dans une machine appropriée.

II-2-7-2 L'essai de rupture par compression

L'essai de compression est exécuté avec une presse pour matériaux durs, sur les demi éprouvettes provenant de l'essai à la traction par flexion.

Les résultats des essais sur le ciment figurent dans le tableau XIV ci-après :

LNBTP
QUAGADOUGOU

Tableau XXIV: RESULTAT DES ESSAIS SUR LE CIMENT

IDENTIFICATION DU CIMENT			
- Date de réception: 25 Avril 2001			
- Etat du matériau à la réception: sac d'origine (4 feuilles)			
- Nature: CPA 45 Togo ROC			
- Provenance: EIER			
- Prélèvement: Par le demandeur.			

Mesure	Masse volumique (800 - 1200kg/m3)	Masse spécifique (2900-3200kg/m3)	Surface spécifique (2700-3500cm2/g)
Date	27 04 2001	27 04 2001	22 05 2001
Résultat	1030	3080	3352

Essai de prise (pâte pure) (NFP15 431)	Date	Début de prise (ciments de classes 35 et 45 >1h30mn et ciments de classes 55 et HP > 1h)	fin de prise
	29 04 2001	2 heures 40 mn	4 heures 10mn

ESSAI D'EXPANSION SUR PATE PURE (NFP 15 432)			
A froid (<10 mm) date: 09/05/2001		A chaud (<10 mm) date 03/05/2001	
0			
0,2		0,1	
0,3	0,2	0,6 0,1	0,3

ESSAIS MECANQUES (NFP 15-451)							
Contrainte de rupture à la traction par flexion (Mpa)	âge (jour)			Contrainte de rupture par compression (Mpa)	âge (jour)		
	2	7	28		2	7	28
	5,1	6,9	9,1		24,0 - 26,9	42,8 - 43,2	48,6 - 51,0
	5,1	7,8	8,9		24,5 - 24,4	43,0 - 40,7	49,5 - 51,7
	5,3	7,5	8,2		22,8 - 25,0	37,3 - 45,3	51,5 - 49,1
Moyenne	5,2	7,4	8,7	Moyenne	24,6	42,1	50,2

OBSERVATIONS SELON NFP 15 301

Chapitre III LA CONDUITE DE L'ETUDE ET LES RESULTATS OBTENUS

III LA CONDUITE DE L'ETUDE ET LES RESULTATS OBTENUS

III-1 PRINCIPE DE L'ETUDE

L'étude est basée sur de nombreuses expériences pouvant permettre de déterminer les coefficients empiriques et les abaques adaptés aux matériaux usuels de construction au Burkina Faso, tout en respectant la méthode de D.G.

Nous avons utilisé deux types de béton différenciables par le type granulaire (d/D) :

le béton (0/25)

le béton (0/20)

La composition de chaque type de béton est déterminée par la méthode de D.G.

Pour chaque type de béton, on fait varier le dosage en ciment de 300 à 400 kg/m³ avec un pas de 50.

Pour chaque dosage retenu :

- on fait varier quatre (4) fois la quantité d'eau, à travers le paramètre C/E pour faire passer le béton de l'état ferme à l'état liquide.
- pour chaque valeur de C/E (correspondant donc à un dosage en eau) :
des prélèvements du béton frais sont faits pour des tests d'affaissement au cône d'Abrams et de détermination de la teneur en eau réelle.
on confectionne quatre (4) éprouvettes avec des moules cylindriques de diamètre 11 cm et un (1) éprouvette avec une moule de cylindrique de diamètre 16 cm.
des éprouvettes sont aussitôt pesées pour connaître le poids volumique du béton frais et sa compacité.
- les éprouvettes sont conservées dans un bac à eau. Dès la première semaine, les essais sclérométriques sont effectués sur des éprouvettes de diamètre 16 cm. Ces essais sont repris au 14^e et 28^e jour pour suivre l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton. Cette évolution peut être suivie pendant plusieurs mois.
- A 28 jours d'âge, des essais à l'écrasement sont effectués sur des éprouvettes de diamètre 11 cm pour déterminer la résistance à la compression.

III-2 LES RESULTATS ATTENDUS

- La formule de Bolomey pour le Burkina ,
- Les valeurs du coefficient de compacité,
- Les courbes caractéristiques donnant pour chaque dosage en ciment, l'évolution de l'affaissement en fonction de C/E.

- L'évolution de la résistance à la compression du béton en fonction de l'âge.

III-3 LE CHOIX DES GRANULATS

L'application de la méthode de D.G laisse constater que les corrections qui interviennent dépendent notamment des caractéristiques des matériaux utilisés. Pour annuler ces corrections, nous avons recherché des matériaux adéquats.

III-3-1 Le sable

En se référant au chapitre II paragraphe II-2-4, le coefficient correctif K_s , lié au module de finesse (M_f) du sable est obtenu par l'expression :

$$K_s = 6.M_f - 15$$

Pour éviter cette correction, il faut que K_s soit nul, donc M_f égale 2,5.

Notons en passant qu'un sable ayant un module de finesse de 2,5 est très bon pour le béton car il contient plus ou moins les mêmes proportions d'éléments fins et grossiers et contribue en conséquence à une bonne ouvrabilité du béton tout en assurant convenablement sa résistance.

Dans le tableau XIII des caractéristiques des granulats du Burkina Faso, les deux sables étudiés ont des M_f de 1.39 et 2.80. Pour obtenir un sable de $M_f = 2,5$, nous avons utilisé la règle d'Abrams qui stipule que :

Si l'on dispose d'un sable S_1 de module de finesse trop fort (M_{f1}) et que l'on désire y ajouter un sable de module de finesse (M_{f2}) afin d'obtenir un mélange dont le module de finesse serait (M_f), les proportions des deux sables composant devront être les suivantes:

$$\text{Proportion du sable } S_1 : \frac{M_f - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}}$$

$$\text{Proportion du sable } S_2 : \frac{M_{f1} - M_f}{M_{f1} - M_{f2}}$$

Nous obtenons les résultats suivants :

Sable de $M_f=2,80$: une proportion de 78,72%

Sable de $M_f=1,39$: une proportion de 21,28%

Les proportions ci-dessus ont donc été appliquées pour avoir un sable de $M_f = 2,5$. Les caractéristiques de ce sable sont consignées dans le tableau XIII.

III-3-2 Le gravier

D.G prévoit une correction du dosage en eau (E) en fonction de la dimension maximale du granulat (confère tableau IV du chapitre II). Cette correction est nulle si $D=25$ mm.

Nous retiendrons donc un gravier de dimension maximale $D=25$ mm pour éviter cette correction.

L'adaptation des paramètres empiriques de la méthode de D G nécessite donc la confection d'un béton composé de sable de $Mf = 2,5$ et de gravier de dimension maximale $D = 25$ mm. Nous dénommons ce béton : béton 0/25.

Les courbes granulométriques des deux matériaux figurent en annexe II-3.

Cependant, nous avons préparé aussi du béton avec des granulats usuels sans pour autant tenir compte de leurs caractéristiques. Il s'agit du sable de $Mf=2,80$ et du gravier ayant une dimension maximale $D=20$ mm. Ce béton est dénommé béton 0/20.

III-4 DETERMINATION DE LA COMPOSITION DU BETON

La composition du béton pour la confection des éprouvettes est déterminée en respectant la méthode de D.G. Cependant, compte tenu du changement du dosage en eau au cours de l'essai qui fait passer le béton de l'état ferme à l'état liquide, nous fixons à l'avance l'affaissement au cône d'Abrams, correspondant au béton ferme, égal à 4 cm.

III-4-1 Les hypothèses de calcul

III-4-1-1 Hypothèses communes aux 2 bétons (béton0/25 et béton0/20).

Le ciment utilisé est le CPA 45 du Togo

Le dosage en eau étant faible au début de l'essai, on admet un affaissement(A) égal à 4 cm

III-4-1-2 Hypothèses pour béton 0/25 :

Sable 0/5 de $Mf=2.50$ et de masse spécifique= 2.63 t/m³

Diamètre maximal des granulats : $D=25$ mm

III-4-2-3 Hypothèses pour béton 0/20 :

Sable 0/5 de $Mf=2.80$ et de masse spécifique= 2.63 t/m³

Diamètre maximal des granulats : $D=20$ mm

III-4-2 Dosage des différents composants

Nous considérons un béton 0/25 et un dosage en ciment (C) égal à 300 kg/m³.

III-4-2-1 Dosage en eau

Ce dosage varie au cours de l'essai, nous le déterminons ici pour avoir une idée sur sa quantité selon D.G et pour estimer la densité théorique du béton frais.

Connaissant $A=4$ cm et $C=300$ kg/m³ on obtient $C/E=1,58$ à l'aide de l'abaque de la figure 1 ci - avant.

Le dosage en eau est donc égal à :

$$E = \frac{C}{1,58} = \frac{300}{1,58} \approx 190 \text{ litres}$$

III-4-2-2 Dosage des granulats

Détermination du point de brisure(A) de la courbe granulaire de référence.

$D = 25\text{mm}$ donc $> 20\text{ mm}$: l'abscisse X_A est le milieu du « segment gravier » limité par le module 38 (5mm) et le module correspondant à D (module 45).

Donc X_A se trouve sur la verticale du module 41,50.

Son ordonnée est $Y_A = 50 - \sqrt{25} + 4 = 49$

La courbe de référence est tracée sur la courbe granulométrique en annexe II-3

Nous lisons sur cette courbe :

Pourcentage du sable : 41%

Pourcentage du gravier : 59%.

Volume absolu des grains de ciment :

$$c = \frac{300}{3.1} = 96.77 \text{ litres}$$

Choix du coefficient de compacité (γ) :

Le dosage en eau étant faible en début d'essai, nous considérons donc avoir un béton ferme, D est égal à 25mm et nous adoptons une vibration normale au cours de l'essai.

Ces considérations nous permettent d'obtenir par interpolation $\gamma = 0.837$, en l'aide du tableau VI

Volume total absolu : $1000 * \gamma = 837$ litres

Volume absolu des granulats : $837 - 96.77 = 740.23$ litres

Volume absolu du sable : $740.23 * 0.41 = 303.49$ litres

Volume absolu du gravier : $740.23 * 0.59 = 436.74$ litres

Les dosages en matériaux secs seront donc :

Sable : $303.49 * 2.63 = 798.18$ kg

Gravier : $436.74 * 2.56 = 1118.05$ kg

Ciment : 300 kg

Eau : 190 kg

La densité théorique du béton frais serait donc égale à 2.41

Le même principe de calcul appliqué à chaque dosage en ciment pour les types de béton permet d'établir le tableau ci-après :

Tableau XV : Récapitulatif de la composition de béton par la méthode de D.G pour la confection des éprouvettes .

TYPE DE BETON	DOSAGE	C=300 kg/m ³		C=350 kg/m ³		C=400 kg/m ³	
		Pondéral (kg)	Volumétrique (l)	Pondéral (kg)	Volumétrique (l)	Pondéral (kg)	Volumétrique (l)
0/25	Sable	798,18	303,49	778,72	296,092	739,79	281,29
	Gravier	1118,05	436,74	1136,99	444,138	1174,89	458,94
	Eau	190	190	187	187	190,48	190,48
	Densité théor. béton frais	2,41		2,45		2,5	
0/20	Sable	715,54	265,76	660,43	245,51	607,67	225,9
	Gravier	1241,36	472,47	1253,42	476,58	1262,56	480,06
	Eau	190	190	187	187	190,48	190,48
	Densité théor. béton frais	2,45		2,45		2,46	

III-5 MODE DE FABRICATION ET DE MISE EN ŒUVRE DU BETON POUR LA CONFECTION DES EPROUVETTES

III-5-1 Matériel utilisé

III-5-1-1 La bétonnière

La bétonnière utilisée est une bétonnière à axe incliné et à cuve tournante ; sur ses parois intérieures sont fixées des palettes hélicoïdales assurant le brassage du mélange. Le vidange se fait par basculement de la cuve.

III-5-1-2 L'aiguille vibrante

Elle a 25 mm de diamètre et sa fréquence de vibration est comprise entre 10 000 et 20 000 périodes/minute.

III-5-1-3 Les moules

Nous disposons de deux (2) moules de diamètres de 16 cm et de 8 moules de diamètres 11 cm.

III-5-2 Mode de fabrication du béton

III-5-2-1 L'approvisionnement de la bétonnière

L'introduction des matériaux dans le skip de la bétonnière s'effectue suivant l'ordre ci-après : le gravier, le ciment le sable et ensuite l'eau.

III-5-2-2 Le malaxage

Le temps minimal t (en seconde) de malaxage préconisé par les règlements est fonction du diamètre de la cuve ; ce temps est estimé par la formule :

$t = 120\sqrt{D}$ pour les bétonnières à axe incliné

Le diamètre de la cuve de la bétonnière utilisée est égal à 55 cm.

Donc $t = 1$ minute 19 secondes.

Nous avons fixé la durée de malaxage à 2 minutes environ pour s'assurer de la bonne homogénéité du mélange.

III-5-2-3 La vibration

Le remplissage du moule par du béton se fait en deux couches pour assurer une bonne vibration. L'aiguille est constituée d'un tube à l'intérieur duquel tourne à grande vitesse une turbine à air comprimé légèrement excentrée.

A la première couche de béton, on fait descendre l'aiguille dans l'axe de l'éprouvette et on la retire lentement pendant les cinq dernières secondes. La durée de vibration de la première couche est l'ordre de 10 à 20 secondes et celle de la deuxième couche est de l'ordre de 15 à 25 secondes.

III-6 LES TESTS REALISES SUR LE BETON

Divers tests sont réalisés sur le béton frais et durci.

III-6-1 **Mesure de la teneur en eau du béton frais**

Après le malaxage, le béton est aussitôt prélevé, pesé et mis à l'étuve pendant 24 heures pour la détermination de la teneur en eau. Les résultats sont présentés dans les tableaux XVI et XVI bis.

III-6-2 **Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams**

L'affaissement au cône d'abrams du béton frais est déterminé conformément au paragraphe II-2-1-3 pour connaître la consistance du béton. Les résultats sont dans le tableau XVIII.

III-6-3 **Mesure du poids volumique du béton frais**

Les moules remplis de bétons sont aussitôt pesés pour connaître le poids volumique du béton frais. Les résultats sont consignés dans le tableau XVI et XVI bis.

III-6-4 **Les essais de compression**

Après conservation à 28 jours, les éprouvettes de béton de diamètre 11 cm sont écrasées pour déterminer la résistance à la compression à 28 jours.

Le processus se présente comme suit :

- surfacer les faces de chargement de l'éprouvette pour les rendre bien planes et perpendiculaires à la ligne d'application de la force appliquée. Le surfacage se fait par un mélange composé de :

1- 60% de fleur de soufre,

2- 40% de sable fin ($D < 0.5$ mm)

- appliquer une mince couche d'huile sur le fond de l'appareil de surfacage pour éviter le collage de l'éprouvette sur celui-ci et verser une louche de mélange fondu dans la coupelle
- poser l'éprouvette et le maintenir quelques instants (durcissement rapide) et l'enlever de la coupelle.
- Poser l'éprouvette sur le plateau de la presse et appliquer la charge de manière continue et sans choc en respectant une augmentation de contrainte de : 0.5 ± 0.20 Mpa/sec. La ligne d'action de la charge doit correspondre à l'axe de l'éprouvette.

Rappelons qu'à chaque dosage en ciment et pour une variation du dosage en eau à travers le paramètre C/E, nous confectionnons 4 éprouvettes pour avoir plusieurs valeurs de la résistance à la compression. Les résistances à la compression qui s'écartent de plus de 4,5 Mpa (correspondant à une force de compression de 35,34 KN) des autres sont rejetées. Les résultats des tests d'écrasement sont dans le tableau XVII.

