

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
-O- REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE -O-  
المعهد الوطني لمواد البناء  
INSTITUT NATIONAL DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION  
BOUMERDES بومرداس

# T H E S E

PRESENTEE EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE  
MAGISTER EN SCIENCES ET TECHNOLOGIE DES  
MATERIAUX DE CONSTRUCTION.

**OPTION : LIANTS ET BETONS HYDRAULIQUES**

PAR : Mohamed BOUAZIZ

## THEME

RECHERCHE DES POSSIBILITES D'UTILISATION D'UN DECHET  
CELLULOSIQUE COMME ADJUVANT DANS LES BETONS  
HYDRAULIQUES. ETUDE DE SON INFLUENCE SUR LES  
PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUES.

Soutenu publiquement le : Le 29 mars 1997 à 10 H.

devant le jury d'examen :

Président : Pr. A. BALL, Ecole Nationale Polytechnique, El-Harrach.  
Rapporteur : Pr. MT ABADLIA, INMC.

Examineur : M. BERAH, Maître de conférences, E.N.P. El-Harrach.  
Examineur : N. LARADI, Maître de conférences, Université, Bab-Ezzouar.  
Examineur : A. BENMOUNAH, Chargé de cours, INMC.

**- BOUMERDES 1996 -**

# SOMMAIRE

Avant Propos	
Introduction Générale: .....	1

## PARTIE A : Recherche Bibliographique

### Chapitre I. : Béton et ses constituants

I.1- Généralités.....	6
I.2- Recherche et Développement.....	6
I.3- Classification.....	7
I.4- Constituants.....	7
I.4.1- Ciment.....	8
I.4.2- Eau de gâchage.....	9
I.4.3- Granulat.....	10
I.4.4- Adjuvant.....	13

### Chapitre II. : Adjuvants du béton

II.1-Aspect évolutif.....	15
II.2- Classification.....	16
II.3- Rôles et domaines d'application des principaux adjuvants.....	17
II.4- Rôle et mécanisme de la plastification.....	18
II.4.1- Mécanisme de la défloculation et la séparation des colonies de grains fins, élimination et l'air inclu dans les colonies.....	18
II.4.2- Mécanisme de la réduction d'eau sans diminution de la maniabilité.....	19
II.5- Action des adjuvants : plastifiants et fluidifiants.....	19
II.5.1- Action dispersante.....	20
II.5.2- Relation : plastifiant et fluidifiant.....	21
II.6- Efficacité d'utilisation.....	21
II.7- Produits d'origine d'adjuvants plastifiants et superplastifiants.....	22

### Chapitre III. : Etude de l' influence des plastifiants et des superplastifiants sur les propriétés du béton

III.A- Rappel des propriétés des bétons.....	24
* Etat frais.....	24
* Etat durci.....	25
III.B- Action de l'eau de gâchage excédentaire sur les propriétés du béton.....	29
III.B.1- Aperçu.....	29
III.B.2- Influence sur la porosité.....	29
III.B.3- Influence sur la résistance mécanique.....	31
III.B.4- Influence sur la durabilité.....	33
III.B.5- Influence sur l'effet du cycle gel et dégel.....	33
III.B.6- Influence sur le retrait et le fluage.....	34
III.B.6.1- Retrait.....	34
III.B.6.2- Fluage.....	35

III.C- Action de l'influence des plastifiants et des superplastifiants sur les propriétés du béton.....	36
III.C.1-Béton frais.....	36
III.C.1.1- Influence sur l'ouvrabilité.....	36
III.C.1.2- Durée d'action des superplastifiants.....	37
III.C.1.3- Contenu d'air (air occlu).....	38
III.C.1.4- Ressuage.....	38
III.C.2- Béton durci.....	38
III.C.2.1- Résistance mécanique.....	38
III.C.2.1.1-Accroissement de l'ouvrabilité à teneur en eau onstante.....	38
III.C.2.1.2- Ouvrabilité constante avec réduction d'eau.....	40
III.C.2.1.3- Réduction du dosage en ciment (économie du ciment).....	41
III.C.2.2.- Retrait .....	41
III.C.2.3.- Résistance au gel .....	41
III.C.2.4.- Fluage .....	41

## *Partie.B : Caractérisation des constituants*

### Chapitre IV. Caractérisation des matériaux utilisés et adoption d'une composition de béton de référence

IV.1- Caractérisation des constituants.....	44
IV.1.1- Ciment.....	44
IV.1.2- Eau de gâchage.....	45
IV.1.3- Sable.....	45
IV.1.4- Gravillon.....	47
IV.1.5- Constituant secondaire : D.I de la cellulose.....	50
IV.2- Adoption d'une composition de béton de référence par la méthode G. DREUX.....	51
IV.2.1- Dosage en ciment.....	52
IV.2.2- Dosage en eau.....	53
IV.2.3- Dosage en granulats.....	55

## *Partie C : ETUDE EXPERIMENTALE*

### Chapitre V. Etude expérimentale de l'influence du déchet industriel sur le comportement physique et mécanique du béton hydraulique

V.1- Introduction.....	58
V.2- Présentation de trois (03) paramètres.....	58
V.3- Traitement statistique des résultats .....	59
V.4- Travaux expérimentaux.....	61
V.5- Possibilité d'économie de ciment.....	80
V.6- Conclusion du chapitre V.....	82