Dans le tableau XVIII, sont aussi consignés les valeurs de la résistance à la compression en fonction du dosage en ciment, de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

Tableau XVI : teneur en eau du béton frais

DOSAGE	300					350					400				
	C/E														
Poids de la tare (mt)	1,93	1,72	1,54	1,25	2,30	2,09	1,95	1,78	2,70	2,43	2,00	1,85			
Ech. Hum + tare: mh+mt	43,20	42,00	42,50	43,30	42,60	42,30	44,60	46,70	41,10	43,30	39,20	40,80			
Ech. Sec + tare: ms+mt	167,20	161,30	169,90	157,70	127,70	163,40	182,90	160,80	125,30	155,60	167,90	114,10			
Ech. Hum - Ech. Sec: me	11,50	12,50	13,90	18,70	8,40	12,80	15,30	16,90	8,70	11,80	17,00	104,50			
Ech. Sec: ms	112,50	106,80	113,50	95,70	76,70	108,30	123,00	97,20	75,50	100,50	111,70	63,70			
teneur en eau: me/ms	10,22	11,70	12,25	19,54	10,95	11,82	12,44	17,39	11,52	11,74	15,22	15,07			

pois volumique du béton frais

DOSAGE	300					350					400				
Poids du moule: Pm (kg)	2,039	2,076	2,039	2,076	2,039	2,076	2,076	2,039	2,039	2,076	2,039	2,076	2,039	2,076	2,076
Pm+béton frais (kg)	5,712	5,648	5,687	5,605	5,700	5,800	5,610	5,608	5,736	5,692	5,652	5,717	5,641	5,717	5,717
Poids béton frais: mb (kg)	3,673	3,572	3,648	3,529	3,661	3,724	3,534	3,569	3,697	3,616	3,613	3,641	3,641	3,641	3,641
Volume du moule: Vm (m ³)	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Pds. vol: Pv=mb/Vm (g/cm ³)	2,338	2,274	2,322	2,247	2,331	2,371	2,250	2,272	2,354	2,302	2,300	2,318	2,318	2,318	2,318

Tableau XVI (suite) : teneur en eau du béton frais

DOSAGE	300					350					400				
	C/E														
Poids de la tare (mt)	2,20	2,00	1,85	1,60	2,30	1,90	1,82	1,74	2,22	2,10	2,023	1,92			
Ech. Hum + tare: mh+mt	39,20	73,70	77,40	72,60	76,90	78,10	77,00	78,30	77,60	72,80	77,50	75,10			
Ech. Sec + tare: ms+mt	95,50	154,20	145,10	169,20	151,10	136,30	112,00	132,00	171,40	156,90	163,10	122,30			
Ech. Hum - Ech. Sec: me	90,10	145,30	134,90	152,80	140,70	126,60	106,40	121,80	161,90	147,90	150,50	115,80			
Ech. Sec: ms	5,40	8,90	10,20	16,40	10,40	9,70	5,60	10,20	9,50	9,00	12,60	6,50			
teneur en eau: me/ms	50,90	71,60	57,50	80,20	63,80	48,50	29,40	43,50	84,30	75,10	73,00	40,70			
	10,61	12,43	17,74	20,45	16,30	20,00	19,05	23,45	11,27	11,98	17,26	15,97			

pois volumique du béton frais

DOSAGE	300					350					400				
Poids du moule: Pm (kg)	2,039	2,076	2,039	2,076	2,039	2,076	2,039	2,076	2,039	2,076	2,039	2,076	2,039	2,076	
Pm+béton frais (kg)	5,704	5,722	5,671	5,712	5,710	5,717	5,718	5,695	5,680	5,639	5,608	5,621			
Poids béton frais: mb (kg)	3,665	3,646	3,632	3,636	3,671	3,641	3,679	3,619	3,641	3,563	3,569	3,545			
Volume du moule: Vm (m ³)	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002			
Pds. vol: Pv=mb/Vm (g/cm ³)	2,333	2,321	2,312	2,315	2,337	2,318	2,342	2,304	2,318	2,268	2,272	2,257			

Tableau : XVII Résultat des tests d'écrasement

Type Béton	Dosage en C (kg/m ³)	C/E	Force de compression (Fi en KN)				Moy. Fi (KN)	R'28 (bars)
Béton 0/20	300	1,930	208	172	232	198	202,5	258
		1,720	190	157	211	140	174,5	222
		1,540	150	142	127	132	137,8	175
		1,250	110	148*	101	100	103,7	132
	350	2,300	252	277	238	282	262,3	334
		2,090	260	243	201	228	233,0	297
		1,950	144	236	122	206	177,0	225
		1,780	127	123	140	119	127,3	162
	400	2,700	292	296	251*	293	293,7	374
		2,433	279	273	265	226*	272,3	347
		2,000	273	257	269	245	261,0	332
		1,850	166	194	95*	185	181,7	231
Béton 0/25	300	2,200	223	169	292	167	212,8	271
		2,000	195	220	199	200	203,5	259
		1,850	176	196	202	191	191,3	244
		1,600	136	134	142	160	143,0	182
	350	2,300	273	282	250	267	268,0	341
		1,900	228	226	230	177*	228,0	290
		1,820	186	165	189	184	181,0	230
		1,740	139	122	147	125	133,3	170
	400	2,220	284	258	269	285	274,0	349
		2,100	169*	244	229	282	251,7	320
		2,023	192	205	208	211	204,0	260
		1,920	221	173	167	182	185,8	237

(*): une force de compression est rejetée si l'écart entre elle et les autres est d'au moins 35,34 KN (correspondant à 4,5 Mpa)

Tableau XVIII : Valeurs de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du dosage en ciment, de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams

DOSAGE EN C (kg/m ³)		300				350				400			
Béton 0/20	R'28 (bars)	258	222	175	132	334	297	225	162	374	347	332	231
	C/E	1,93	1,72	1,54	1,250	2,30	2,09	1,95	1,780	2,700	2,433	2,000	1,85
	A	2,4	7,9	20,9	Excès	0,6	6	15	19,3	0,5	1,5	16	11(*)
BETON 0/25	R'28 (bars)	271	259	244	182	341	290	230	170	349	320	260	237
	C/E	2,200	2,000	1,850	1,600	2,300	1,900	1,820	1,740	2,220	2,100	2,023	1,920
	A	1	2,6	9,7	21,6	2,1	11,4	20,4	21	6,1	11,9	18	20,8

(*) Ce résultat est erroné pour raison de panne de bétonnière pendant la mise en œuvre du béton. Le béton a donc commencé à faire prise avant la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.

III-6-5 Les essais sclérométriques

Ce sont des essais non destructifs permettant la détermination de l'indice sclérométrique (Is) d'un béton durci.

III-6-5-1 Principe

Si on laisse tomber une bille métallique sur la surface d'un matériau, on crée une énergie d'impact dont une partie entraîne le rebondissement de la bille. Pour le béton, la hauteur de rebondissement sera d'autant plus grande que celui-ci est plus résistant et inversement.

L'appareil utilisé est le scléromètre. Il est composé d'une masselotte chargée par un ressort qui se projette sur une tige métallique en contact avec la surface du béton, appelée tige de percussion. La hauteur de rebond de cette masselotte est lue sur une échelle graduée grâce à un index mobile.

III-6-5-2 Les précautions à prendre et l'exécution des mesures

- Les éprouvettes de béton doivent sortir du bac 48 heures au moins avant les mesures au scléromètre ;
- la surface de l'essai est préalablement nettoyée par une pierre à polir, avant l'application du scléromètre ;

- les zones qui présentent des nids de graviers, des porosités élevées doivent être évitées ;
- l'éprouvette à tester est divisée en deux (2) zones de 25 cm x 25 cm chacune. La tige de percussion étant perpendiculaire à la surface essayée, il est pris 27 mesures sur chaque zone d'essai. La distance entre deux points de mesure est d'au moins 30 mm et aucun point ne doit se situer au moins à 40 mm de l'un des bords de la surface essayée.

Les mesures des indices sclérométriques figurent annexe III-1

III-6-5-3 L'expression des résultats

- Pour chaque éprouvette, nous avons fait des calculs statistiques des indices sclérométriques lus dans chaque zone. Il s'agit de :

la moyenne arithmétique (ma) :
$$ma = \frac{\sum_{i=1}^n mi}{n}$$

de l'écart type (s) :
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (mi - ma)^2}{n-1}}$$

Le coefficient de variation :
$$v(\%) = \frac{s}{ma} \cdot 100$$

La moyenne arithmétique permet de recentrer les indices sclérométriques (Is) lus, en rejetant ceux qui n'appartiennent pas à l'intervalle : [ma-5 ; ma+5]

Le coefficient de variation permet d'apprécier la dispersion puisqu'il est fonction de l'écart type.

Une nouvelle moyenne des Is retenus permet de déterminer la résistance à la compression à l'aide de l'abaque en annexe III-2 ou par l'utilisation de l'équation de la courbe de la résistance à la compression (R'_j) en fonction de l'indice sclérométrique. Cette équation est obtenue par ajustement, dans le logiciel Excel, de la courbe correspondant à l'application du scléromètre du haut vers le bas et perpendiculairement à la surface d'essai (voir l'abaque en annexe III-2). L'équation obtenue se présente comme suit :

$$R'_j(Is) = 0,0084 \cdot (Is)^2 + 0,811 \cdot (Is) - 7,2733$$

L'exemple de calcul de la résistance à la compression à 7 jours (R'₇) pour une éprouvette de béton 0/20 dont le dosage en ciment est 300 kg/m³ et C/E= 1,93 est présenté dans le tableau ci-après :

Tableau XVIIIbis : Détermination de la résistance à la compression à 7 jours (R'_7) au scléromètre : cas d'un béton 0/20 dont le dosage en ciment est 300 kg/m³ et C/E = 1.93 (les données figurent en annexe III-1)

Zone d'application du scléromètre	Face 1	Face 2	Zone d'application du scléromètre	Face 1	Face 2
lecture des indices (Is)	23	18	indices retenus(*)	23	rejeté
	20	25		20	25
	23	21		23	21
	23	24		23	24
	23	26		23	26
	21	24		23	26
	22	23		21	24
	24	23		22	23
	24	25		24	23
	26	29		24	25
	25	24		26	29
	24	27		25	24
	28	27		24	27
	26	26		28	27
	25	26		26	26
	25	35		25	26
	26	22		25	rejeté
	28	26		26	22
	23	27		28	26
	20	24		23	27
	25	24		20	24
	25	25		25	24
	23	24		25	25
	23	25		23	24
25	24	23	25		
25	25	25	24		
24	25	25	25		
24	25	24	25		
Moyenne des Is	24,04	24,96	Nouvelle Moyenne	24,04	24,84
Ecart type	1,99	2,92	Nouvel Ecart type	1,99	1,72
coef. Variation (%)	8,28	11,58	Nouvel coef. Variat. (%)	8,28	6,94
Résistance à la compression à 7 jours				17,07	18,05
Résistance moyenne à la compression à 7 jours				17,56	

(*) Les indices retenus sont ceux qui appartiennent à l'intervalle : [moyenne-5 ; moyenne+5].

Le même principe de calcul appliqué aux autres éprouvettes de béton donne les résultats résumés dans le tableau XIX ci-après :

Tableau XIX RESULTAT DES ESSAIS SCLEROMETRIQUES

Résistance à la compression du béton en fonction
du dosage en ciment, de l'affaissement et de l'âge

Béton 0/20

Age béton (j)	Paramètres	zone d'application	C=300 kg/m ³				C=350 kg/m ³				C=400 kg/m ³				
			Af= 2,4	Af= 7,9	Af= 20,9	Af= liquide	Af= 0,6	Af= 6	Af= 15	Af= 19,3	Af= 0,5	Af= 1,5	Af= 16	Af= 11	
7	moyenne des is	Face1	24,04	23,37	21,08	21,92	23,84	23,72	24,22	23,54	27,68	24,67	21,92	20,44	
		Face2	24,84	22,75	20,32	20,32	24,00	24,78	25,11	23,79	28,68	25,73	21,96	19,65	
	Ecart type	Face1	1,99	1,69	2,56	2,10	1,65	2,39	1,78	1,68	1,81	2,93	2,57	2,04	
		Face2	1,72	1,51	2,17	2,08	2,65	2,33	1,80	2,32	1,82	3,25	2,23	1,77	
	Coeff. de variation	Face1	8,28	7,23	12,17	9,58	6,92	10,07	7,36	7,13	6,54	11,87	11,72	10,00	
		Face2	6,94	6,64	10,70	10,22	11,02	9,39	7,19	9,76	6,34	12,65	10,14	9,03	
	R' ₇			17,56	15,90	13,11	13,61	16,93	17,33	17,84	16,62	22,25	18,50	14,56	12,36
	14	moyenne des is	Face1	26,04	25,30	23,41	24,20	25,43	24,26	26,83	23,84	27,81	26,36	25,71	23,08
Face2			26,80	25,08	21,50	21,91	24,90	26,61	26,54	25,44	28,78	26,20	25,59	22,77	
Ecart type		Face1	2,05	2,32	2,13	2,98	2,52	1,81	1,77	2,25	2,12	2,04	1,85	2,06	
		Face2	1,87	2,52	2,34	2,27	2,49	1,88	2,32	1,89	2,17	1,89	2,24	2,08	
Coeff. de variation		Face1	7,87	9,16	9,10	12,32	9,92	7,46	6,62	9,43	7,61	7,73	7,21	8,92	
		Face2	6,98	10,04	10,89	10,38	10,00	7,05	8,75	7,42	7,56	7,23	8,75	9,15	
R' ₁₄			20,02	18,49	15,18	15,90	18,45	18,80	20,35	17,82	22,36	19,84	19,06	15,73	
28		moyenne des is	Face1	30,52	27,26	24,65	24,08	28,16	26,76	27,91	27,00	31,48	28,00	27,64	24,56
	Face2		26,85	26,81	23,85	24,42	26,95	26,04	29,00	26,16	31,79	28,00	28,26	24,56	
	Ecart type	Face1	2,06	1,87	2,15	2,26	1,91	1,88	1,95	1,73	2,58	2,15	1,50	1,89	
		Face2	1,87	1,71	2,29	2,70	2,06	2,41	2,06	2,59	2,43	2,30	2,07	2,03	
	Coeff. de variation	Face1	6,76	6,87	8,73	9,40	6,78	7,01	6,99	6,42	8,20	7,69	5,41	7,69	
		Face2	6,96	6,38	9,61	11,06	7,64	9,24	7,12	9,91	7,65	8,20	7,32	8,25	
	R' ₂₈			22,93	20,79	17,33	17,34	21,46	19,99	22,61	20,22	26,79	22,02	21,96	17,71

Tableau XIX (fin) RESULTAT DES ESSAIS SCLEROMETRIQUES

Résistance à la compression du béton en fonction du dosage en ciment, de l'affaissement et de l'âge

Béton 0/25

Age béton (j)	Paramètres	zone d'application	C=300 kg/m ³				C=350 kg/m ³				C=400 kg/m ³			
			Af=	Af=	Af=	Af=	Af=	Af=	Af=	Af=	Af=	Af=	Af=	Af=
			1	2,6	9,7	21,6	2,1	11,4	20,4	20,9	6,1	11,9	18	20,8
7	moyenne des ls	Face1	26,47	20,14	19,08	16,33	26,32	24,05	22,21	23,43	30,76	28,78	24,07	24,38
		Face2	25,78	22,08	19,38	16,67	25,75	24,93	22,32	23,80	31,16	29,88	22,73	22,70
	Ecart type	Face1	2,67	2,03	1,47	1,49	2,53	2,61	2,30	2,73	2,46	2,97	2,59	2,52
		Face2	3,10	2,02	1,60	1,41	1,96	2,15	2,50	2,50	3,17	2,35	2,55	2,22
	Coeff. de variation	Face1	10,09	10,08	7,71	9,14	9,61	10,85	10,37	11,64	8,01	10,31	10,74	10,33
		Face2	12,02	9,15	8,26	8,49	7,62	8,61	11,18	10,50	10,16	7,87	11,21	9,80
	R'₇			19,65	13,60	11,43	8,40	19,54	17,62	14,95	16,57	25,89	23,74	16,31
14	moyenne des ls	Face1	31,59	26,35	19,75	21,14	26,89	26,30	22,40	24,71	33,73	29,44	24,26	24,27
		Face2	29,38	26,46	19,56	21,07	27,16	27,78	23,08	24,14	33,10	32,45	24,35	23,32
	Ecart type	Face1	2,65	2,10	1,73	2,42	2,49	2,71	2,22	2,79	2,76	2,71	2,26	2,27
		Face2	2,40	2,89	1,83	2,27	3,08	2,50	1,78	1,83	2,41	2,54	2,12	2,24
	Coeff. de variation	Face1	8,38	7,98	8,74	11,43	9,28	10,32	9,90	11,29	8,19	9,20	9,32	9,36
		Face2	8,17	10,92	9,34	10,77	11,33	9,01	7,70	7,60	7,27	7,84	8,72	9,60
	R'₁₄			25,27	20,00	11,91	13,58	20,78	20,80	15,51	17,54	29,20	25,89	17,40
28	moyenne des ls	Face1	32,30	26,00	22,36	24,00	29,90	28,50	24,36	28,04	34,42	30,68	25,00	24,50
		Face2	33,50	26,81	22,60	24,17	30,05	27,47	24,88	26,26	34,06	31,50	25,50	25,33
	Ecart type	Face1	2,75	2,13	2,63	2,50	2,28	3,42	2,69	1,97	2,22	2,38	2,71	2,70
		Face2	2,57	2,59	2,22	1,97	2,57	2,97	2,37	2,14	2,86	2,76	1,79	1,80
	Coeff. de variation	Face1	8,53	8,18	11,75	10,42	7,62	12,00	11,05	7,01	6,46	7,74	10,85	11,03
		Face2	7,67	9,67	9,81	8,16	8,55	10,81	9,52	8,15	8,39	8,76	7,04	7,10
	R'₂₈			28,50	20,00	15,20	17,30	24,59	22,01	17,79	20,94	30,34	26,06	18,56

III-7 DETERMINATION DU COEFFICIENT DE COMPACITE

III-7-1 Définition et procédé

Dans un volume de béton frais mis en œuvre, les matières solides (granulats et ciment) ne remplissent pas intégralement la totalité du volume du béton frais car il s'y trouve également de l'eau interstitielle et des bulles d'air.

Le coefficient de compacité (γ) est le rapport des volumes absolus des matières solides au volume total du béton frais mis en œuvre.

$$\gamma = \frac{V_{ms}}{V}$$

avec V_{ms} = volume absolu des matières solides.

V = volume total du béton frais

Le calcul de la compacité se fait en considérant les différentes compositions du béton par la méthode de D.G pour la confection des éprouvettes (confère Tableau XV) et du tableau XX ci-dessous donnant le dosage en eau réel pendant la fabrication du béton. Ce dosage en eau est le rapport du dosage en ciment par le paramètre C/E correspondant (confère tableau XVIII).

Tableau XX: Valeurs du dosage en eau réel en fonction de l'affaissement et du dosage en ciment, pour les bétons 0/25 et 0/20.

Dosage en C (kg/m ³)		300				350				400			
		1	2.6	9.7	21.6	2.1	11.4	20.4	20.9	6.1	11.9	18	20.8
Béton 0/25	(Aff. Cm)												
	Dosage en E (l/m ³)	136.36	150.00	162.16	187.50	152.17	184.21	192.31	201.15	180.18	190.48	197.73	208.33
Béton 0/20	Aff. (cm)	2.4	7.9	20.90	Luiq.	0.60	6	15.0	19.3	0.50	1.50	16	11
	Dosage en E (l/m ³)	155.51	174.67	194.59	240.00	152.00	167.40	179.58	196.63	148.15	164.41	200.00	216.22

Comme exemple de calcul de la compacité, prenons un béton 0/25 ayant un dosage en ciment de 300 kg/m³ pour un affaissement au cône d'Abrams égal à 2.60 cm.

La compacité est : $\gamma = \frac{V_{ms}}{V}$

Avec $V_{ms} = V_c + V_s + V_g$

V_c , V_s et V_g étant respectivement égal au volume absolu du ciment, du sable et du gravier (les valeurs des trois paramètres figurent dans le tableau XV)

$V_{ms} = \frac{300}{3.1} + 303.49 + 436.74 = 837.004$

$V = V_{ms} + V_e$

avec $V_e =$ volume de l'eau = 150,00 litres

La compacité est donc égale à $\gamma = \frac{837.004}{837.004 + 150.00} = 0.848$

En appliquant le même principe de calcul pour chaque dosage en ciment et affaissement, nous obtenons les résultats du tableau XXI ci-après :

Tableau XXI : Valeurs du coefficient de compacité (γ) en fonction de l'affaissement et du dosage en ciment, pour les bétons 0/25 et 0/20.

Dosage en C (kg/m3)		300				350				400			
		1	2.6	9.7	21.6	2.1	11.4	20.4	20.9	6.1	11.9	18	20.8
Béton 0/25	Aff. (cm)												
	Coef. de Comp. (γ)	0.860	0.848	0.820	0.806	0.849	0.822	0.816	0.812	0.830	0.820	0.815	0.809
Béton 0/20	Aff. (cm)	2.4	7.9	20.90	Luiq.	0.60	6	15.0	19.3	0.50	1.50	16	11
	Coef. de Comp. (γ)	0.843	0.827	0.811	0.777	0.846	0.833	0.823	0.809	0.849	0.836	0.807	0.794

III-7-2 L'analyse des résultats

III-7-2-1 Constat général

- Béton 0/25:

Pour les affaissements voisins (de l'ordre de 2 cm par exemple pour des dosages en ciment de 300 et 350 kg/m³), nous constatons que la compacité varie très peu. Il en est de même

pour les affaissements de l'ordre de 20 cm. Pour les dosages 350 et 400 kg/m³, le même constat se dégage quand les affaissements sont voisins.

- Béton 0/20 :

cette tendance est aussi constatée malgré la disparité des affaissements obtenus.

Nous pouvons pour l'instant dire que la variation du coefficient de compacité des bétons étudiés dépend très peu du dosage en ciment. Ce qui nous amène donc à vérifier l'adaptabilité de la correction de la compacité $\left(\frac{C-350}{5000}\right)$ proposée par M^r DREUX lorsque le dosage en ciment est différent de 350 kg/m³.

III-7-2-2 Compatibilité du terme correctif $\left(\frac{C-350}{5000}\right)$ de la compacité

Nous choisissons de tracer les courbes illustrant globalement la variation de la compacité des bétons étudiés en fonction de l'affaissement et du dosage en ciment afin de mieux apprécier les écarts de compacité en fonction du dosage en ciment.

Les courbes obtenues sont à la figure 2 (béton 0/25) et à la figure 3 (béton 0/20).

La meilleure appréciation de la correction est faite en considérant les résultats issus du béton 0/25 qui est la base de méthode de composition du béton selon D.G.

Figure 2: Courbe de compacité en fonction de l'affaissement et du dosage en ciment.
(Béton 0/25)

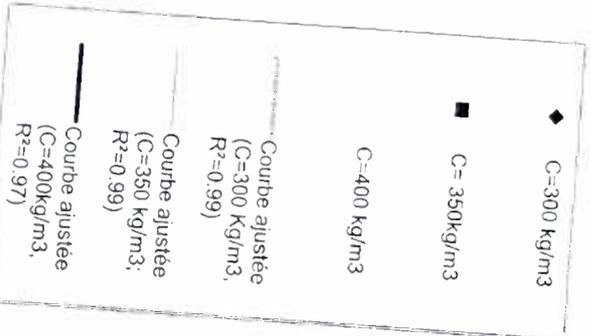
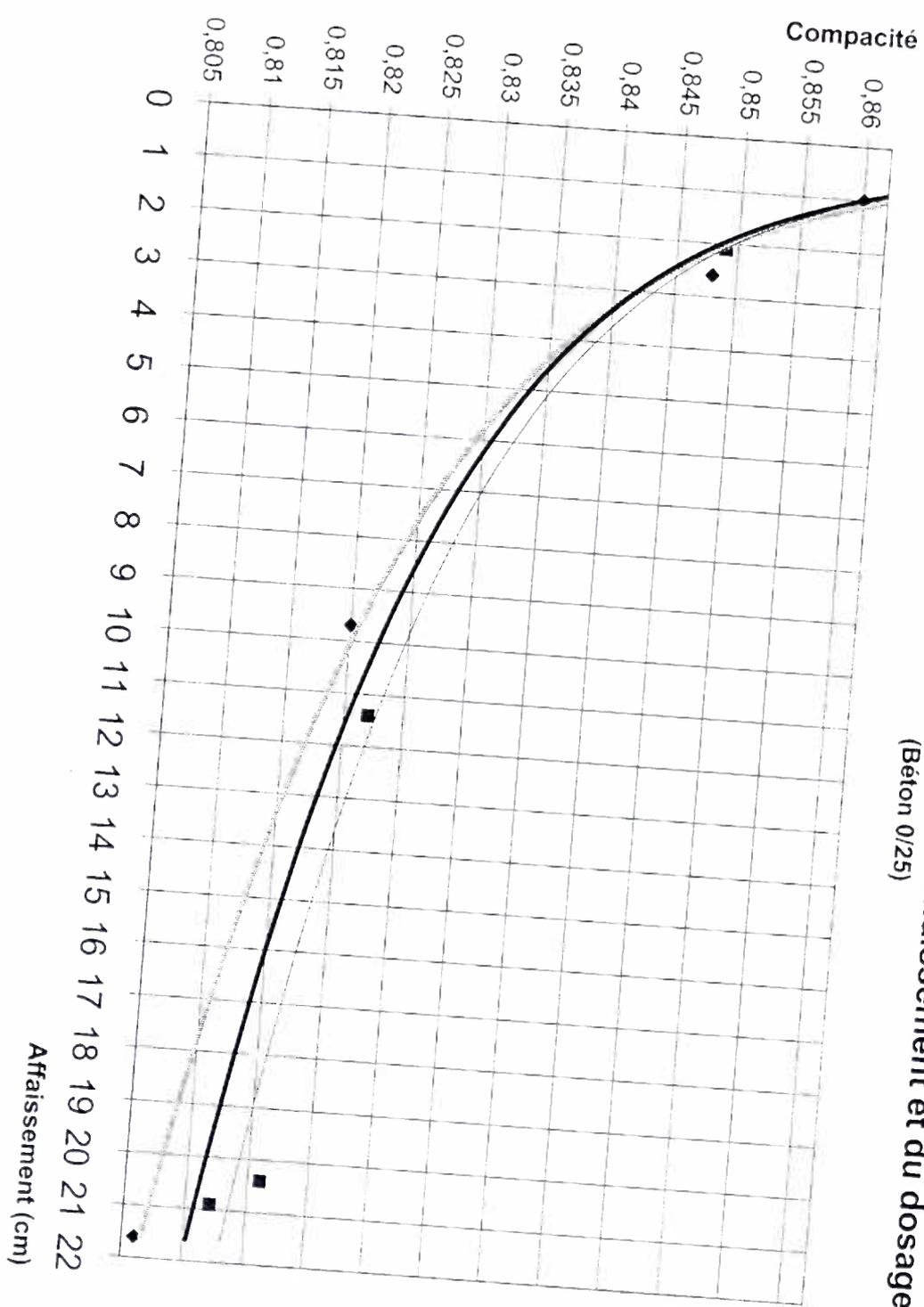
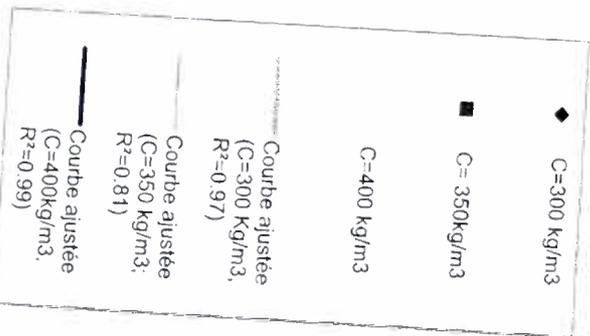
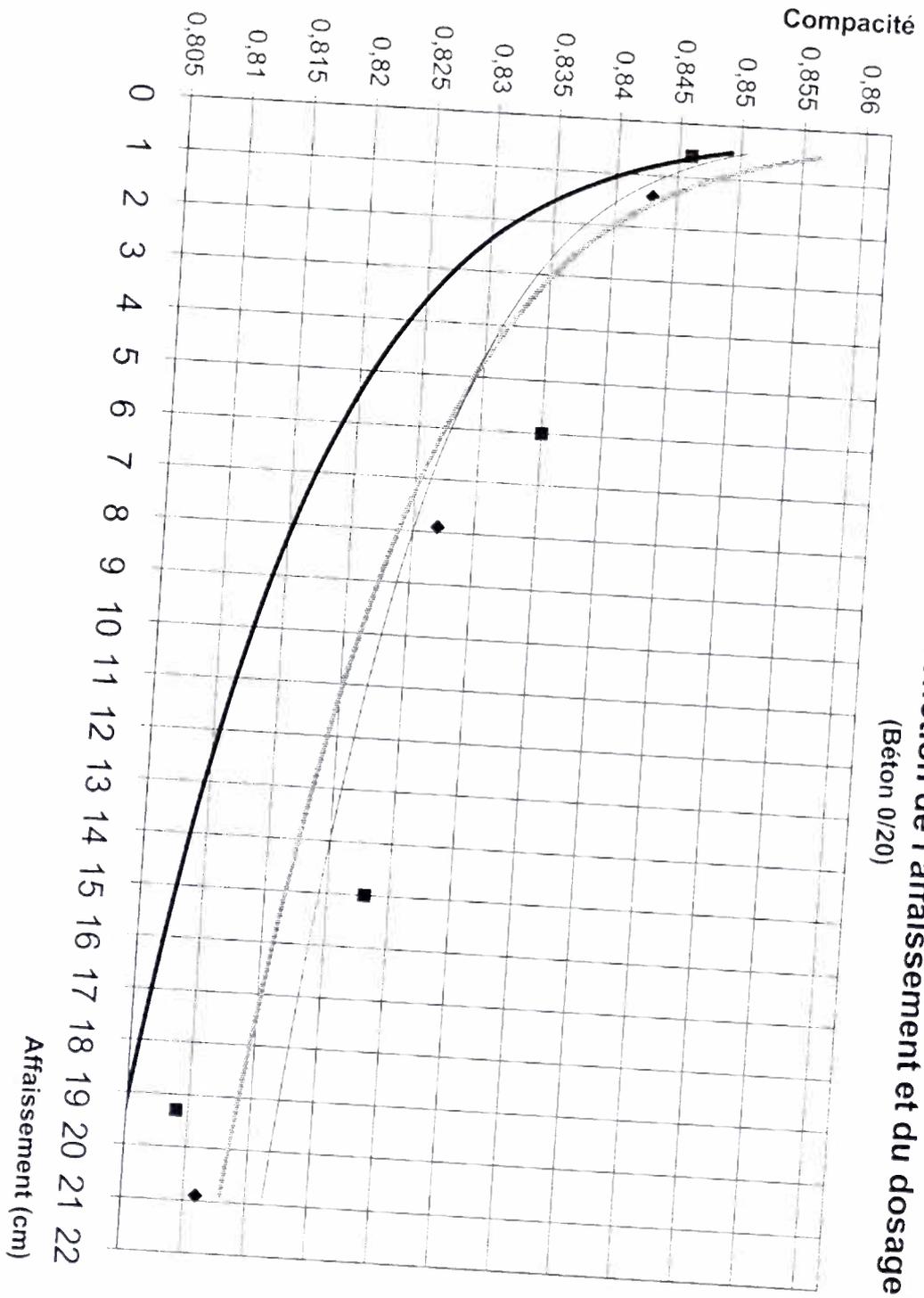


Figure 3: Courbe de compacité en fonction de l'affaissement et du dosage en ciment.
(Béton 0/20)



Nous constatons sur la figure 2 et 3 que les compacités pour un dosage en ciment de 350 kg/m³ sont plus élevées que celles du dosage en ciment de 400 kg/m³. Cette anomalie apparente peut être liée aux proportions des granulats (sable et gravier).

En effet, la compacité d'un béton est liée aussi au rapport GRAVIER/SABLE. Plus ce rapport est optimum plus nous avons un béton de meilleure qualité. Pour la méthode de D.G on approche ce rapport sans pourtant le connaître. Il n'est donc pas exclu que pour certains dosages, les compositions ainsi calculées s'écartent plus ou moins de celles conduisant à la compacité maximale.

A noter que ces courbes ont été tracées à l'aide du logiciel Excel et pour avoir avec précision les compacités, nous avons ressorti les équations des courbes :

Pour béton 0/25 :

$$\text{Quand } C=300 \text{ kg/m}^3 : \gamma = 0,8622.A^{(-0,0217)}$$

$$C=350 \text{ kg/m}^3 : \gamma = 0,8605.A^{(-0,0185)}$$

$$C=400 \text{ kg/m}^3 : \gamma = 0,8601.A^{(-0,0194)}$$

Pour béton 0/20

$$\text{Quand } C=300 \text{ kg/m}^3 : \gamma = 0,8481.A^{(-0,0139)}$$

$$C=350 \text{ kg/m}^3 : \gamma = 0,8441.A^{(-0,011)}$$

$$C=400 \text{ kg/m}^3 : \gamma = 0,8406.A^{(-0,0147)}$$

Les valeurs des compacités obtenues à l'aide des équations ci-dessus figurent dans le tableau XXII ci-après.

Tableau XXII : Variation de la compacité en fonction du dosage en ciment et de la consistance du béton.
- Béton 0/25

Consistance Du béton	Affaissement A en cm	Compacité				
		C = 350 kg/m ³	C = 300 kg/m ³		C = 400 kg/m ³	
			Compacité	Ecart (*)	Compacité	Ecart (*)
Ferme	1	0,861	0,862	-0,002	0,860	0,000
	5	0,835	0,833	0,003	0,834	0,002
Plastique	6	0,832	0,829	0,003	0,831	0,002
	10	0,825	0,820	0,004	0,823	0,002
Mou	11	0,823	0,818	0,005	0,821	0,002
	15	0,818	0,813	0,005	0,816	0,002
Moyenne des écarts				0,003108		0,001724

Béton 0/20

Consistance Du béton	Affaissement A en cm	Compacité				
		C = 350 kg/m ³	C = 300 kg/m ³		C = 400 kg/m ³	
			Compacité	écart (*)	Compacité	écart (*)
Ferme	1	0,844	0,848	-0,004	0,841	0,003
	5	0,829	0,829	0,000	0,821	0,008
Plastique	6	0,828	0,827	0,000	0,819	0,009
	10	0,823	0,821	0,002	0,813	0,010
Mou	11	0,822	0,820	0,002	0,811	0,011
	15	0,819	0,817	0,003	0,808	0,012
Moyenne des écarts				0,000388		0,008876

(*) Il s'agit de l'écart entre les compacités pour le dosage en ciment (C) concerné et pour le dosage en ciment = 350 kg/m³

La méthode de composition du béton selon D.G étant basée sur un béton 0/25, l'appréciation de la correction à apporter à la compacité est faite en considérant les résultats de ce béton figurant dans le tableau ci-dessus.

Considérons γ_r la valeur de la correction et posons : $\gamma_r = \frac{C-350}{k}$.

Si C=300 kg/m³ : $\gamma_r = 0,003108$

$$0,003108 = \frac{C-350}{k}, \text{ on trouve } k = 16\ 087,52$$

Si C=400 kg/m³ : $\gamma_r = 0,001724$

$$0,001724 = \frac{C-350}{k}, \text{ on trouve } K = 23\ 201,86$$

La moyenne du coefficient K vaut :

$$K_{\text{moy}} = \frac{16087,52+23201,86}{2} = 19645.$$

Nous considérons K=19 000 pour être dans le sens de sécurité.

Pour un dosage en ciment différent de 350 kg/m^3 , nous proposons donc le terme correctif de $\frac{C-350}{19000}$ qui paraît adapté plutôt que $\frac{C-350}{5000}$ de D.G que nous trouvons très élevé.

Le terme correctif adapté donne des corrections de l'ordre de $2 \cdot 10^{(-3)}$ à $5 \cdot 10^{(-3)}$ quand le dosage en ciment passe de 400 à 250 kg/m^3 alors que celui de D.G. donne des corrections de l'ordre de $10^{(-2)}$ à $2 \cdot 10^{(-2)}$ pour le même intervalle de dosage en ciment.

A noter que, compte tenu de la forte compacité du béton quand $C = 350 \text{ kg/m}^3$, Cette correction se fait toujours dans le sens de la diminution, même si C est supérieur à 350 kg/m^3 .

A noter que le même constat a été fait en Côte d'Ivoire, où il est d'ailleurs proposé de négliger le terme correctif.

III-7-2-3 valeurs moyennes du coefficient de compacité

Nous considérons le tableau XXI pour déterminer les coefficients de compacité à retenir en fonction de la consistance du béton.

Ces coefficients sont les moyennes des coefficients de compacité pour chaque consistance donnée. Si nous prenons l'exemple du béton 0/25 ; pour $C=350 \text{ kg/m}^3$ et pour une consistance ferme :

$$\gamma = \frac{0.861+0.835}{2} = 0.848 \approx 0.850$$

La vibration étant faite avec une aiguille vibrante, le mode de serrage peut être considéré normale.

Tableau XXIII Valeurs du coefficient de compacité γ
(vibration normale)

Consistance du béton	Coefficient de compacité (γ)	
	D= 25 mm	D=20 mm
Ferme	0,850	0.835
Plastique	0,830	0,825
Molle	0,820	0,820

III-8 RELATION ENTRE LE DOSAGE EN CIMENT, LE DOSAGE EN EAU ET L'AFFAISSEMENT AU CÔNE D'ABRAMS

Les résultats des essais consignés dans le tableau XVIII comportent pour chaque type de béton et pour un dosage en ciment (C) donné, l'évolution de l'affaissement au cône d'Abrams en fonction du rapport C/E.

A partir des valeurs issues du béton 0/25 et par ajustement des nuages de points obtenus présentés à la figure 4, nous construisons l'abaque de la figure 5 donnant pour chaque dosage en ciment, l'évolution de l'affaissement en fonction de C/E.