## Chapitre VI. Optimisation de la formulation du béton adjuvants en déchet à 0.15%.

VI.A- Accroissement du dosage en ciment avec rapport E. C constant.....	84
VI.B- Accroissement du dosage en ciment avec réduction du rapport E/C.....	90
VI.C- Mesure de retrait et degonflement et la détermination des modules d'élasticité.....	94
VI.D- Modélisation mathématique de l'ouvrabilité des mélanges en fonction de la composition par la simulation mathématique des expériences.....	103
VI.E- Conclusion .....	109

## Chapitre VII. Conclusion et recommandations.

Conclusion générale.....	111
Perspectives et recommandations.....	113
Références Bibliographiques.....	114

## A N N E X E

Méthodes de calcul de la composition du béton.....	119
I - Méthode de calcul selon DREUX.....	119
II - Méthode de calcul selon BARON - LESAGE.....	133
III - Programme de calcul de la composition du béton par la méthode de BARON LESAGE pour différents rapports S/G.....	141

## AVANT PROPOS

Ce travail de recherche est réalisé dans les laboratoires de l'UREG / ENDMC de Boumerdès et au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma parfaite reconnaissance que j'ai envers tous ceux qui de près ou de loin, m'ont apporté leur concours de quelque nature que ce soit.

Cette recherche a été réalisée sous la direction du professeur Mohamed Tahar ABADLIA, Chef de Département de la Post-Graduation à l'Institut National des Matériaux de Construction (INMC) de Boumerdes.

Et je le remercie de m'avoir soutenu tout au long de mon travail, qui par ses conseils, son savoir, sa confiance et son expérience m'a permis de mener à bien ce travail.

Il m'est aussi agréable de remercier également le professeur : Abderahim BALI ENP EL HARRAH d'avoir bien voulu accepter de présider le jury de soutenance, ensuite mes remerciements vont aussi vers tous les membres de jury qui ont accepté au détriment de leurs préoccupations professionnelles de faire partie du jury en l'occurrence :

- Mr BERAH M. m. de conf. E N P EL HARRACH
- Mr LARADI N. m. de conf. UNIVERSITE Bab EZZOUAR
- Mr BENMOUNAH A. c. de c. I N M C BOUMERDES

Et je leur exprime toute ma gratitude pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail.

Je ne puis mentionner tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail que ceux qui m'ont aidé d'un simple encouragement à un appui continu trouvent ici l'expression de ma reconnaissance très sincère.

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

La réalisation de logements, d'ouvrages d'art et de bâtiments industriels constitue une place stratégique dans le processus de développement et de progrès d'un pays et par conséquent l'amélioration de la qualité et l'augmentation de la durabilité des constructions s'imposent. /

Depuis que le matériau béton existe, les chercheurs se sont toujours intéressés à l'augmentation de la résistance mécanique à la compression du béton par différents procédés tels que la centrifugation, la vibration, la compression sur le béton frais, etc...

La recherche est une voie incontournable à l'aboutissement d'une meilleure connaissance du matériau et à la mise au point de matériaux nouveaux avec des conceptions nouvelles.

Le matériau béton demeure toujours l'élément-clé dans la construction et présente une partie intégrante dans la constitution de l'ossature des ouvrages, son emploi large et intensif soulève le problème de sa qualité et de sa durabilité. /

Recentment, certains pays optent pour des réglementations nouvelles de contrôle mettant l'accent à la fois sur la résistance mécanique et la durabilité.

A défaut de la qualité du matériau, des endommagements risquent de survenir et peuvent entraîner des frais considérables pour la refecton et la réparation sinon dans le cas défavorable procéder au remplacement pur et simple de l'ouvrage en cause.

C'est donc en définitive pour des raisons d'ordre économique que la recherche des moyens techniques d'amélioration sont indispensables et nécessaires pour assurer les performances du béton.

Parmi ces moyens techniques, nous citons à l'exemple des adjuvants superplastifiants.

L'emploi des superplastifiants, reducteurs d'eau permet des rapports eau/ciment faibles. Cette composition confère au béton adjuvanté une faible porosité d'où résultent une résistance à la compression élevée et une grande durabilité.

Cet apport de performance technique supplémentaire se traduit également par une économie sensible de la matière noble à l'exemple du ciment.

En d'autres termes, si en effet, nous pouvons gagner une faible fraction de la masse d'un pont par une étude technique très complète du milieu mécanique, il est possible, au contraire d'économiser une fraction très considérable de cette masse par l'emploi d'une matière de qualité supérieure (cas de redimensionnement de l'ouvrage en génie civil du B35 à B60 ou un gain en volume pourrait atteindre 30 %).

Et ainsi, les grandes étapes de réalisations techniques sont marquées par des conquêtes de l'homme sur la matière .