Figure 4: Ajustement pour l'élaboration de l'abaque de détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport C/E

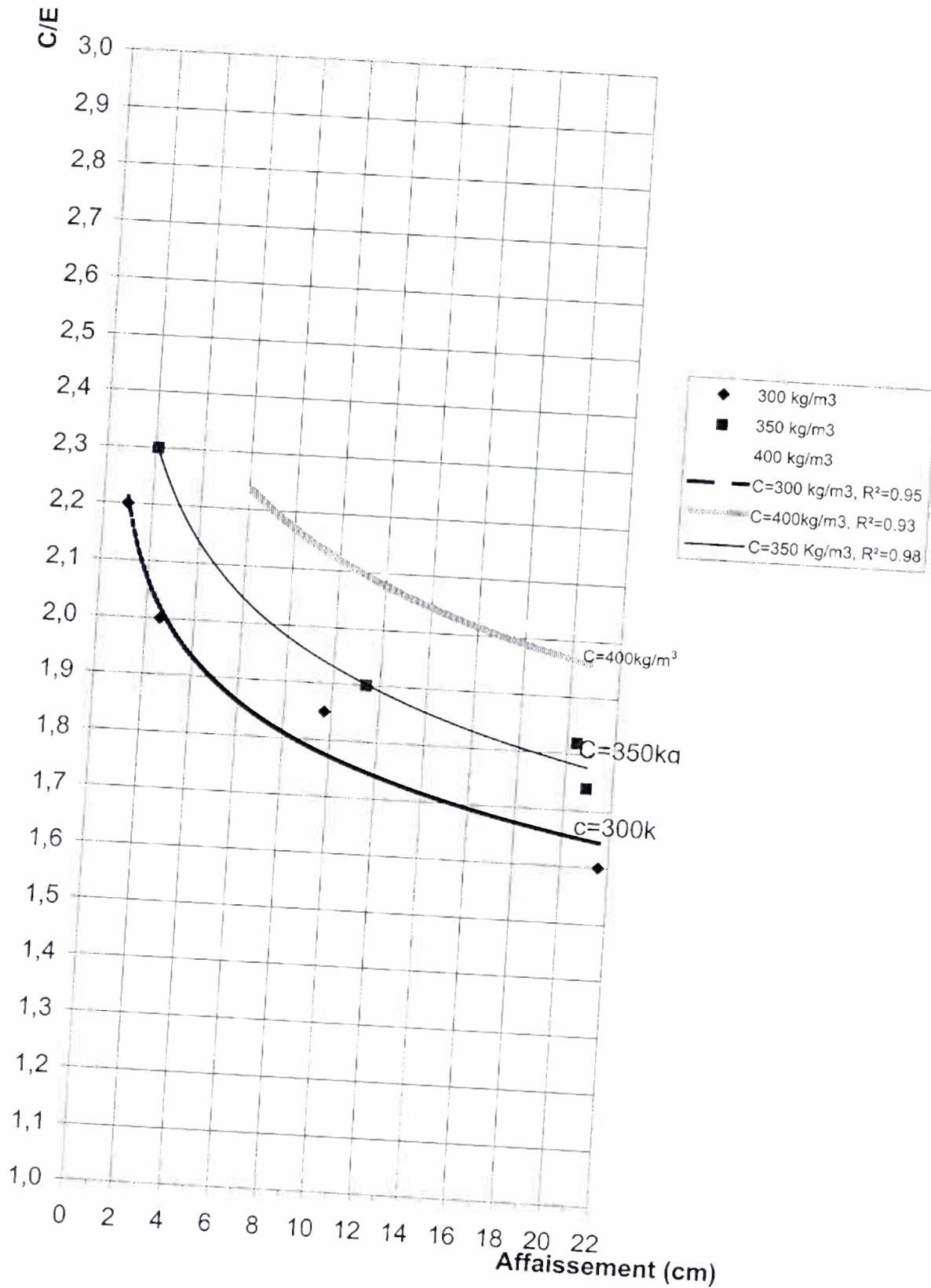
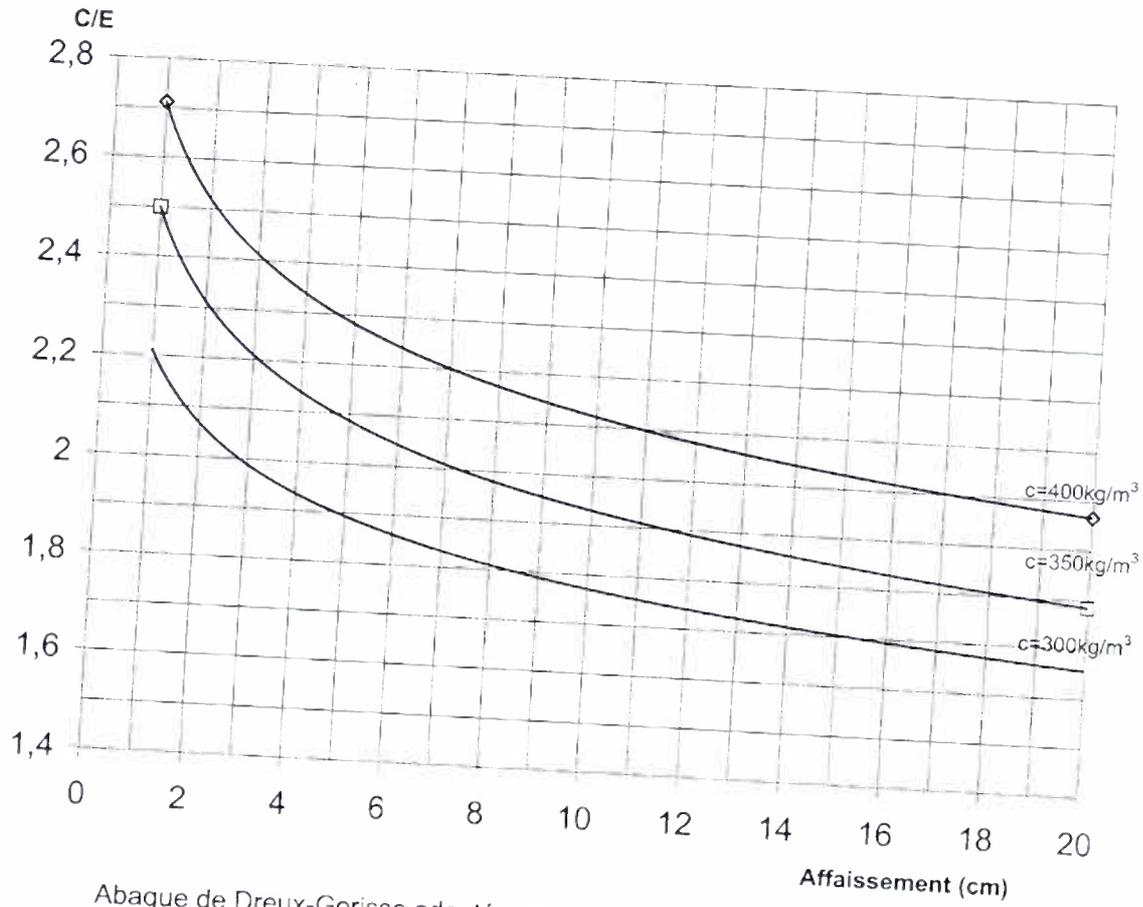


Figure 5

détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport C/E



Abaque de Dreux-Gorisse adapté aux matériaux du Burkina

III-9 LE COEFFICIENT GRANULAIRE ET LA FORMULE DE BOLOMEY

Rappelons que le coefficient granulaire est le terme G de la formule de Bolomey qui s'écrit :

$$R'_{28} = G \cdot \sigma_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

Il caractérise le comportement du granulat dans le béton lorsque celui-ci est soumis à l'essai de compression. Nous pouvons dire que sa valeur est représentative à la fois de la dureté et de l'adhérence du granulat.

Les résistances à la compression à 28 jours (R'_{28}) sont mesurées sur des éprouvettes de la gâchée d'essai. Ces mesures se font par compression axiale sur les éprouvettes cylindriques droits de révolution dont la hauteur est le double du diamètre (voir résultats dans le tableau XVIII). Les éprouvettes cylindriques employées sont de 16 (diamètre égale à 15,96 cm) dont la section est de 200 m².

La classe vraie de ciment étant connue à partir des essais sur le ciment, les valeurs du paramètre C/E entrant dans la formule de Bolomey étant aussi fixées pendant les essais et consignées dans le tableau XVIII, nous pouvons rechercher le coefficient granulaire, en considérant la formule de Bolomey comme une équation de droite dont C/E est la variable.

$$R'_{28} = G \cdot \sigma_c \cdot \frac{C}{E} - 0.50 \cdot G \cdot \sigma_c$$

Cette équation permet de construire des courbes des figures 6 et 7 donnant la résistance à la compression en fonction du rapport C/E pour des bétons ayant des granulats de dimension maximale 20 mm et 25 mm, avec des dosages en ciment de 300, 350, et 400 kg/m³. Le paramètre C/E balaie un intervalle permettant le passage du béton de état ferme à l'état liquide.

Figure 6:
RESISTANCE A LA COMPRESSION A 28 JOURS EN FONCTION
DE C/E
Béton 0/20

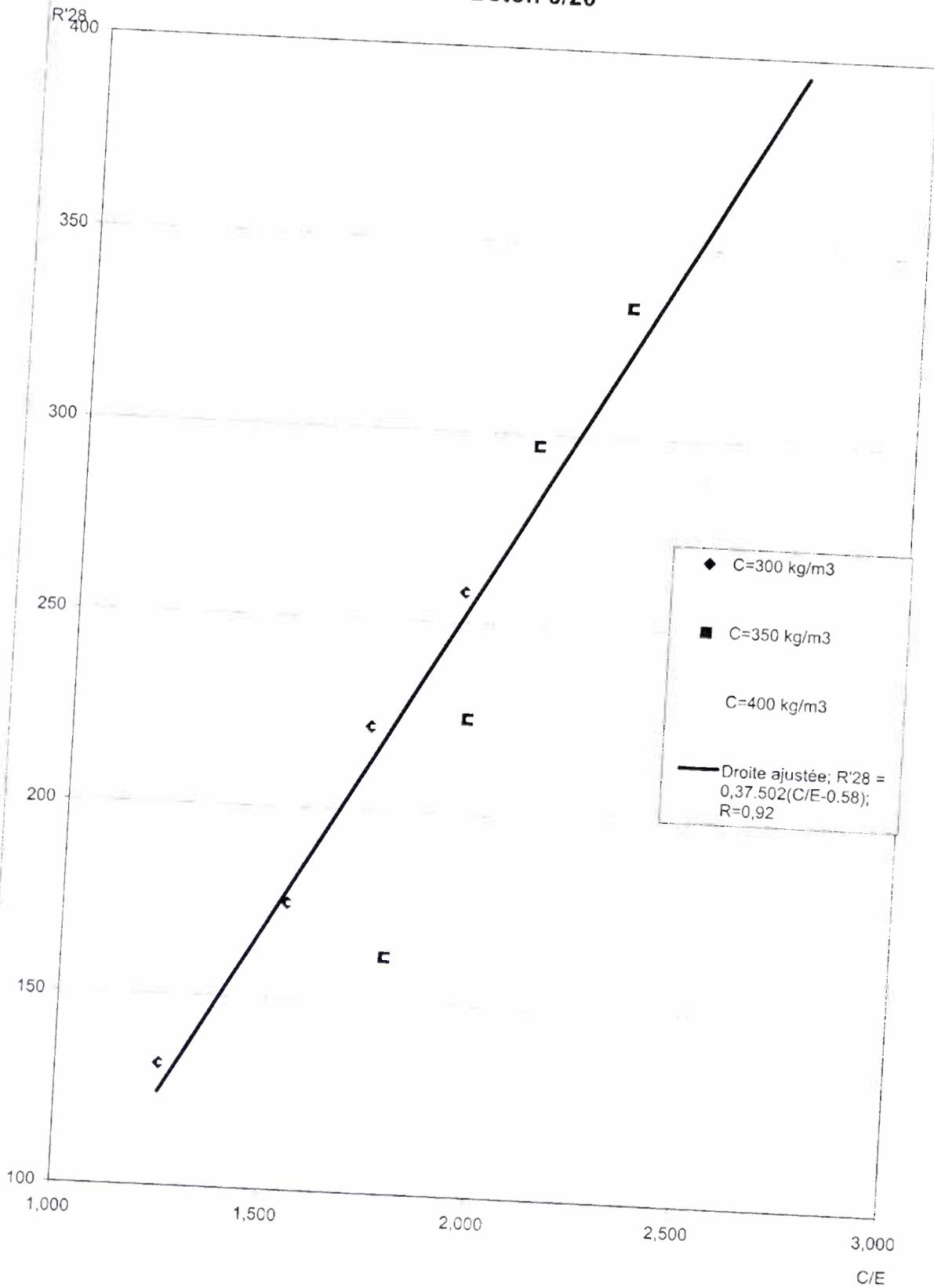
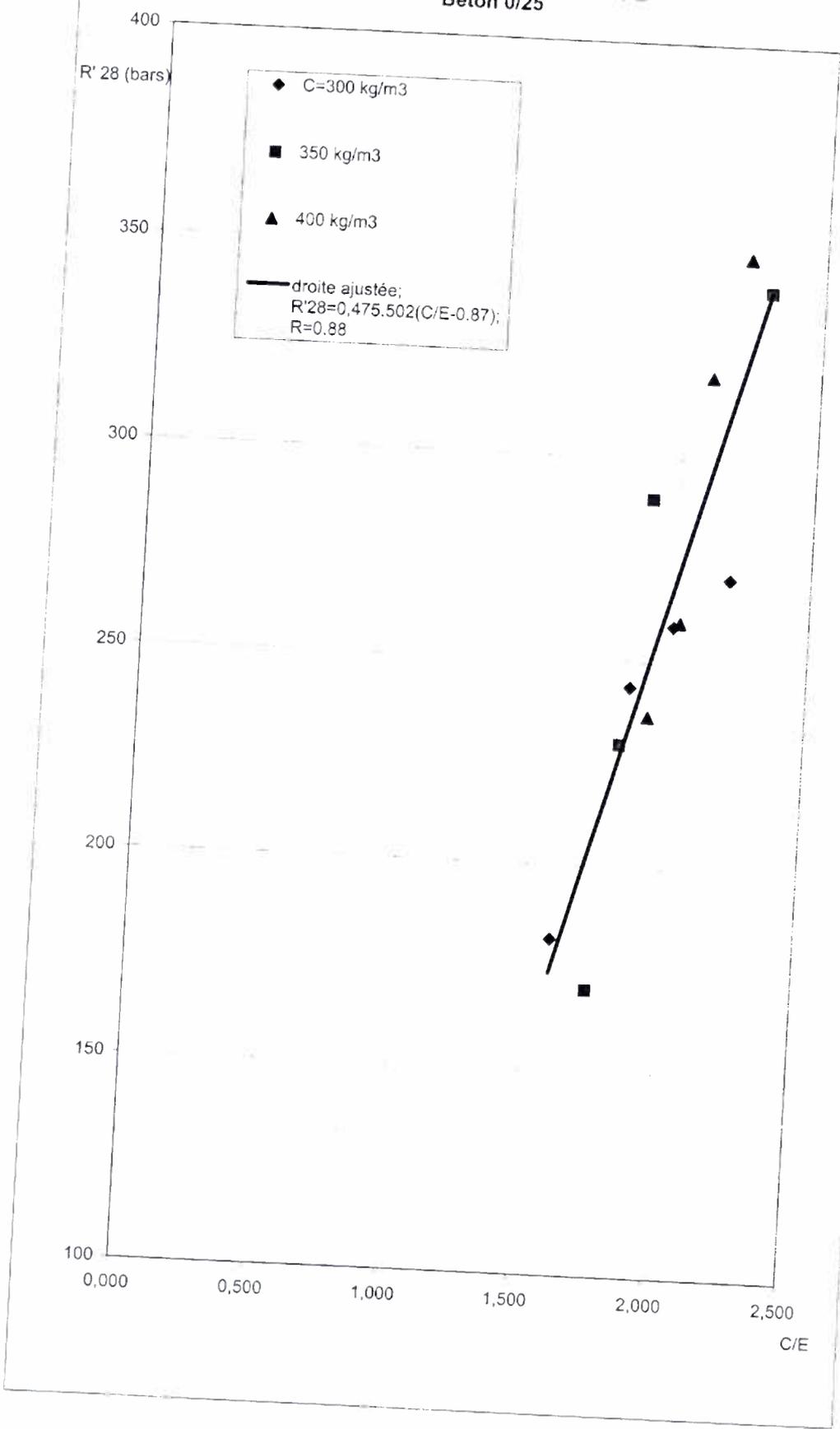


Figure 7
RESISTANCE A LA COMPRESSION A 28 JOURS EN FONCTION DE
L'AGE *de C/E*
Béton 0/25



L'équation liant R'_{28} au paramètre C/E étant

$$R'_{28} = G \cdot \sigma'_c \cdot \frac{C}{E} - 0.50 \cdot G \cdot \sigma'_c$$

La pente de la droite issue de cette équation est $G \cdot \sigma'_c$.

L'ordonnée à l'origine ($-0.50 \cdot G \cdot \sigma'_c$) permet de déterminer le coefficient granulaire pour $D = 20$ mm et $D = 25$ mm.

Le logiciel Excel donne à partir de la figure 6 (béton 0/20) une équation :

$$R'_{28} = 186,72 \cdot \frac{C}{E} - 108,9$$

$$R'_{28} = 186,72 \left(\frac{C}{E} - 0,58 \right)$$

En introduisant la classe vraie du ciment obtenue à partir les essais mécaniques de rupture par compression sur pâte de ciment et consignée dans le tableau XIV ($\sigma'_c = 502$ bars) R'_{28} devient:

$$R'_{28} = 0,37 \cdot 502 \left(\frac{C}{E} - 0,58 \right)$$

Nous déduisons donc le coefficient granulaire d'un granulat quartzique de $D = 20$ mm approximativement égal à 0,37

De la même manière la figure 7 (Béton 0/25) donne :

$$R'_{28} = 238,49 \cdot \frac{C}{E} - 207,74$$

$$R'_{28} = 238,49 \left(\frac{C}{E} - 0,87 \right); \text{ avec } \sigma'_c = 502 \text{ bars on a :}$$

$$R'_{28} = 0,48 \cdot 502 \left(\frac{C}{E} - 0,87 \right)$$

Nous déduisons donc la valeur approximative du coefficient granulaire, d'un granulat quartzique de dimension $D = 25$ mm, égale à 0.48

La méthode de composition de D.G étant calée sur les granulats de $D = 25$ mm, nous pouvons considérer la formule Bolomey comme l'équation issue du béton 0/25, c'est à dire :

$$R'_{28} = G \cdot \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,87 \right)$$

En résumé, le coefficient granulaire des granulats quartziques est :

- 0.37 si $D = 20$ mm
- 0.48 si $D = 25$ mm

La formule de Bolomey adaptée à ce matériau est :

$$R'_{28} = G \cdot \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,87 \right)$$

III-10 ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON EN FONCTION DE L'AGE

III-10-1 Observation générale

Le tableau XVIII du paragraphe IV-6-5-3 donnant la résistance à la compression au scléromètre en fonction de l'âge et de l'affaissement au cône peut se résumer ainsi :

Tableau XXIV Résistance à la compression du béton en fonction de l'âge.
(issue des essais sclérométriques)

Béton 0/20

AGE	C= 300 kg/m ³				C=350 kg/m ³				C=400 kg/m ³				Moyenne		
	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C=	C=	C=
	1,93	1,72	1,54	1,25	2,30	2,09	1,95	1,78	2,70	2,433	2,00	1,85	300	350	400
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	17,56	15,90	13,11	13,61	16,93	17,33	17,84	16,62	22,25	18,50	14,56	12,36	15	17,2	16,9
14	20,02	18,49	15,18	15,90	18,45	18,80	20,35	17,82	22,36	19,84	19,06	15,73	17,4	18,9	19,2
28	22,93	20,79	17,33	17,34	21,46	19,99	22,61	20,22	26,79	22,02	21,96	17,71	19,6	21,1	22,1
R'7/R'28 %	77	76	76	78	79	87	79	82	83	84	66	70	77	82	76
R'14/R'28 %	87	89	88	92	86	94	90	88	83	90	87	89	89	89	87

Béton 0/25

AGE	C= 300 kg/m ³				C=350 kg/m ³				C=400 kg/m ³				Moyenne		
	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C/E=	C=	C=	C=
	2,20	2,00	1,85	1,60	2,30	1,90	1,82	1,74	2,22	2,100	2,02	1,92	300	350	400
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	19,65	13,60	11,43	8,40	19,54	17,62	14,95	16,57	25,89	23,74	16,31	16,48	13,3	17,2	20,6
14	25,27	20,00	11,91	13,58	20,78	20,80	15,51	17,54	29,20	25,89	17,40	16,78	17,7	18,7	22,3
28	28,50	20,00	15,20	17,30	24,59	22,01	17,79	20,94	30,34	26,06	18,56	18,15	20,3	21,3	23,3
R'7/R'28 %	69	68	75	49	79	80	84	79	85	91	88	91	66	80	89
R'14/R'28 %	89	100	78	78	85	95	87	84	96	99	94	92	87	87	96

A partir du tableau XXIV ci-dessus, nous construisons des courbes de la figures 8 illustrant la variation de la résistance à la compression (R'_j) en fonction de l'âge.

Figure 8
VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON 0/25
EN FONCTION DE L'AGE
 (R'_j est déterminée avec les essais sclérométriques)

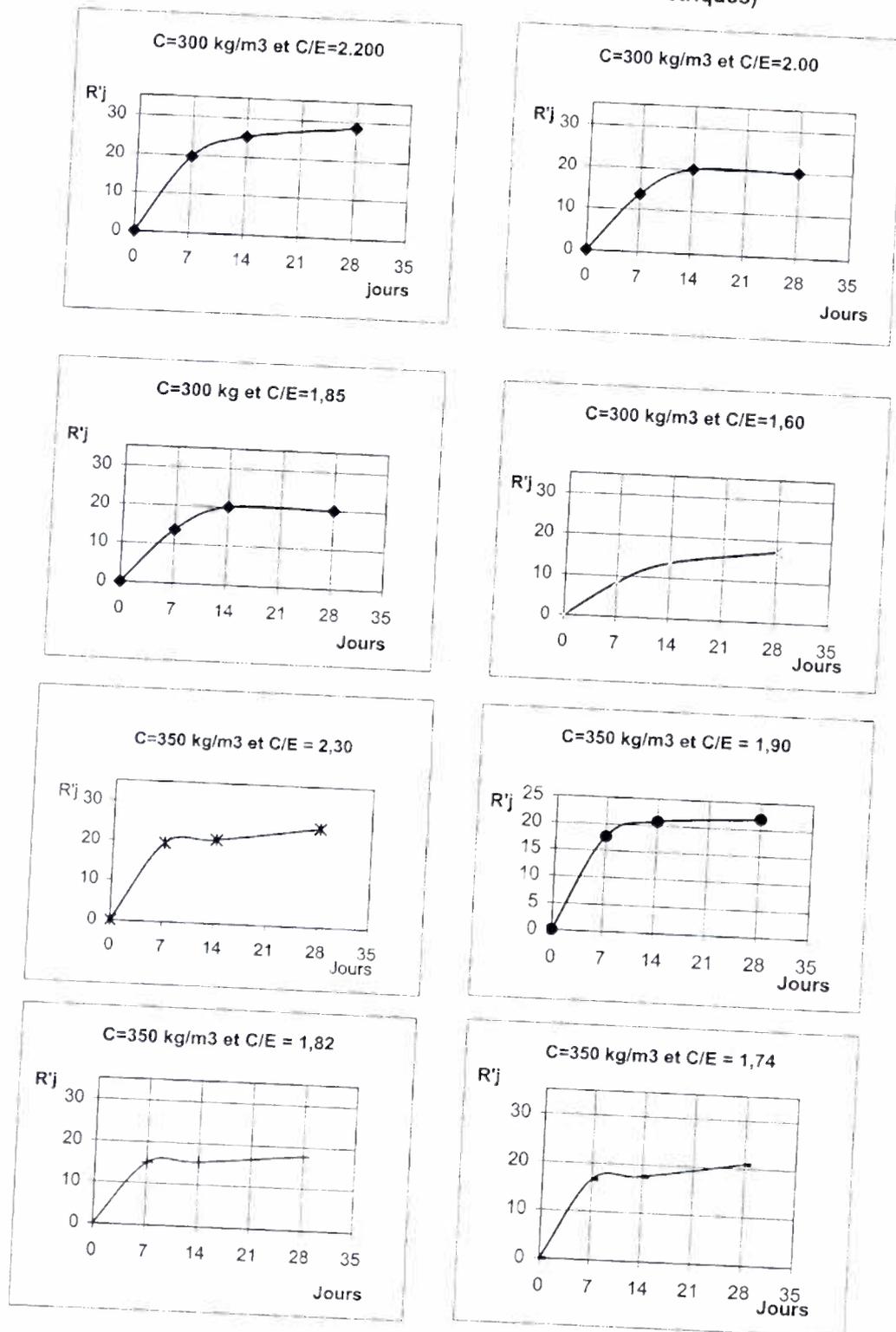
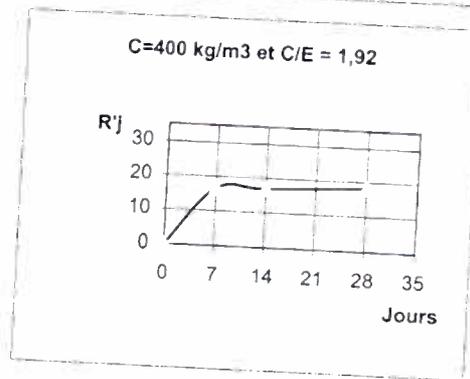
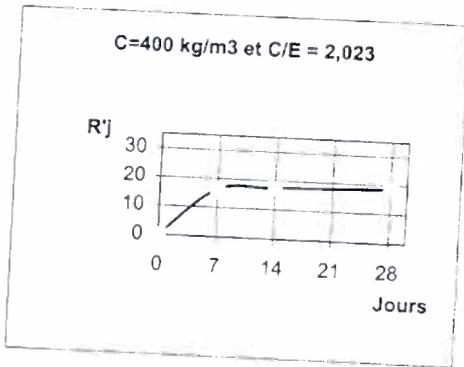
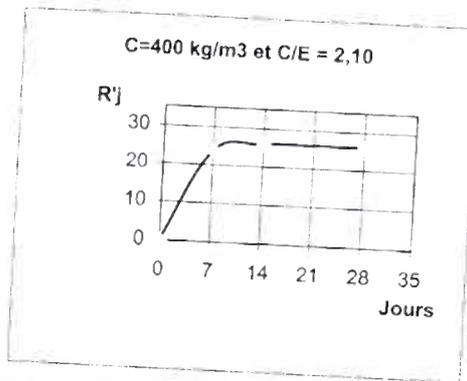
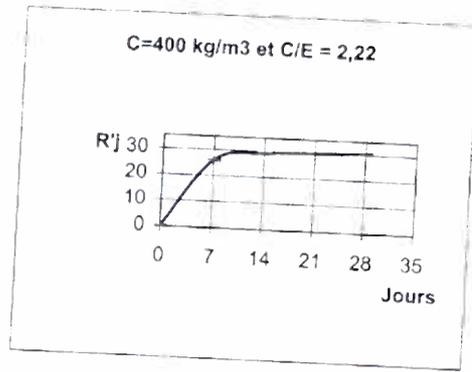


Figure 8 (suite)



En observant les moyennes des rapports $\frac{R'7}{R'28}$ et $\frac{R'14}{R'28}$ figurant dans le tableau XXIV et l'allure des courbes, nous constatons que globalement 70% de la résistance à la compression du béton est atteint dès l'âge de sept jours, plus de 80% dès l'âge de 14 jours. Nous constatons également qu'au delà d'une semaine d'âge, l'accroissement de R'_j devient faible et tant à se stabiliser.

Ce constat permet, dès que l'on a la résistance à la compression à 7 jour, d'estimer celle de 28 jours quand on ne dispose de temps. Au jeune âge du béton, il est alors possible de savoir à partir des essais sclérométriques si la résistance souhaitée sera atteinte.

III-10-2 L'influence du dosage en eau et en ciment

Quand le dosage en ciment est constant, le paramètre $\frac{C}{E}$ diminue si le dosage en eau augmente.

Dans le tableau XXIV ci-dessus, nous constatons dans la plus part des cas que la résistance à la compression diminue quand le paramètre $\frac{C}{E}$ diminue pour un dosage en ciment constant. Ce constat se justifie par les courbes des figures 8. Signalons que la résistance maximale peut ne pas être atteinte lorsque le dosage en eau est très faible ; aussi nous pouvons constater par endroit, l'augmentation de R'_j quand $\frac{C}{E}$ diminue.

Les moyennes des résistances à la compression en fonction du dosage en ciment consignées dans le même tableau XXIV ont servi à construire les courbes des figures 9 ci-dessous donnant R'_j en fonction de l'âge et du dosage en ciment. Nous constatons sur ces courbes que lorsque le dosage en ciment est élevé, la résistance à la compression l'est aussi.

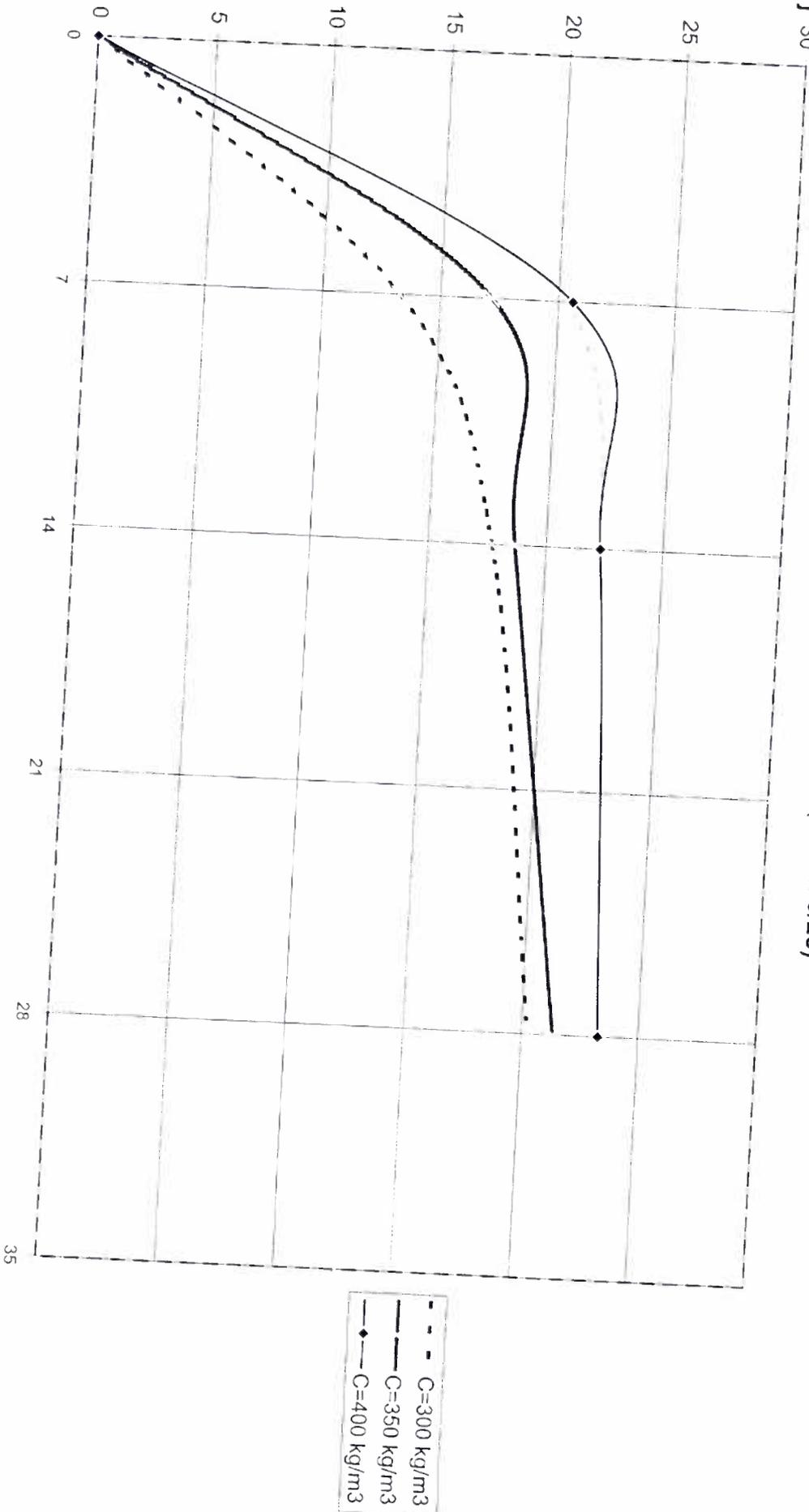
La résistance décroît donc en même que temps que le dosage en eau et croît en fonction du dosage en ciment ; c'est pourquoi l'on a tendance à prendre en compte le rapport $\frac{C}{E}$ comme facteur global intervenant dans la résistance du béton. Ces deux paramètres (ciment et eau) doivent être dosés de manière à obtenir une bonne ouvrabilité tout en conservant une résistance convenable.

A noter que ce constat confirme les observations D.G dans son ouvrage nouveau guide de béton.

III-10-3 L'influence de la dimension maximale du granulat

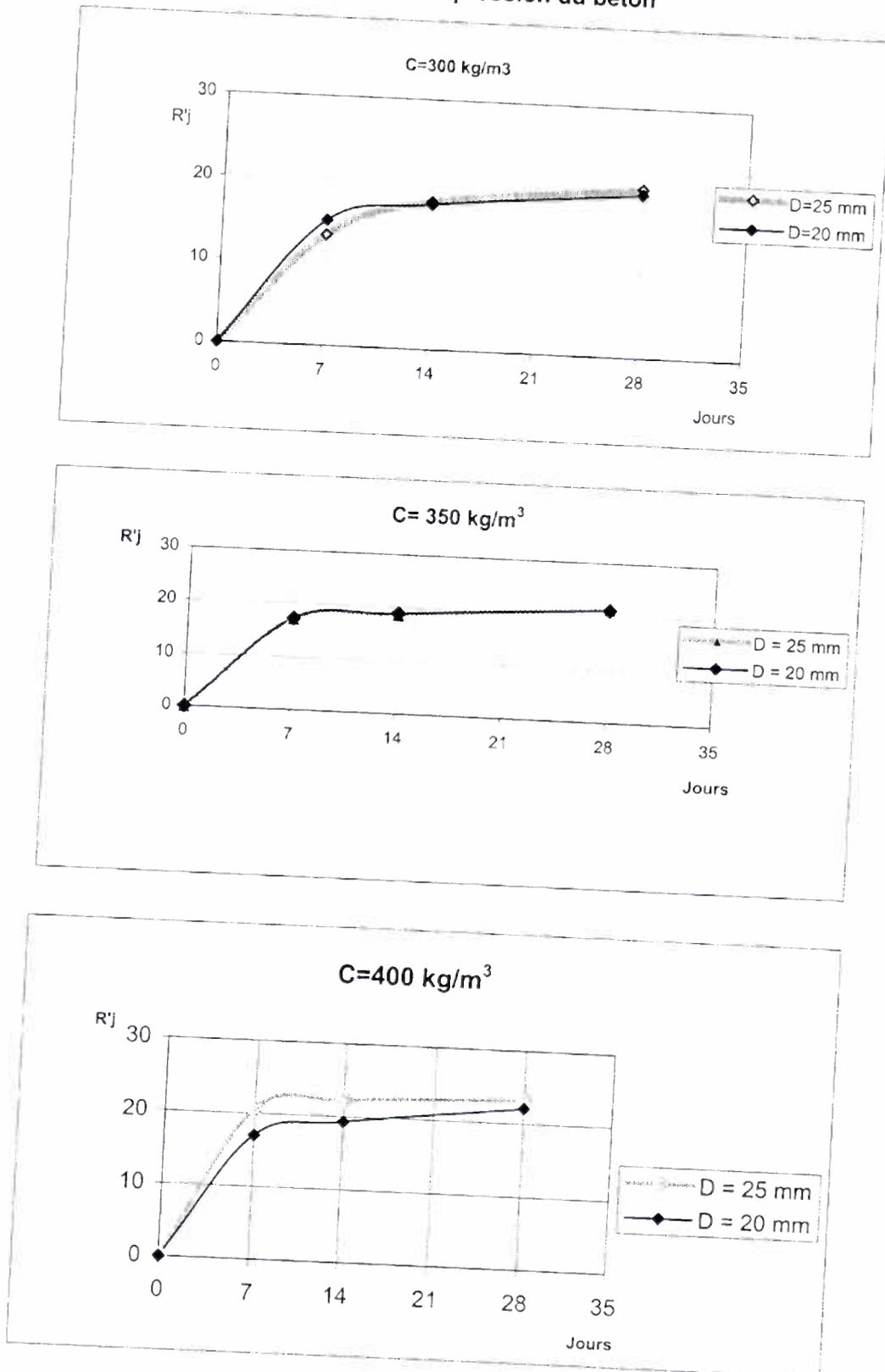
A partir des courbes de la figure 10 ci-dessous, obtenues à l'aide des données du tableau XXIV ci-dessus, nous constatons que pour un même dosage en ciment, R'_j est élevée si la dimension maximale D du granulat est plus grande ; ce qui justifie l'affirmation de Mr Dreux au paragraphe I-2-1-1.