Dans notre pays, le développement des adjuvants est à l'état embryonnaire. Le pourcentage d'utilisation des bétons adjuvés en Algérie n'est que de l'ordre de 1 % environ, Alors que dans d'autres pays le pourcentage est très élevé à savoir : 25 % en France 40 % en URSS, 45 % en R F A, 50 % au Royaume Uni et 70 à 80 % aux USA, au Canada et au Japon;

Les raisons qui empêchent l'utilisation de ces produits, en Algérie sont diverses mais en particulier elles sont dues à :

- L'ignorance de l'efficacité et des modalités exactes de leur emploi,
- la méconnaissance de l'impact des produits sur la qualité du béton,
- l'inexistence de recherche d'application sur les bétons adjuvés.
- l'absence de sensibilisation d'emploi d'adjuvants dans le secteur habitat, travaux publics et hydrauliques.
- L'inexistence de la compétitivité de la qualité du béton aux différents domaines d'application.
- l'absence de conception nouvelles pour un matériau nouveau.

Tous ces facteurs nous laissent à prendre un thème d'une part pour récupérer un déchet industriel qui est un sous-produit de l'industrie de la cellulose et d'autre part de l'introduire dans l'eau de gâchage d'un mélange de béton hydraulique. La valorisation de ce déchet dans l'industrie du béton s'est inspirée que certains adjuvants utilisés à ce jour sont des produits à base de dérivés de l'industrie de la fabrication du papier.

C'est dans cette optique que nous menons notre étude pour faire de ce déchet industriel une approche à un adjuvant plastifiant et/ou un superplastifiant et/ou un plastifiant réducteur d'eau.

Notre travail d'investigation est composé en trois (03) parties importantes :

a)- Etude bibliographique qui se rapporte à :

- l'étude des bétons et ses constituants.
- l'étude des adjuvants du béton.
- l'étude des propriétés du béton et leur comportement vis à vis de la présence des adjuvants.
- l'étude des méthodes de calcul des compositions du béton (portée en annexe).

b)- Etude et caractérisation des constituants du béton : (ciment, eau, déchet industriel, sable, gravillons : fraction 3/8 et 8/16).  
- Elaboration d'une composition de béton.

c)- Etude expérimentale de l'influence du déchet industriel sur le comportement du béton frais et béton durci.

- Optimisation d'une formulation en terme de performance mécanique

L'objectif de notre travail consiste à mettre en évidence.

- La récupération du déchet industriel pour sa valorisation.
- l'état de l'influence du déchet industriel sur le comportement du béton frais.
- L'état d'amélioration de la qualité du béton durci.
- L'optimisation d'une composition de béton par l'introduction du déchet industriel.
- La caractérisation du déchet utilisé par rapport aux adjuvants normalisés .

**PARTIE A**

**RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE**

**CHAPITRE N° I**  
*LE BETON HYDRAULIQUE ET*  
*SES CONSTITUANTS*

# LE BETON ET SES CONSTITUANTS

## 1- Généralités :

Le mot Béton dans son sens actuel, fut introduit par l'ingénieur BELIDOR auteur de "l'architecture hydraulique" en 1737 et étudia la composition du béton [1].

C'est en 1824 que fut découvert le ciment Portland par ASPDIN qui permit l'avènement du béton, c'est en fait le mariage ciment - métal, appelé ciment armé, puis béton armé qui va donner au béton son plein essor.

Le vingtième siècle va voir le développement du béton et parallèlement, l'évolution de ses techniques par :

- usage croissant des adjuvants
- béton prêt à l'emploi
- du matériel de mise en oeuvre ou mise en service.
- une mise au point du béton précontraint par FREYSSINET en 1929.

Depuis le début du siècle, les chercheurs se sont intéressés à l'augmentation de la résistance mécanique en compression du béton par différents procédés tels que : la centrifugation ou la compression du béton frais. Des produits de résines et des fibres sont apparus plus tard pour conférer des grandes résistances aux bétons mais à des prix très élevés.

Actuellement, on arrive, après une sélection des matériaux, à fabriquer des bons bétons maniés et très résistants à coût raisonnable.

Ce type de béton adjuvanté présente des caractéristiques remarquables : les résistances mécaniques et les modules d'élasticité élevés, le retrait et le fluage diminués et enfin l'imperméabilité, la durabilité et l'adhérence avec l'acier en nette amélioration.

Plusieurs laboratoires du monde entier s'intéressent de plus en plus à une étude approfondie de ses caractéristiques.

Le progrès réalisé à ce jour dans les bétons, lui donne ses lettres de noblesse dans le bâtiment.

## 2- Recherche et développement :

Le béton de ciment constitue un des matériaux les plus durables; par exemple, on peut admirer "le PANTHEON" édifice célèbre de ROME ANTIQUE qui fut pourtant construit avec un ciment naturel rudimentaire. Egalement une forteresse en béton érigée vers 1870 près de Copenhague demeure en excellent état malgré son exposition à des conditions climatiques particulièrement rigoureuses (le bâtiment est attaqué par l'eau de mer et subit l'action de nombreux cycles de gel et dégel ) [2].

Le matériau Béton utilisé dans les ouvrages de génie civil depuis des décennies a fait preuve de sa résistance et de sa durabilité. Le génie civil est une activité vieille comme l'humanité, puisque depuis ses origines, l'homme a toujours construit pour modifier le cadre de vie que lui offrait la nature.