Figure 9
COURBES DONNANT LA RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DE L'AGE ET DU
DOSAGE EN CIMENT (Béton 0/25)



Jours

Figure 10 :
influence de la dimension maximale du granulat sur la résistance
à la compression du béton



III-11 COMPARAISON DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION AU SCLEROMETRE ET A L'ECRASEMENT

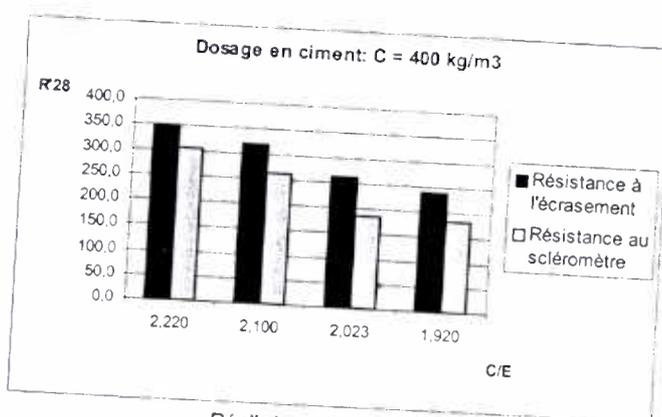
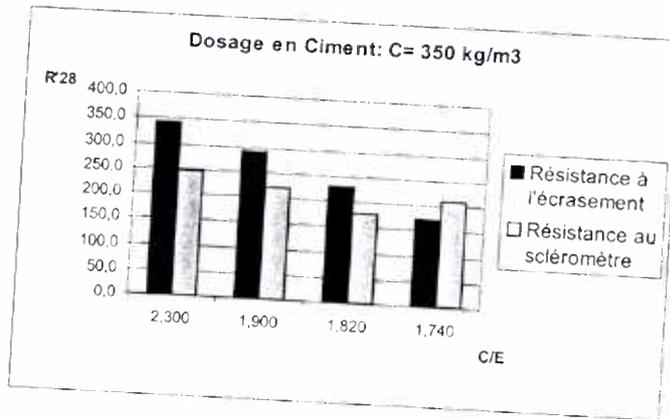
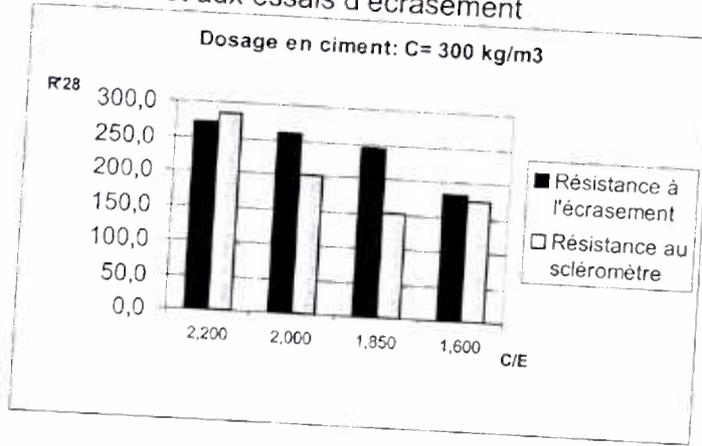
Pour une meilleure comparaison, nous introduisons les résistances à la compression à 28 jours ($R_s'28$) obtenues par les essais sclérométriques dans le tableau XVI pour obtenir le tableau XXV ci-dessous.

Tableau :XXV Résistance à la compression à 28 jours au scléromètre ($R_s'28$) et au test d'écrasement ($R'28$) en fonction du dosage en ciment, de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams

DOSAGE EN C (kg/m ³)		C = 300 kg/m ³				C = 350 kg/m ³				C = 400 kg/m ³			
BETON 0/20	$R_s'28$ (bars)	229,3	207,9	173,3	173,4	214,6	199,9	226,1	202,2	267,9	220,2	219,6	177,1
	$R'28$ (bars)	258,0	222,0	175,0	132,0	334,0	297,0	225,0	162,0	374,0	347,0	332,0	231,0
	C/E	1,930	1,720	1,540	1,250	2,300	2,090	1,950	1,780	2,700	2,433	2,000	1,850
	A	2,4	7,9	20,9	Excès	0,6	6	15	19,3	0,5	1,5	16	11*
	$R_s'28$ (bars)	285,0	200,0	152,0	173,0	245,9	220,1	177,0	209,4	303,4	260,6	185,6	181,5
BETON 0/25	$R'28$ (bars)	271,0	259,0	244,0	182,0	341,0	290,0	230,0	170,0	349,0	320,0	260,0	237,0
	C/E	2,200	2,000	1,850	1,600	2,300	1,900	1,820	1,740	2,220	2,100	2,023	1,920
	A	1	2,6	9,7	21,6	2,1	11,4	20,4	21	6,1	11,9	18	20,8
	$R_s'28$ (bars)	285,0	200,0	152,0	173,0	245,9	220,1	177,0	209,4	303,4	260,6	185,6	181,5

A partir du tableau XXV ci-dessus nous construisons les histogrammes pour le béton 0/20 par exemple pour mieux illustrer les résistances issues des deux essais.

Figure 11 : comparaison de la résistance à la compression à 28 jours au scléromètre et aux essais d'écrasement



Réalisé par Sayibou SEBABE
E.I.E.R. 30^e promotion

Les histogrammes montrent globalement que les résistances à la compression obtenues par les essais d'écrasement sont supérieures à celles des essais sclérométriques.

En effet, les essais au scléromètre ne donnent que des valeurs indicatives de la résistance à la compression du béton. Si les résultats donnés par le scléromètre sont satisfaisants, les tests d'écrasement le seront aussi car ils donnent dans la plus part des cas sur le même béton des résultats supérieurs à ceux des essais sclérométriques.

A noter que cette comparaison peut déboucher à l'étalonnage du scléromètre utilisé pour les essais.

III- 12 RECAPITULATION DES RESULTATS OBTENUS POUR L'ADAPTATION DE LA METHODE DE DREUX-GORISSE

III-12-1 Les matériaux utilisés

III-12-1-1 Les granulats

Pour le béton 0/25

Gravier quartzeux concassé de type granulaire 4/25

Sable de rivière de type granulaire 0/5 et de module de finesse 2.5

Le béton 0/25 est considéré comme référence pour l'adaptation de la méthode de D.G.

Pour le béton 0/20

Gravier quartzeux concassé de type granulaire 1.6/20

Sable de rivière de type granulaire 0/5 et de module de finesse 2.80

Ce béton est l'un des plus couramment utilisés au Burkina. Ces granulats sont prélevés sur le chantier de construction de la direction de l'EIER.

III-12-2 Les résultats obtenus

III-12-2-1 Le coefficient granulaire

Les valeurs approximatives du coefficient granulaire G sont obtenues par ajustement en considérant la formule de Bolomey : $R'_{28} = G \cdot \sigma_c \left(\frac{C}{E} - 0,50 \right)$ comme une équation de droite de pente $G \cdot \sigma_c$.

Granulats quartzeux avec dimension du plus gros granulat $D = 25 \text{ mm}$: $G = 0,48$

Granulats quartzeux avec dimension du plus gros granulat $D = 20 \text{ mm}$: $G = 0,37$

Ces résultats sont dans la fourchette fixée par Mr Dreux qui est de 0,35 à 0,60 quand

$D \leq 40 \text{ mm}$.

III-12-2-2 La formule de Bolomey

Pour évaluer approximativement le rapport $\frac{C}{E}$ en fonction de la résistance moyenne désirée

R'_{28} , Mr Dreux utilise la formule de Bolomey.

Le meilleur ajustement issu de la régression de R'28 en $\frac{C}{E}$ change le scalaire 0,50 par 0,87.

La formule de Bolomey devient donc :

$$R'28 = G \cdot \sigma_c \left(\frac{C}{E} - 0,87 \right)$$

III-12-2-3 L'abaque donnant pour chaque dosage en ciment l'évolution de l'affaissement en fonction de $\frac{C}{E}$

C'est un abaque à trois entrées ; il suffit de connaître deux paramètres pour en déterminer le troisième. Cet abaque se retrouve à la figure 5.

III-12-2-4 Le coefficient de compacité (γ)

Le coefficient de compacité est le rapport des volumes absolus des matières solides au volume total du béton frais mis en œuvre.

Il est obtenu à partir de la composition de béton selon D.G pour la confection des éprouvettes et du dosage en eau réel pendant la fabrication du béton . Nous rappelons ci-dessous les résultats des coefficients de compacité présentés au tableau XXIII.

Tableau : Valeurs du coefficient de compacité γ
(vibration normale)

Consistance du béton	Coefficient de compacité (γ)	
	D= 25 mm	D=20 mm
Ferme	0,850	0,835
Plastique	0,830	0,825
Molle	0,820	0,820

Pour un dosage en ciment $\neq 350 \text{ kg/m}^3$, on apportera le terme correctif suivant : $\frac{C-350}{19\,000}$.

La courbe de compacité pour $C = 400 \text{ kg/m}^3$ étant au-dessous de celle de 350 kg/m^3 , nous sommes tentés d'affirmer que cette correction est toujours dans le sens de la diminution même si le dosage en ciment est supérieur est 350 kg/m^3 .

Le coefficient de compacité permet d'évaluer le volume absolu de l'ensemble des granulats par la formule

$$V = 1000 \cdot \gamma - \frac{C}{3,1}$$

avec C = dosage en ciment en kg/m³.

Remarque

Cette étude est faite uniquement sur le gravier quartzeux et le sable de rivière, donc les résultats ne sont pour l'instant qu'indicatives. Il faudrait alors continuer les expériences avec d'autres matériaux, suivant le même principe indiqué au paragraphe III-1, pour arriver à un éventail de résultats plus représentatif.

III-13 COMPARAISON DE LA METHODE DE DREUX-GORISSE ET LA METHODE ADAPTEE

III-13-1 L'abaque de détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport $\frac{C}{E}$

Il s'agit des abaques des figures 1 et 5 dont la première est celle de D.G et la seconde est celle adaptée aux matériaux locaux.

Le principe consiste à fixer deux paramètres et déterminer ensuite le troisième qui servira de comparaison.

A noter que dans le domaine des Travaux Publics, les dossiers de consultation des entreprises fixent généralement le dosage en ciment pour un ouvrage ou partie d'ouvrage donné.

A ce titre, nous choisissons fixer le dosage en ciment et un autre paramètre comme l'affaissement.

En fixant ainsi ces deux paramètres, nous obtenons le rapport $\frac{C}{E}$ qui a une valeur plus élevée sur l'abaque adapté que sur l'abaque de D.G. En d'autre terme, le dosage en eau issu de l'abaque adapté est plus petit. Le tableau ci-dessus montre bien ce phénomène :

Tableau XXVI Comparaison de l'abaque de D.G et l'abaque adapté pour la détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport C/E

Consistance	Af. (cm)	C = 300 kg/m ³		C = 350 kg/m ³		C = 400 kg/m ³		Qté. E majorée par D.G (l/m ³)		
		C/E	C/E	C/E	C/E	C/E	C/E	C=	C=	C=
		D-G	adapté	D-G	adapté	D-G	adapté	300kg/m ³	350kg/m ³	400kg/m ³
Ferme	4	1,57	1,93	1,86	2,15	2,1	2,35	35,64	25,38	20,26
Plastique	7	1,47	1,84	1,74	2,02	1,96	2,2	41,04	27,88	22,26
Mou	11	1,39	1,77	1,63	1,9	1,85	2,1	46,34	30,51	25,74
Dosage en eau correspondant (l/m ³)										
Ferme	4	191,083	155,44	188,172	162,791	190,476	170,213	35,64	25,38	20,26
Plastique	7	204,082	163,043	201,149	173,267	204,082	181,818	41,04	27,88	22,26
Mou	11	215,827	169,492	214,724	184,211	216,216	190,476	46,34	30,51	25,74

Cet écart de dosage en eau peut être lié à d'autres caractéristiques des matériaux utilisés que nous n'avons pas déterminé dans ce rapport, notamment la porosité. Le matériau absorbe plus d'eau si la porosité est élevée et par conséquent la quantité restant pour la liaison des granulats entre eux va diminuer. Néanmoins, compte tenu de l'importance des écarts, nous osons dire que la méthode de D.G surestime le dosage en eau.

En considérant l'abaque de D.G, nous constatons aussi que pour un même affaissement, le dosage en eau varie peu quelque soit le dosage en ciment.

Pour l'abaque adapté, le dosage en eau augmente avec le dosage en ciment mais l'accroissement du dosage en eau est faible par rapport à celui du ciment.

III-13-2 Les autres éléments de comparaison

Nous avons présenté dans le paragraphe III-12-2 les résultats obtenus. Il s'agit ici de comparer ces résultats aux coefficients et formules que propose D.G.

Tableau XXVII Comparaison des coefficients et formules de D.G avec les résultats obtenus

N° Ordre	Désignation	Symbole	Valeur ou formule	
			Selon D.G (*)	Adaptée
1.	Le coefficient granulaire	G	0.35 à 0.60 si D ≤ 40 mm	0.48 si D = 25 mm 0.37 si D = 20 mm
2.	La formule de Bolomey (**)		$R_{28} = G \cdot \sigma_c \left(\frac{C}{E} - 0.50 \right)$	$R_{28} = G \cdot \sigma_c \left(\frac{C}{E} - 0.87 \right)$
3.	Le coefficient de compacité	γ	cf. tableau XXIII	cf. tableau XXIII
4.	Terme correctif de γ si C ≠ 350 kg /m ³		$\frac{C-350}{5000}$	$\frac{C-350}{19000}$ (***)

Observations :

(*) Selon D.G.

(**) Pour déterminer la résistance à la compression à 28 jours

(***) dans le sens de la diminution quel que soit la valeur du dosage en ciment (C)

III-14 AUTRE METHODE DE COMPOSITION DU BETON : L'UTILISATION DES MOINDRES CARRES

III-14-1 Objet

Cette méthode a pour objet de déterminer la composition du béton (sable et gravier) sans tracer obligatoirement les courbes granulométriques des composants. Il suffit de disposer des pourcentages des passants des granulats sur différents tamis et la dimension maximale des granulats.

III-14-2 Principe

Rappelons que la méthode de D.G vise une composition de béton dont la courbe du mélange soit proche de la courbe granulaire de référence. Cette méthode utilise les courbes granulométriques et les techniques de construction graphique pour atteindre cet objectif.

La méthode des moindres carrés permet de minimiser l'écart entre la courbe de béton issu de composition et la courbe de référence par l'utilisation des moindres carrés.

Le procédé est le suivant :

Considérons « x » comme le pourcentage du sable .

A un module (M_i) du tamis, si :

« S_i » est le pourcentage des passants du sable,

« G_i » est le pourcentage des passants du gravier,

« R_i » est le pourcentage des passants de la courbe granulaire de référence,

On doit avoir :

$$x.S_i + (1 - x).G_i \cong R_i$$

$$\text{soit } x.S_i + (1 - x).G_i - R_i \text{ petit (1)}$$

En considérant « n » tamis et en élevant la formule (1) au carré, le résultat va tendre plus vers zéro, on obtient donc:

$$\sum_{i=20}^n (x.S_i + (1 - x).G_i - R_i)^2 = \min (2)$$

En dérivant l'équation (2) par rapport à x et en tirant x, nous avons :

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)(R_i - G_i)}{\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2}$$

En programmant cette formule dans le logiciel Excel, nous obtenons la valeur de x qui représente le pourcentage du sable dans le béton.

Dans le but d'éviter le tracé des courbes, on détermine l'équation de la courbe de référence qu'on introduit dans le programme.

Le même principe est répété quand il s'agit d'un béton ayant plusieurs type de gravillons.

III-14-3- l'intérêt de la méthode

Elle permet de se passer du tracé des courbes granulométriques et avec la vulgarisation de l'informatique dans les laboratoires de mécanique des sols son application sera sans difficulté.

A noter aussi le gain de temps, la précision des résultats et l'économie qu'on peut tirer de cette méthode.

III-14-4 Exemple pratique

Cas du béton 0/25 dosé à 300 kg/m^3 dont la courbe granulométrique est représentée en annexe II-3.

Le résultat de la composition est consigné dans le tableau XXVIII ci-après :

Tableau XXVIII: DETERMINATION DE LA COMPOSITION DU BETON PAR L'APPLICATION DE LA METHODE DES MOINDRES CARRES

Proportion du sable:

$$x = \frac{\sum_{i=20}^n (S_i - G_i)(R_i - G_i)}{\sum_{i=20}^n (S_i - G_i)^2}$$

Exemple de calcul de la composition du béton 0/25 avec un dosage en ciment de 300kg/m³

MODULE Mi	TAMISATS		COURBE DE REF. (Ri)	Si-Gi	Ri-Gi	(Si-Gi) (Ri-Gi)	(Si-Gi) ²	SOMME (Si-Gi)(Ri-Gi)	SOMME (Si-Gi) ²	POURC. SABLE	POURC. GRAVIER
	SAB. (Si)	GRA. (Gi)									
20	1,06	0,00	0,00	1,06	0,00	0,00	1,12	0,00	1,12	0,000	100,000
21	2,00	0,00	2,28	2,00	2,28	4,56	4,00	4,56	5,12	88,964	11,036
22	4,45	0,00	4,56	4,45	4,56	20,28	19,80	24,84	24,93	99,662	0,338
23	7,00	0,00	6,84	7,00	6,84	47,86	49,00	72,70	73,93	98,345	1,655
24	10,05	0,00	9,12	10,05	9,12	91,62	101,00	164,32	174,93	93,936	6,064
25	15,00	0,00	11,40	15,00	11,40	170,93	225,00	335,25	399,93	83,828	16,172
26	21,50	0,00	13,67	21,50	13,67	294,00	462,25	629,25	862,18	72,984	27,016
27	30,00	0,00	15,95	30,00	15,95	478,60	900,00	1107,86	1762,18	62,869	37,131
28	41,26	0,00	18,23	41,26	18,23	752,28	1702,39	1860,13	3464,57	53,690	46,310
29	50,00	0,00	20,51	50,00	20,51	1025,58	2500,00	2885,71	5964,57	48,381	51,619
30	61,70	0,00	22,79	61,70	22,79	1406,19	3806,89	4291,90	9771,46	43,923	56,077
31	70,00	0,00	25,07	70,00	25,07	1754,88	4900,00	6046,78	14671,46	41,215	58,785
32	77,30	0,03	27,35	77,27	27,32	2110,93	5970,65	8157,71	20642,11	39,520	60,480
33	84,00	0,07	29,63	83,94	29,56	2481,36	7045,08	10639,07	27687,19	38,426	61,574
34	90,43	0,10	31,91	90,33	31,81	2873,12	8159,51	13512,20	35846,70	37,694	62,306
35	94,00	0,16	34,19	93,84	34,03	3193,00	8805,95	16705,20	44652,65	37,411	62,589
36	97,96	0,24	36,47	97,72	36,23	3539,92	9549,20	20245,12	54201,85	37,351	62,649
37	98,50	0,49	38,74	98,01	38,25	3749,29	9605,96	23994,41	63807,81	37,604	62,396
38	99,56	0,73	41,02	98,83	40,29	3982,18	9767,37	27976,59	73575,18	38,025	61,975
39	100,00	2,22	43,30	97,78	41,08	4017,03	9560,93	31993,62	83136,10	38,483	61,517
40	100,00	3,71	45,58	96,29	41,87	4031,80	9271,76	36025,42	92407,87	38,985	61,015
41	100,00	12,44	47,86	87,56	35,42	3101,42	7666,75	39126,84	100074,62	39,098	60,902
42	100,00	21,17	56,28	78,83	35,11	2768,08	6214,17	41894,91	106288,79	39,416	60,584
43	100,00	60,00	70,86	40,00	10,86	434,24	1600,00	42329,15	107888,79	39,234	60,766
44	100,00	84,01	85,43	15,99	1,42	22,66	255,68	42351,81	108144,47	39,162	60,838
45	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42351,81	108144,47	39,162	60,838	

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Nous rappelons d'abord que l'emploi de la méthode de D.G ne s'est pas révélé insuffisant dans la plupart des laboratoires compte tenu de sa facilité d'emploi et de sa souplesse pour résoudre les problèmes de composition de béton.

Les adaptations que nous proposons dans ce rapport devraient permettre d'améliorer encore les résultats obtenus par une meilleure adéquation entre les coefficients et abaques utilisés pour la formulation de béton et les caractéristiques des matériaux utilisés au Burkina Faso.

Les adaptations qui nous paraissent pertinentes et qui peuvent présenter un intérêt plus général sont :

- La correction de la compacité du béton dont le terme correctif proposé par D.G nous paraît trop élevé compte tenu des faibles écarts constatés quand le dosage en ciment varie de 300 à 400 kg/m³.

Le terme correctif sera alors $\frac{C-350}{19000}$ au lieu $\frac{C-350}{5000}$ quand le dosage en ciment est différent de 350 kg/m³ et il s'applique toujours dans le sens de la diminution quel que soit le dosage en ciment.

- Le coefficient granulaire qui vaut:

0,48 si D = 25 mm

0,37 si D = 20 mm

- La formule de Bolomey issue des matériaux utilisés :

$$R'_{28} = G \cdot \sigma_c \left(\frac{C}{E} - 0.87 \right)$$

- Le coefficient de compacité en fonction de la consistance du béton et de la dimension maximale des granulats.

- L'abaque permettant de déterminer le dosage en ciment en fonction de $\frac{C}{E}$ et l'affaissement au cône d'Abrams.

Nous recommandons :

- Que les résultats obtenus soient pour l'instant expérimentés, par la confection de quelques éprouvettes de béton qui seront écrasées à vingt huit jours d'âge pour déterminer la résistance à la compression qui sera comparée avec celle obtenue par la méthode de D.G.

- Que des études plus larges soient poursuivies dans le domaine avec d'autres matériaux usuels de construction au Burkina Faso pour avoir un résultat plus représentatif.

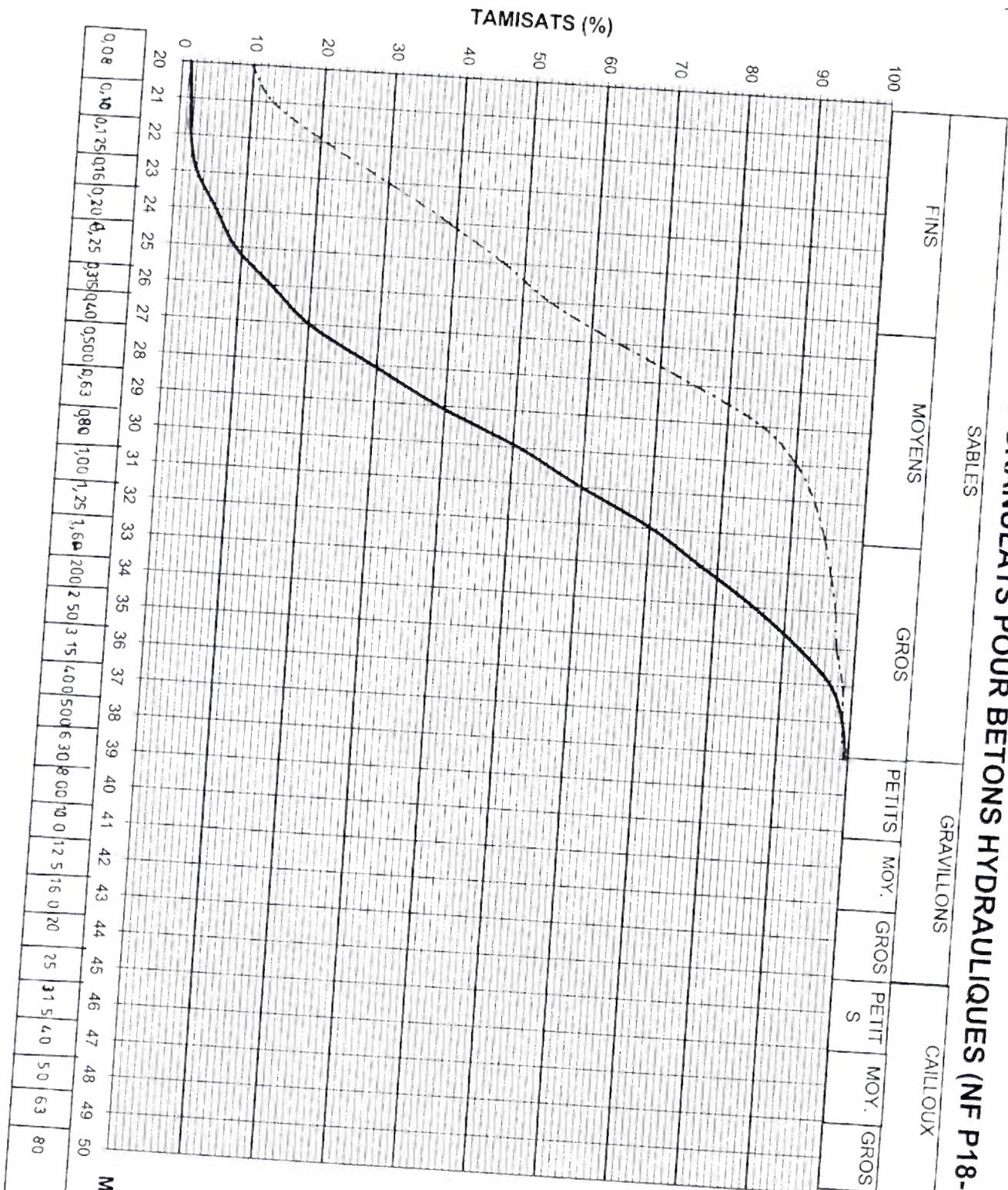
Considérant que certains Etats de la sous-région ont déjà entrepris des recherches dans le domaine, nous espérons aboutir un jour à un modèle adapté de la méthode de D.G de l'Afrique occidentale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1- **G. DREUX :** Nouveau guide de béton
Edition Eyrolles 61 Bd. St. Germain 75 005 Paris
- 2- **J. SIMONNET :** Bilan de cinq années d'utilisation de la méthode de
D.G de composition des bétons en Côte-d'Ivoire.
- 3- **AFNOR :** Bâtiment. Bétons et constituants du béton. Ciments et Chaux
tome 1 1984
- 4- **AFNOR :** Bâtiment. Bétons et constituants du béton. Granulats.
tome 3 1984
- 5- **R. LANCHON :** Cours de laboratoire. Granulats bétons sols. Tome1
- 6- **C. J.ZOUNGRANA :** Cours de technologie de construction de 1^e année EIER.

ANNEXES

GRANULOMETRIE DES GRANULATS POUR BETONS HYDRAULIQUES (NF P18-304)

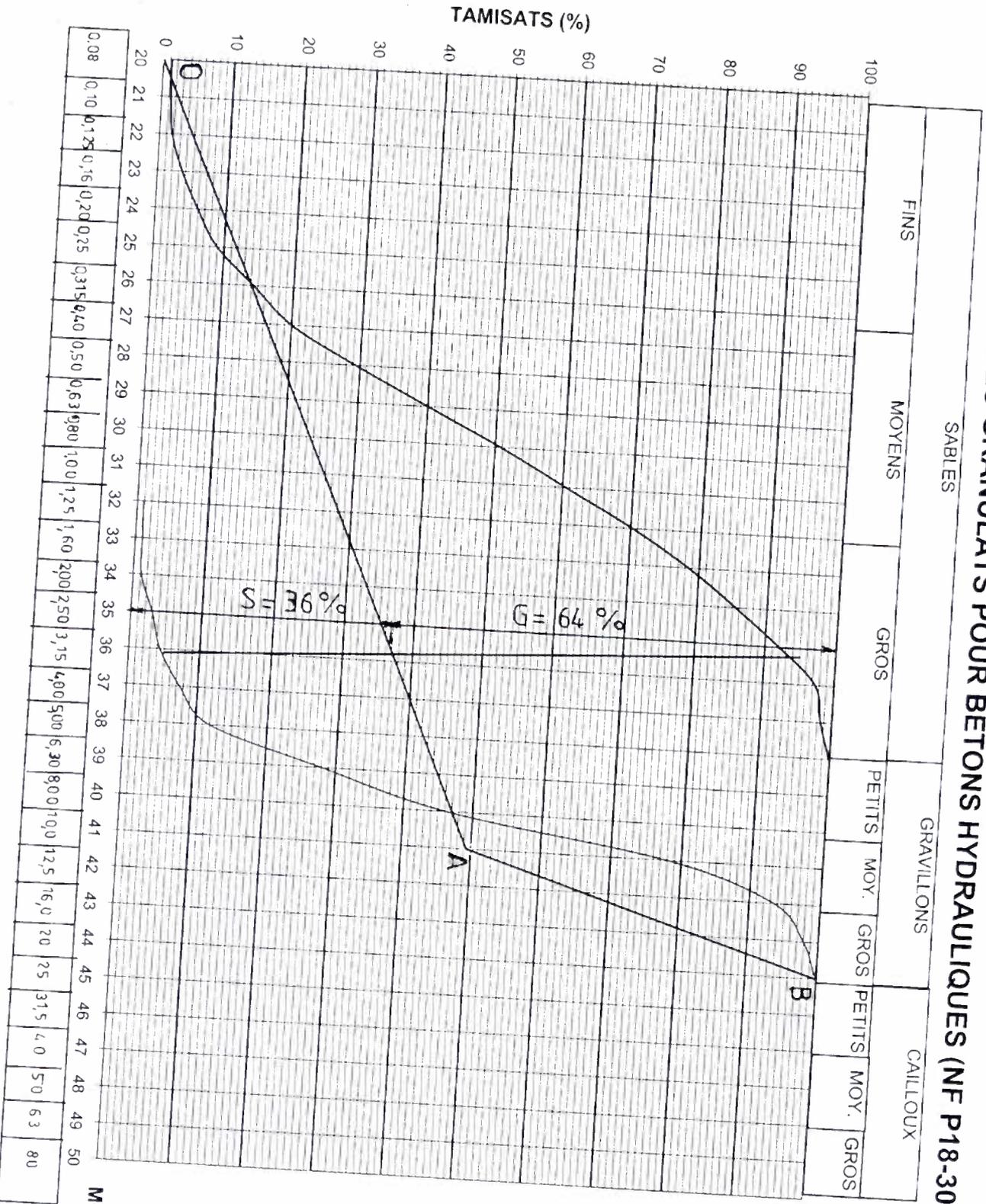


ANNEXE II-1

--- Sable fin
 — Sable peu grossier

MODULES
 TAMIS

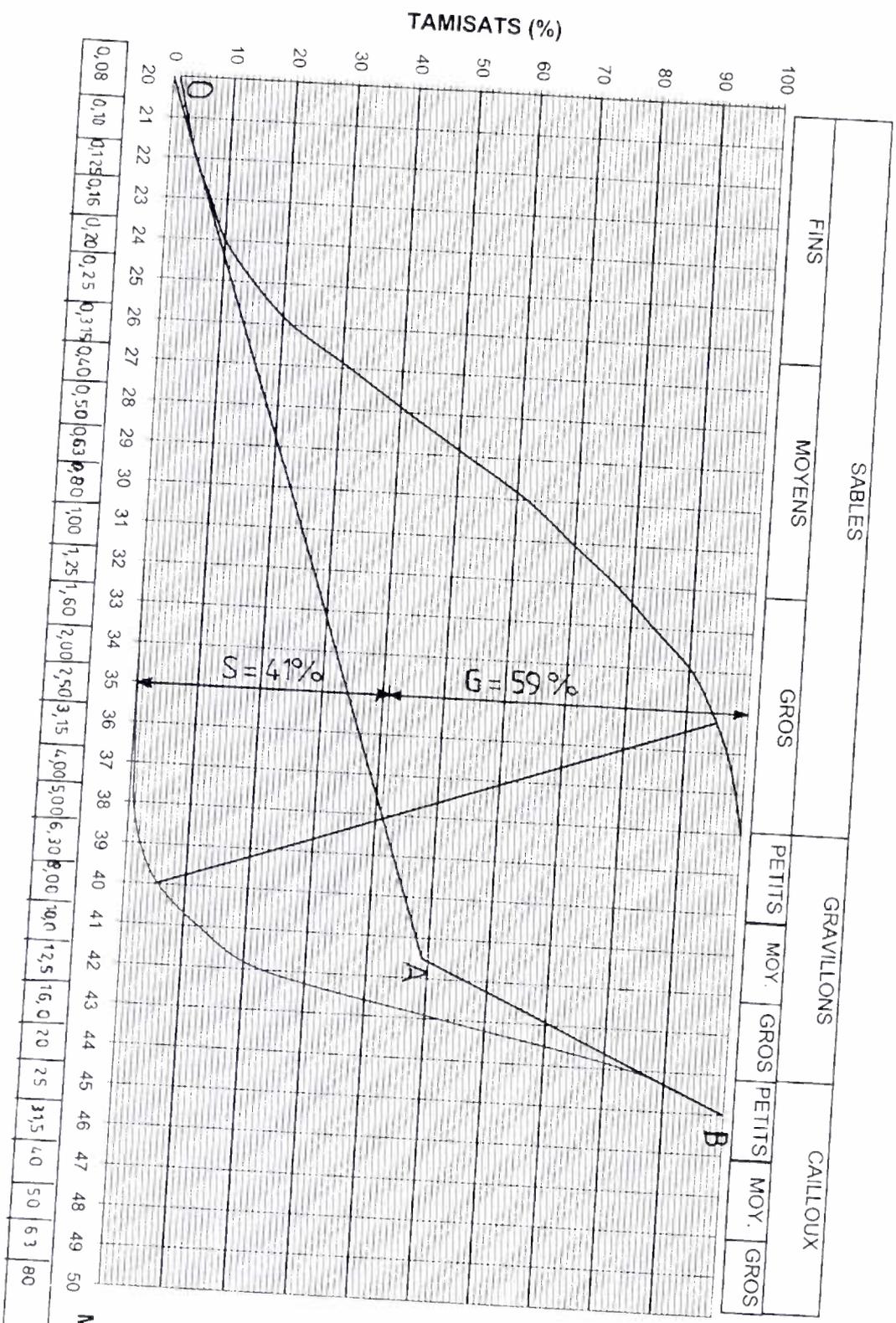
GRANULOMETRIE DES GRANULATS POUR BETONS HYDRAULIQUES (NF P18-304)



ANNEXE II.2:
Composition du béton
0/20 par la
méthode de
DREUX-GORISSE :
Sable : 36 %
Gravier : 64%

MODULES
TAMIS

GRANULOMETRIE DES GRANULATS POUR BETONS HYDRAULIQUES (NF P18-304)



ANNEXE II-3
Composition du
béton 0/25 par la
méthode de
Dreux-Gorisse :
Sable 41 %
Gravier = 59 %

ANNEXE II-4

DETERMINATION DU TYPE GRANULAIRE d/D

Choix de d et de D	d=				et D =			
	OUI		NON		OUI		NON	
D/d ≤ 1.56 ?								
Refus cumulé sur la maille D =.....%	≤20%		≤20%		≤15%		≤15%	
Tamisat pour le tamis d =.....%	≤20%		≤20%		≤15%		≤15%	
Refus cumulé sur la maille 1.56 D =.....%	0		0		0		0	
Tamisat pour le tamis 0.63 d =	<3% et D>5mm		<5% et D≤5mm		<3% et D>5mm		<5% et D≤5mm	
D est-il inférieur à 0.5mm ?	si oui alors d=0				si oui alors d =0			
TYPE GRANULAIRE d/D								