Il a cependant constamment voulu faire mieux, moins cher et plus durable. Ainsi est née, dans un passé relativement récent la recherche en génie civil, qui occupe une place modeste dans le secteur de la recherche et pourtant l'effort de recherche est indéniable et son efficacité peut s'apprécier au haut degré d'innovation qui donne au génie civil une place les plus honorables dans le monde.

**Par ses qualités :**

- Le béton est présent dans tous les domaines du bâtiment et des travaux publics grâce à ses performances et à sa souplesse d'emploi adapté aux formes voulues.

- Le béton fait partie de notre cadre de vie, il a mérité sa place par ses caractéristiques de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, sa durabilité, son imperméabilité etc... ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects.

- Le béton permet, grâce à la précontrainte de réaliser de très grandes portées. (pont, bâtiment industriel, etc...).

- Le béton est dans les routes et dans tous les types de voiries: telles que les autoroutes, les pistes d'atterrissages, etc..

- Et enfin, le béton possède une large disponibilité de ses constituants.

**3- Classification :**

Le béton peut être classé selon les propriétés bien définies, ainsi la norme GOST [3] caractérise le béton par sa densité, le type de liant et sa destination. Tandis que la normalisation française (N.F) a établi une classification selon trois (03) critères, par sa dimension maximale ( $D_{max}$ ) des granulats, sa résistance caractéristique ( $F_{ck}$ ) en compression et sa consistance (A.F). [4]

**4- Les constituants :**

Le mélange en proportions variables de ciment (C) ; d'eau (E); d'air (A); de sable (S) et de pierres (P) constitue un béton représentant approximativement 30 % de pâte de ciment et 70 % de granulats (S+P) en volume.

Proportions selon [2].

Composant	C	E	S	P	A
en masse (%)	9/18	6/9	23/35	35/55	--
en volume (%)	7/15	14/19	20/30	30/48	4/8

#### 4.1- Le ciment :

Le ciment portland est un liant hydraulique fabriqué à partir d'une roche calcaire et d'une roche argileuse (ou schisteuse) sources de chaux, d'alumine, de silice et du fer [3],

Tab.I.1 : sa composition chimique.

constituants	Formule chimique	Teneur (%)
Chaux	CaO	62 ÷ 68
Silice	SiO <sub>2</sub>	21 + 24
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4 + 8
Fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 + 5

Tab.I.2 : sa composition minéralogique

Composés minéraux	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
% (en masse)	45 ÷ 65	15 ÷ 35	4 ÷ 14	10 ÷ 18

La qualité du ciment portland dépend de sa composition minéralogique. Les minéraux formés ont une influence remarquable.

Tab.I.3 - Composition typique des ciments portland [2] normalisés par ACNOR (association canadienne de normalisation).

Type de ciment	Description	Composition (%)			
		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
10	normal	49	25	11	8
20	modéré	44	31	5	13
30	haute résist. initiale	58	14	11	8
40	faible chaleur d'hydratation	28	46	5	13
50	Résistance aux sulfates	41	38	4	10

Les propriétés du ciment qui caractérisent sa qualité sont déterminées par des essais normalisés en vigueur tels que : la finesse de mouture, la consistance normale, le temps de prise, l'expansion, le retrait et le gonflement, et enfin les résistances mécaniques.

#### 4.2- Eau de gâchage :

L'eau est, au même titre que le ciment et les granulats dans la constitution du béton. Elle remplit une double fonction lors du gâchage [5].

- une fonction physique qui confère au béton les propriétés rhéologiques.
- Et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction dite d'hydratation.

L'eau, après gâchage du béton, est multiforme [6].

- libre,
- adsorbée à la surface des constituants solides,
- combinée dans les hydrates du ciment,
- absorbée par les granulats à porosité ouverte.

La norme AFNOR [7] spécifie les caractéristiques et tolérances de l'utilisation de l'eau de gâchage pour les bétons de construction.

Le tableau suivant nous donne approximativement les limites de concentration permise pour chaque substance dans l'eau de gâchage [6].

Tab.I.4 : Concentration maximale suggérée dans l'eau de gâchage pour différentes substances courantes.

Substances	Concentration (mg/l)
Bicarbonates (Na,K, Ca, Mg)	500
Chlorures	20.000
Sels de Cu, SN, Z1, pb et Ar	500
Particule en suspension (argile, poussières etc..)	2000
Carbonates	1000
Sulfates	1000
Sucres	1000
Résidus d'égouts	100
Acides	10 000
Sulfures	250
Sel de Fer	2500

- La présence d'impuretés excédentaires pourrait engendrer des phénomènes d'efflorescence et de tâches, la corrosion de l'acier, la diminution de la résistance et une modification du temps de prise.

- Le contrôle de la qualité de l'eau de gâchage pour la préparation du béton s'établit sur l'analyse chimique de celle-ci d'une part, les essais de temps de prise et les essais d'influence pour évaluer l'effet des impuretés d'autre part.

#### 4.3- Les granulats :

- Un granulat est défini comme étant un ensemble de grains de dimensions comprises entre 0 et 80 mm [8].

- Les granulats sont des matériaux granulaires inertes qui agglomérés par un liant, constituent le squelette du béton [9], occupant environ 80 % du volume du béton.

- Le granulat désigné dans le vocabulaire classique agrégat, possède des propriétés géométriques, physiques, chimiques et mécaniques qui permettent de l'identifier, de le classer selon leur destination et leur utilisation (granulats pour bétons divers, granulats pour routes diverses ; granulats pour ballasts ferroviaires, etc...) [10].

**Tableau I.5a.b : spécifications et exigences techniques des granulats entrant dans la préparation des bétons hydrauliques conformément aux normes en vigueur.**

**a- Sable pour béton hydraulique :**

Spécifications	Exigences normative (NFP 18.301)	norme d'essai
<b>D)- Caractéristiques physiques</b>		
<b>a)- Granularité</b>	Fuseau général (en commentaire) % passant 5.000 mm 95 - 100 2.500 mm 80 - 100 1.250 mm 55 - 90 0.630 mm 30 - 70 0.315 mm 15 - 40 0.160 mm 5 - 20 module de finesse (en commentaire) 1.8 à 3.2 Continuité de la courbe % entre deux tamis < 40 %	P18.304
<b>b) Absorption d'eau</b>	- ab. < 5 % peut être abaissé à 2 %	P18.555
<b>c)- Homogénéité</b>	- H ≥ 90 % Peut être porté à 97 %	P18.571
<b>d)- Teneur en fines</b>	- Passant à 0.080 mm < 10 % Peut être limité à 6 %	P18.304
<b>II)-Caractéristiques mécaniques</b>	- Friabilité du sable FS ≤ 40 Peut être abaissé à 25	P18.576
<b>III)-Caractéristiques physico chimiques</b>		P18.586
<b>a)- Matières organiques</b>	- Essai colorimétrique suivi d'essais mécaniques si nécessaire	
<b>b)- Impuretés</b>	- Le granulat ne doit pas contenir de bois charbon, résidus, etc...	
<b>particules friables</b>	- Eléments coquilliers	P18.587
<b>c)- Equivalent de sable</b>	- Fragments de coquillages ≤ 30 % - ESV ≥ 75 pour sables naturels - ESV ≥ 65 pour sables concassés	P18.598
<b>d)-Chlorures</b>	Pour les sables avec ESV ≤ aux limites fixées, la valeur de bleu des fines doit être ≤ 1 g pour 100 g de fines. - < 0.1 % valeur à fournir si elle dépasse 0.1 %	P18.583
<b>e)-Sulfates et sulfures</b>	- DTU 21-4 béton armé : 0.65 % du poids de ciment dans le béton - Soufre totale en SO <sub>3</sub> < 0.4 %	P18.582

b- Graviers - gravillons pour béton hydraulique :

Spécifications	exigences normatives (NFP 18301)	Normes d'essais
D)- Caractéristiques physiques		
a)- Granularité	$\frac{1}{3} < \frac{d+D}{2} < \frac{2}{3}$	P18.304
b)- Absorption d'eau	Ab < 5 % peut être à ≤ 2 %	P18.554
c)- Coefficient d'applatissement	A ≤ 30 %	P18.561
II)- Caractéristiques mécaniques	- Los Angelès - LA ≤ 40 peut être abaissé à < 25 - Micro Deval humide MDE ≤ 35 peut être abaissé à < 20	P18.573  P18.572
III)- Caractéristiques physico-chimiques		
a)- Impuretés particules friables	Eléments coquilliers Coquillages creux ≤ 5 % Coquillages plats ≤ 10 %	P18.587
b)- Propreté	Passant à 0.5 mm < 2 % pour gravillons concassés < 5 % Mais essai au bleu des fines satisfaisant (voir sable)	
c)- Chlorures	≤ 0.1 % Valeur à fournir si elle dépasse 0.1 %	P18.583
d)- Sulfates - Sulfures	Soufre total en SO <sub>3</sub> < 0.4 %	P18.582

Les granulats, qui représentent 70 à 80 % du volume du béton, jouent un rôle très important dans le comportement mécanique et dans la durabilité du matériau.

#### 4.4- Les adjuvants :

Un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose inférieure à 5 % dans le béton provoque des modifications de certaines de ses propriétés [11].

Les adjuvants du béton sont des produits minéraux ou organiques à l'état de poudre ou liquide et ne comprennent pas les matériaux qui peuvent être des constituants du ciment ou de béton tels que les cendres volantes, le laitier, la pouzzolane ou la fumée de silice [12].

Les adjuvants ne constituent pas une solution improvisée à un problème mal étudié, ils doivent encore moins être utilisés pour revaloriser un béton mal formulé ou de mauvaise qualité mais ils rapportent une amélioration recherchée à une propriété bien définie du béton.

Nous ne pouvons nous étaler davantage, les adjuvants du béton sont donnés au chapitre suivant.

## CHAPITRE N° II

### *LES ADJUVANTS DU BETON*

## LES ADJUVANTS DU BETON

Un adjuvant du béton n'est ni un dope, ni un palliatif et ni une panacée, il est appelé à renforcer ou à conférer des qualités au béton [13] .

### 1- Aspect évolutif :

Les premiers adjuvants utilisés déjà remontent à l'ère des chinois qui employaient des oeufs lors de la construction de la muraille de chine, et aussi des romains qui introduisaient du sang et du lait dans leurs bétons.