Béton 0/20
Age = 7 jours

ANNEXE III-1 Valeurs des indices sclérométriques enregistrés

C/E	1,93		1,72		300		1,54		1,25		2,3		2,09		350		1,95		1,78		2,7		2,433		400		1,85			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
Dosage en c(kg/m ³)	300																													
Zone de l'éprouvette	300																													
Indices sclérométriques lus	23	18	22	22	19	20	21	21	21	24	20	21	20	20	22	23	22	22	20	18	26	24	30	18	20	17	14	2		
	20	25	22	21	16	19	22	18	23	21	24	21	24	22	22	26	21	25	22	27	27	22	34	22	21	23	14			
	23	21	21	23	19	19	22	22	23	24	23	24	23	24	24	26	25	22	20	28	28	28	22	22	24	21	23	14		
	23	24	23	23	18	18	20	23	22	21	23	21	23	22	24	25	18	21	25	20	28	28	22	22	22	24	21	20		
	23	26	23	23	19	20	21	22	23	23	25	22	20	20	25	26	22	24	26	30	30	22	23	23	26	18	16			
	21	24	25	24	18	18	26	21	22	22	23	23	20	20	25	26	22	24	25	25	25	30	22	23	23	26	18	16		
	22	23	23	24	18	20	21	20	21	20	22	22	23	20	24	26	22	24	26	21	23	24	28	22	22	23	20	24		
	24	23	22	25	18	19	21	16	24	25	24	25	21	24	23	24	22	24	24	25	24	28	22	24	22	22	20	20		
	24	25	24	21	23	23	18	18	19	21	16	24	25	21	23	20	22	24	25	24	24	28	25	21	21	22	18	18		
	26	29	25	22	26	35	17	18	14	24	26	20	26	24	24	26	26	26	25	26	26	25	21	22	22	23	20	20		
	25	24	26	21	31	22	26	22	18	27	25	27	27	26	26	26	24	28	22	27	28	29	26	24	25	23	20	18		
	26	26	21	31	22	26	22	18	27	25	27	27	25	27	26	26	24	28	22	27	28	29	33	28	24	28	21	22		
	25	26	22	23	24	20	22	22	27	26	26	27	26	26	26	26	24	28	22	27	28	29	38	27	28	30	24	22		
	25	35	24	24	23	24	20	22	22	22	26	27	27	26	26	27	27	27	24	24	30	3	32	27	27	20	22	20		
	26	22	24	25	23	26	25	22	25	22	24	22	26	25	28	28	26	26	26	27	27	40	28	32	28	24	21	19		
	28	26	23	35	24	22	25	22	26	24	25	18	27	28	25	28	23	26	26	28	28	30	30	27	26	24	21	19		
	23	27	23	23	18	28	21	26	24	26	18	26	18	26	28	25	26	24	29	38	29	32	34	25	22	24	18	34		
	20	24	27	21	21	22	22	20	24	24	22	20	22	22	22	23	24	24	28	36	29	30	30	30	30	23	28	18	18	
	25	24	23	25	18	20	19	16	23	23	21	24	24	24	24	24	25	23	24	30	30	30	23	17	19	18	18	22		
	25	25	22	20	19	21	23	14	38	26	23	26	23	26	25	25	27	24	22	30	30	28	24	23	18	18	20	20		
	23	24	23	23	23	19	21	23	24	28	26	23	23	26	25	25	23	22	22	30	28	22	30	21	22	20	19	19		
	23	25	22	23	22	21	22	23	24	24	28	28	28	24	24	24	24	24	24	30	40	22	31	18	20	22	20	20		
	25	24	22	22	24	19	22	19	23	20	24	27	24	28	25	25	23	22	22	28	32	23	22	20	22	20	20	20		
	25	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18		
	25	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18		
	24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18		
	24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18		
	24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18		
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22	26	22	22	22	30	28	22	24	20	14	24	18	18			
24	25	26	20	24	17	23	23	23	23	20	24	26	24	22																

Béton 0/20
Age = 14 jours

ANNEXE III-1 (suite)

C/E	300												350						400											
	1,93		1,72		1,54		1,25		2,3		2,09		1,95		1,78		2,7		2,433		400									
Zone de l'éprouvette	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2								
Indices sclérométriques	24	21	22	21	17	20	20	21	22	24	22	24	22	21	25	22	18	24	24	30	33	21	24	24	28	24				
	24	24	22	22	21	18	22	24	22	20	24	22	20	20	28	20	20	29	26	26	33	23	25	35	27	22	22			
	25	25	22	23	20	23	28	25	20	24	23	20	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	27	32	24	26	22	22		
	25	28	27	26	16	20	28	31	28	20	24	25	20	25	26	26	28	30	28	22	22	24	26	27	26	22	20	22		
	28	28	27	26	21	27	18	24	20	22	24	23	27	26	27	27	27	27	30	28	22	22	26	27	24	24	24	21		
	26	27	27	28	27	23	28	27	28	27	18	23	24	26	28	27	27	27	30	27	27	27	27	27	27	27	24	21		
	28	28	29	26	26	24	24	19	24	19	32	26	28	27	28	27	28	28	27	29	27	26	27	24	27	27	23	21		
	24	27	28	27	23	26	40	36	40	36	40	24	26	23	26	36	27	28	26	29	27	26	24	22	22	26	27	23	21	
	22	26	27	27	22	22	20	18	19	19	20	18	24	25	27	29	29	27	28	29	27	26	25	23	23	22	26	24	24	
	22	25	26	26	25	18	32	32	24	24	28	29	29	29	27	27	28	27	26	28	28	24	25	25	22	22	22	22	23	25
	28	32	26	25	22	17	20	20	22	22	28	29	26	30	26	26	32	23	25	25	26	26	26	23	24	24	24	24	23	25
	27	29	24	22	21	20	24	24	24	24	30	31	24	24	27	25	27	25	23	25	26	26	26	29	29	24	24	24	24	23
	28	25	23	18	23	18	24	20	20	20	38	28	27	23	32	26	27	27	25	26	29	27	27	27	27	27	28	28	21	
	28	28	21	19	22	20	28	20	20	20	28	26	26	28	30	30	24	24	24	24	27	27	27	28	28	28	28	28	25	22
	26	30	23	20	32	32	28	20	28	20	30	30	25	29	29	29	26	23	24	28	30	29	29	29	29	29	29	29	20	24
	25	25	25	22	27	22	18	42	42	42	26	25	27	28	24	24	26	24	28	30	30	27	27	27	27	27	27	27	21	24
	25	27	27	27	23	21	30	30	24	24	26	24	24	28	20	24	24	24	24	29	32	27	27	27	27	27	27	27	21	28
	25	26	26	28	23	23	42	24	24	24	30	24	24	24	28	20	25	25	27	23	31	28	27	27	27	27	27	27	25	25
	29	26	26	23	26	23	42	24	25	25	25	25	27	25	25	20	22	24	26	28	30	28	27	27	27	27	27	27	27	27
	32	28	29	28	24	30	18	20	24	24	24	21	25	26	26	25	22	26	32	31	29	28	27	27	27	27	27	27	21	23
	26	29	27	28	24	30	18	18	24	24	28	23	23	28	28	26	28	24	24	26	27	26	24	24	24	24	24	24	21	23
	30	26	27	28	14	21	20	20	24	24	23	23	25	26	26	26	29	21	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	23	23
	24	29	28	25	22	24	18	19	25	25	22	22	22	22	28	30	22	27	27	29	26	26	26	26	26	26	26	26	25	25
	27	26	25	27	22	22	24	20	27	27	26	26	26	26	27	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	25	25
	25	29	24	23	24	20	26	21	25	24	24	21	25	24	27	34	27	29	25	25	27	27	27	27	27	27	27	27	25	25
	27	27	24	24	24	20	22	21	22	21	22	22	22	22	22	28	28	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	25	25
26	22	22	28	30	20	18	21	24	24	24	24	24	24	24	30	28	25	21	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	21	21

Béton 0/20
Age = 28 jours

ANNEXE III-1 (suite)

C/E	1,93		1,72		1,54		1,25		2,3		2,09		1,95		1,78		2,7		2,433		400		1,85		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Dosage en c(kg/m ³)	300																								
Zone de l'éprouvette	300																								
Indices sclérométriques lus	32	24	25	23	25	22	25	25	22	26	26	24	20	29	25	25	23	25	30	29	25	28	26	23	23
	33	29	25	25	20	23	23	26	28	27	32	24	23	26	25	23	29	29	29	25	25	29	25	28	23
	27	27	27	31	23	24	26	24	25	25	27	23	26	28	28	23	26	28	34	28	27	27	31	23	22
	33	26	27	28	25	25	26	29	29	26	26	23	25	25	27	25	24	28	33	27	25	20	25	24	25
	33	27	29	28	26	24	25	29	29	25	33	25	25	27	27	23	29	33	27	25	20	25	24	25	
	31	30	29	28	25	24	25	29	27	27	28	26	26	26	28	26	27	29	33	30	35	27	27	23	27
	28	28	28	27	25	27	27	28	26	28	28	25	25	27	29	24	29	34	32	29	29	29	28	22	23
	33	29	29	28	24	25	25	29	26	31	27	27	27	27	29	27	24	28	34	30	29	29	27	24	22
	26	28	31	27	24	22	26	30	29	35	35	28	27	29	29	28	29	33	31	36	28	28	24	24	
	45	26	28	26	25	28	32	20	30	31	27	30	27	28	27	28	29	26	34	36	30	27	28	28	25
	28	25	29	27	26	23	26	24	29	35	27	28	28	27	23	28	30	29	34	32	26	28	29	26	29
	37	24	29	25	25	25	24	29	29	29	27	28	28	29	29	30	29	36	31	25	27	27	33	25	25
	31	26	29	26	26	26	23	22	29	26	26	25	27	27	29	30	29	27	31	27	30	26	30	28	22
	32	27	27	25	23	24	26	22	30	23	25	29	29	31	28	27	27	39	32	29	29	28	29	27	23
	31	29	28	26	30	23	24	20	29	28	23	30	28	28	43	28	18	31	37	29	29	30	30	25	26
	32	33	26	27	26	23	29	25	29	29	26	30	30	30	34	28	30	37	29	32	30	27	30	25	26
	29	27	25	28	26	22	27	27	35	36	26	27	31	31	34	30	33	34	30	32	28	27	23	25	22
	29	29	25	27	23	22	23	23	30	36	26	29	31	29	37	25	28	20	34	32	32	29	29	22	22
	27	25	24	30	25	23	21	24	31	27	25	29	31	29	30	29	32	31	28	36	27	36	27	24	24
	26	25	25	27	29	23	23	22	29	27	27	26	29	34	33	26	32	30	31	28	36	27	33	24	26
	26	24	27	29	20	20	20	28	29	27	27	32	27	28	29	26	30	29	27	29	28	28	29	23	27
	31	26	27	27	19	23	23	23	27	27	27	32	28	28	29	27	24	34	28	26	29	27	29	26	24
	29	26	28	26	24	26	27	24	30	29	27	26	33	31	31	27	30	25	24	26	26	29	28	28	
	30	25	27	26	23	21	24	24	29	25	28	28	29	29	29	25	32	25	25	26	24	25	26	27	27
	33	27	28	26	18	25	25	28	29	29	25	22	22	29	29	23	39	28	25	27	27	30	28	22	27
	37	30	27	26	21	22	22	21	27	24	27	22	20	28	30	29	35	27	25	26	20	27	24	23	23
	29	29	30	24	22	25	20	23	27	25	29	22	29	29	30	26	34	29	28	22	26	20	27	24	23
	29	29	30	29	23	21	22	23	24	25	29	24	29	29	30	26	34	29	28	22	26	25	28	26	24

Béton 0/25
Age: 7 jours

ANNEXE III -1 (suite)

C/E	300												350						400					
	2,20		2,00		1,85		1,60		2,30		1,90		1,82		1,74		2,22		2,10		2,02		1,92	
Zone de l'éprouvette	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Dosage en c(kg/m ³)	26	20	19	20	18	18	13	18	24	24	19	26	28	20	21	20	25	29	24	27	24	22	19	22
Indices sclérométriques	19	30	19	17	17	21	16	15	23	26	21	26	22	22	23	20	25	27	24	24	24	20	22	34
	20	30	20	18	21	18	16	16	24	25	20	23	25	18	31	33	26	29	28	32	24	22	25	
	19	21	21	23	21	20	14	16	23	23	23	24	20	24	24	22	29	27	28	24	24	22	25	
	22	20	21	22	19	17	15	16	26	25	25	22	23	21	26	26	27	27	26	30	22	24	21	
	20	17	21	21	20	14	15	17	24	25	26	22	23	21	26	26	33	26	30	30	20	22	21	
	30	18	21	21	19	21	17	18	23	24	25	26	25	17	22	25	26	33	25	29	20	26	21	
	27	23	21	38	22	17	15	16	25	26	21	23	24	21	23	24	23	32	32	27	27	23	22	
	30	23	18	21	30	20	16	14	24	27	22	22	20	22	21	26	24	33	35	26	29	20	30	
	32	29	27	20	20	18	19	18	33	28	28	27	27	21	29	24	32	40	39	32	28	22	29	
	28	30	22	18	20	20	17	20	29	29	22	23	23	22	25	24	32	40	39	32	28	22	29	
	27	26	17	34	21	22	17	17	27	24	32	23	23	22	25	24	31	32	33	33	29	25	24	
	26	27	16	23	14	21	17	18	29	28	25	29	27	25	25	24	31	32	33	33	31	26	24	
	27	29	20	23	18	21	19	15	28	28	28	27	27	25	33	29	36	36	30	30	35	28	27	
	27	30	30	25	20	19	17	17	29	29	28	24	24	25	29	24	35	43	33	32	28	24	25	
	31	31	28	22	20	22	17	16	35	35	29	28	24	25	29	24	39	35	34	32	24	24	25	
	30	26	29	24	20	20	17	18	29	29	30	27	25	25	29	24	41	38	30	29	25	28	24	
	28	28	22	23	18	21	18	17	31	28	30	28	25	27	23	26	34	30	30	32	25	28	24	
	21	31	22	20	18	17	17	15	36	29	22	22	23	18	21	31	37	30	29	34	24	25	34	
	35	36	24	21	19	18	14	16	26	24	21	26	20	25	20	21	31	30	25	29	24	16	19	
	26	23	20	23	19	18	15	19	24	24	25	22	17	21	21	22	27	26	27	28	21	20	26	
	27	20	22	24	19	18	16	18	28	24	23	25	19	21	21	20	29	25	27	20	20	20	22	
32	25	18	25	17	20	17	16	23	23	17	23	24	21	20	24	29	30	30	25	22	18	22		
22	22	17	21	14	18	18	16	29	25	23	26	20	22	24	30	30	33	34	22	18	22	20		
26	20	23	26	18	21	15	15	29	25	23	26	20	18	22	24	30	33	34	22	18	22	22		
20	19	18	18	18	18	15	15	21	21	24	24	19	22	25	25	27	36	28	29	18	22	23		
21	22	17	19	18	17	15	15	27	25	24	24	20	22	22	24	25	27	36	28	22	17	17		
								25	25	26	28	19	22	22	21	31	33	29	30	20	22	18		
								25	26	22	22	19	27	22	24	28	32	26	29	19	22	22		
								25	26	22	22	19	27	22	24	28	32	26	29	19	22	22		

Béton 0/25
Age: 14 jours

ANNEXE III-1 (suite)

C/E	300												350						400						
	2,20		2,00		1,85		1,60		2,30		1,90		1,82		1,74		2,22		2,10		2,02		1,92		
Zone de l'éprouvette	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Indices scélérométriques lus	29	26	36	27	17	16	16	23	34	25	22	22	26	17	25	35	36	28	36	22	22	23	22	24	
	27	29	25	26	18	17	23	25	25	24	26	20	24	22	23	34	29	27	27	21	23	23	19	24	
	32	32	23	28	19	17	16	20	27	31	24	27	18	23	25	38	32	30	27	21	21	23	19	24	
	31	29	24	23	22	16	21	22	28	24	31	27	23	21	23	38	32	30	27	19	22	19	21	24	
	28	27	27	26	20	21	19	19	27	25	28	31	27	23	23	40	28	25	27	19	22	19	21	24	
	26	28	43	25	18	18	28	23	25	28	31	23	22	29	22	40	28	25	27	23	24	26	17	24	
	34	30	26	23	19	20	24	24	26	28	28	32	30	24	21	37	40	25	30	20	20	26	17	24	
	32	29	25	21	23	22	19	19	24	26	28	31	2	23	22	36	37	33	36	25	25	24	22	19	
	27	32	26	23	18	20	20	19	24	27	30	28	23	27	22	26	30	32	32	27	27	25	24	19	
	37	38	28	22	19	20	20	19	24	27	29	31	30	27	22	34	35	25	30	29	29	23	20	22	
	30	29	30	28	21	20	22	18	29	35	25	32	20	20	22	28	34	34	35	25	30	29	23	20	22
	31	32	28	31	20	20	22	20	29	41	27	26	26	24	27	23	36	39	30	25	29	19	4	19	19
	32	32	28	31	26	18	21	19	29	35	25	25	24	24	22	34	32	27	29	24	24	41	23	23	
	31	31	28	30	30	20	27	20	30	30	29	23	25	24	31	35	36	34	29	31	27	23	27	37	
	31	31	28	29	30	20	27	20	35	32	22	26	24	21	28	28	36	36	18	31	27	23	28	24	
	33	34	31	30	16	22	25	21	38	38	25	28	22	23	27	34	26	36	18	32	25	21	29	23	
	34	32	28	28	14	20	24	21	32	32	24	29	21	23	27	34	26	36	29	39	27	27	32	29	
	35	31	25	32	19	20	26	22	29	36	26	29	22	24	24	34	34	31	31	30	31	24	26	24	
	38	26	23	32	19	23	21	26	33	32	26	33	24	29	28	25	36	31	31	24	33	33	25	32	
	34	33	23	20	18	21	19	19	22	32	26	30	22	21	26	35	33	32	29	33	29	33	28	25	32
	35	27	25	27	20	20	21	22	28	24	31	28	20	21	26	35	33	33	30	30	23	31	39	25	32
	31	28	22	26	19	20	19	18	22	22	27	26	20	23	26	19	35	33	36	22	36	22	25	21	21
	28	29	25	33	22	19	16	17	24	24	29	29	22	21	19	29	32	27	36	29	24	24	25	22	22
	36	27	28	23	20	18	17	24	24	18	26	20	19	22	23	32	35	33	33	24	24	25	24	27	27
	34	27	25	24	22	18	18	21	20	20	26	20	22	22	24	29	29	30	30	23	23	28	23	24	24
26	26	25	24	22	20	18	18	20	24	24	23	22	22	24	28	28	30	34	24	24	21	21	20	20	
25	26	25	26	20	22	20	20	24	24	24	23	22	28	23	35	36	34	36	24	24	28	24	21	21	
25	27	25	25	19	21	20	22	25	23	26	27	29	27	27	29	42	29	34	26	24	27	25	33	33	
25	27	25	25	19	21	20	19	22	29	31	28	24	21	27	31	32	31	35	25	25	22	23	23	25	

ANNEXE III-2

Abaque du scléromètre permettant de déterminer la résistance à la compression du béton en fonction de l'indice sclérométrique