Vers 1880, l'incorporation du gypse ou du chlorure de calcium a permis de régulariser la prise du ciment.

Vers 1888, Mr CANDLOT a mis en évidence en adjuvant " $\text{CaCl}_2$ " capable d'accélérer ou de retarder la prise selon la concentration de dosage dans le béton.

L'emploi des adjuvants est devenu une préoccupation majeure pour les utilisateurs du béton, de pouvoir régler la durée de prise, de l'accélérer ou de confectionner des bétons étanches. L'incorporation de silicate de soude et de divers savons a permis d'améliorer l'imperméabilité.

Les adjuvants plastifiants tels que "KIESELGUR" ont été employés en 1925 aux U S A et furent commercialisés vers 1935. Tandis que les entraîneurs d'air sont apparus aux USA en 1947. Les adjuvants résistants au gel sont constitués principalement des huiles minérales sulfonnées ou des huiles végétales.

Les Allemands , durant la première guerre mondiale, faisaient retarder la prise des bétons par l'emploi à faible dosage ( env. 1,0 %) d'acide phosphorique.

Des adjuvants plus performants à savoir les plastifiants, les fluidifiants et les réducteurs d'eau sont apparus récemment et assurent une meilleure qualité du mélange de béton.

Il reste bien entendu de nombreuses recherches à entreprendre pour améliorer la qualité des adjuvants et aussi à trouver des nouveaux produits performants et mieux adaptés tels que:

- Les produits capables d'arrêter ou de limiter la formation de certains types de fissures.
- Les produits capables de protéger les armatures contre l'oxydation.
- Les fils du béton précontraint à être revêtus d'un retardateur de prise pour pouvoir tirer les fils juste après la prise de la masse du béton, etc...

En effet, par leur performance technologique et leur évolution considérable qui ne cesse de s'épanouir, les adjuvants sont devenus des produits nécessaires et indispensables aux bétons modernes.

## 2- Classification :

La classification des adjuvants du béton est établie souvent en fonction des propriétés que les adjuvants confèrent au béton frais et durci.

La classification soviétique est faite selon leur action [14].

La classification américaine est établie en quinze groupes suivant la nature du produit [15].

La classification allemande se décompose en six catégories d'adjuvants [16].

La classification française est basée sur leur fonction principale (Rhéologie, teneur en air, prise et durcissement) [15].

Les adjuvants algériens sont fabriqués par la société GRANITEX et sont désignés par leur action dans les mortiers et les bétons [18]. D'autres chercheurs préfèrent classer les adjuvants, selon la nature physico-chimique ( les insolubles, les tensio-actif et le soluble) que par des propriétés rhéologiques.

### 3 - Rôles et domaines d'application des principaux adjuvants.

L'action et le domaine d'utilisation de quelques principaux adjuvants se présentent selon le tableau ci-après :

Tabl.n° II.1 : Effets et domaines d'utilisation des principaux adjuvants [05,19].

DESIGNATIONS	ACTIONS	EFFETS	DOMAINES D'UTILISATION
Plastifiants	Modifient la rhéologie du mélange	-Améliore l'ouvrabilité -améliore l'homogénéité -Réducteur d'eau	-Béton haute résistance -Béton très ferrillé -Béton prêt à l'emploi -Béton injecté et projeté -Béton pompé
Fluidifiants		-Améliore sensiblement l'ouvrabilité et l'homogénéité -Améliore la résistance mécanique -Réducteur d'eau et deciment	
Entraîneurs d'air		-Augmente la résistance au gel et l'imperméabilité -Diminue la capillarité et la ségrégation.	
Accélérateurs	Modifient la prise et le durcissement	-Diminue le temps de prise ainsi que faiblement la Résistance Mécanique -Augmente la productivité des moules	-Bétonnage par temps froid -préfabrication -travaux sous eaux
Retardateurs		-Augmente le temps de prise -Augmente la résistance finale	-Bétonnage par temps chaud -Béton transporté à grande distance -Bétonnage répété
Antigels	Modifient la résistance aux actions physiques et chimiques	-Protège béton durci	-Bétonnage par temps froid -Béton de préfabrication -Béton prêt à l'emploi
Hydrofuges		-Augmente l'étanchéité -Diminue l'absorption capillaires	-Béton pour travaux Hydrauliques -Canalisations hydrauliques
Colorants	Modifient l'aspect architectural	-Colore la masse du béton	-Esthétique du béton

#### 4 - Rôle et mécanisme de la plastification

Autrefois, il existait des plastifiants classiques qui n'étaient que des produits d'addition pulvérulents et très fins qui, ajoutés au mélange de mortier ou de béton, permettaient d'accroître la maniabilité sans augmentation de la quantité d'eau de gâchage tels que la chaux grasse, la bentonite, la pouzzolane très fine, la cendre volante etc...

A l'heure actuelle, l'évolution technologique nous a permis de mettre au point des plastifiants par adsorption qui sont des produits très différents chimiquement des précédents ; ils se rattachent à ce que nous avons appelé les composés polaire - apolaires, c'est à dire dont la molécule comprend une partie tensio-active, à effet hypotenseur, en phase aqueuse, aux interfaces ou elle est adsorbée, et dont l'autre partie est hydrophile et facilite le mouillage, concurremment avec la première qui abaisse la tension interfaciale au contact : grain de ciment - eau.

Le mécanisme de la plastification relève de la théorie de LANGMUIR et également de la théorie de la double couche ionisée formulée par HELMOLTZ.

Lors de la mise en contact des grains de ciment avec une phase aqueuse où l'on a dissout ou dispersé un plastifiant, le phénomène de plastification se caractérise suivant les modèles représentés ci-dessous :

#### 4.1- Mécanisme de la défloculation et de la séparation granulaire des colonies des grains fins, élimination de l'air inclus dans les colonies.

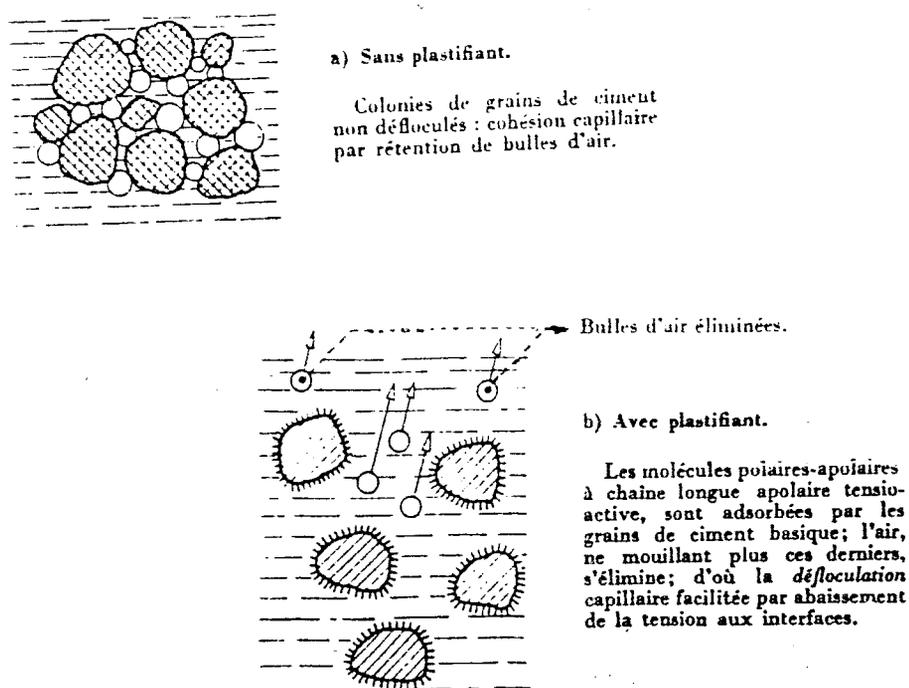


Fig. II. 1 a , b: Mécanisme de la défloculation avec et sans plastifiant [ 13 ].

#### 4.2- Mécanisme de la réduction d'eau sans diminution de la maniabilité.

Le mécanisme de la réduction de l'eau de gâchage se résume comme suit :

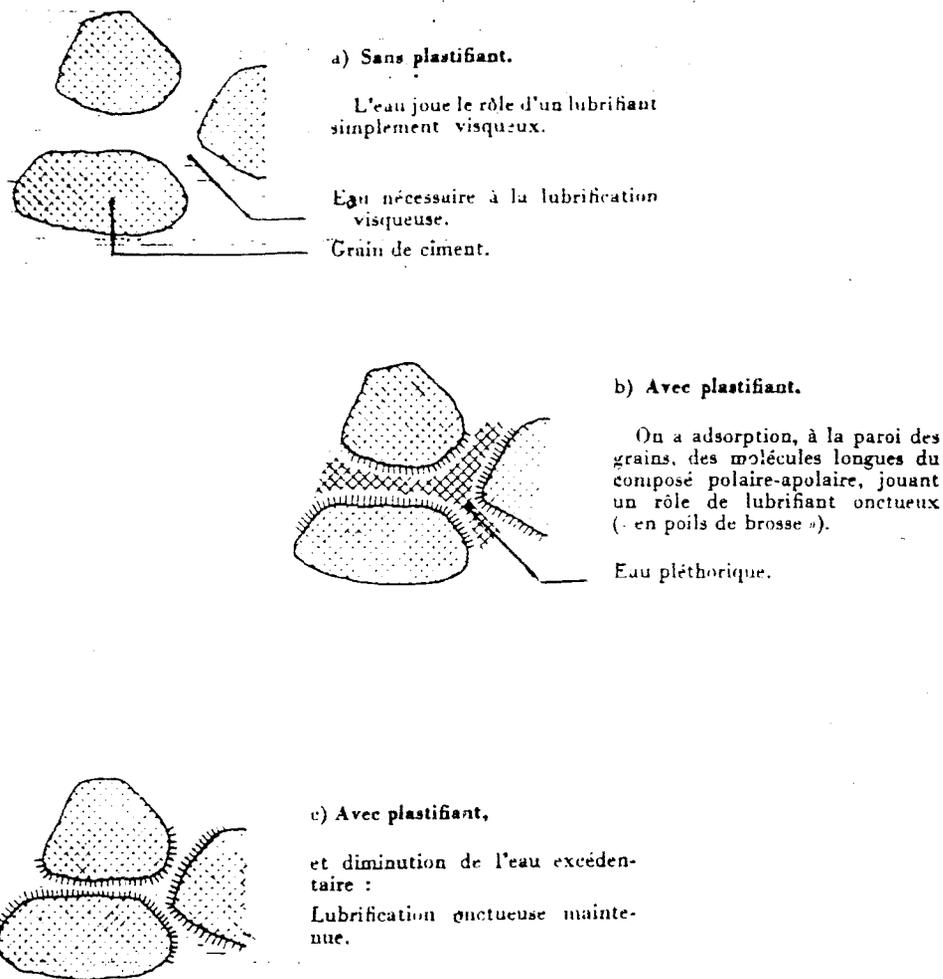


Fig. n° II. 2- a,b,c : Mode de l'action des adjuvants réducteurs d'eau [ 13 ]

#### 5- Action des adjuvants : plastifiants et fluidifiants.

Ces types d'adjuvants créent une défloculation de la pâte de ciment, une dispersion des bulles d'air et en parallèle une lubrification par adsorption sur la paroi des grains, ce sont des produits tensio- actifs dont la chaîne de liaison atomique est amphipathique, c'est à dire elle possède une extrémité hydrophile et une autre hydrophobe. Les atomes H liés directement au carbone sont hydrophobe et les atomes H liés au carbone par l'intermédiaire d'un atome d'oxygène sont hydrophiles[20].

D'après KREIJGER [21] l'action d'une molécule de fluidifiant sur un grain de ciment se manifeste selon le mode suivant :

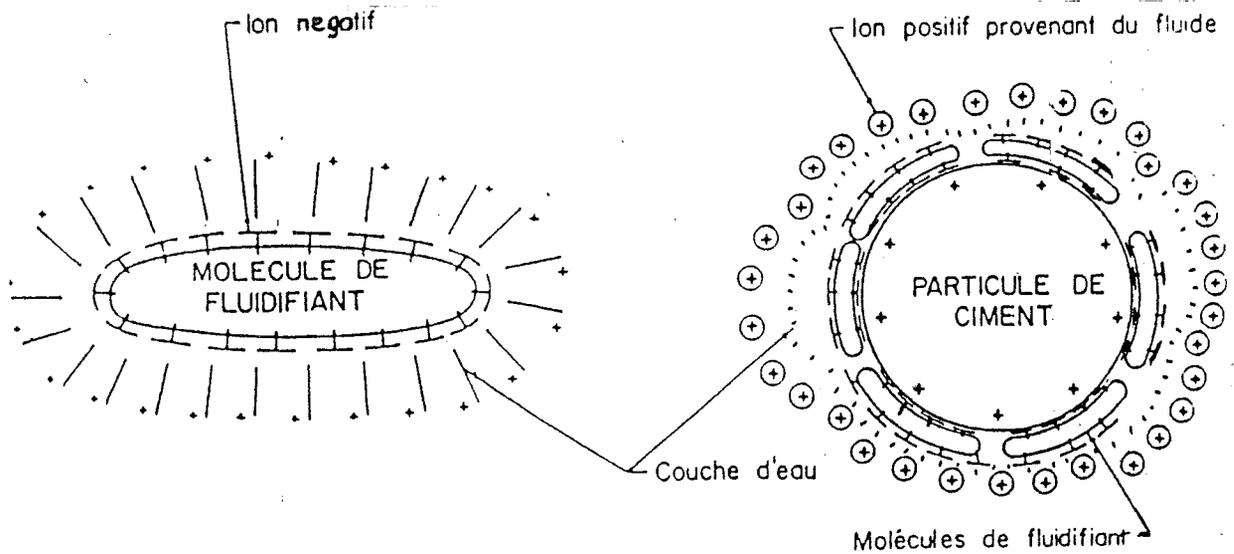


Fig.II.3 : mode d'action d'un fluidifiant [21].

### 5.1 - Action dispersante :

Les bulles d'air se repartissent dans le béton d'une manière homogène en présence d'un agent tensio-actif et tendent à fusionner par coalescence en son absence [22].

Les grains de ciment s'ionisent au contact de l'eau ; la concentration des ions  $\text{Ca}^{++}$  au voisinage immédiat des grains provoque la précipitation et l'adsorption des molécules d'agent de surface dont le sel de calcium n'a qu'une solubilité relativement faible, c'est l'adsorption en flottation [23]. Il en résulte une répulsion des grains, comme pour les bulles, l'adjuvant tensio-actif est ainsi un dispersant pour les grains flocculats. [24]

## 5.2 - Relation plastifiant - fluidifiant :

D'après ALBERT JOISEL, les plastifiants réduisent la perméabilité à l'eau du béton frais, et empêchent ipso-facto l'eau de se déplacer, de couler, de ressuer et de percoler.

Ils maintiennent l'homogénéité tant du point de vue macroscopique que microscopique. Aussi A. JOISEL qualifie un fluidifiant comme un réducteur d'eau qui fait diminuer le rapport (Eau - air/ ciment) pour une même fluidité initiale du béton frais [25].

Par exemple [26]

- l'argile est plastifiante et non fluidifiante.
- L'alcool éthylique est fluidifiant et non plastifiant.
- Un agent tensio-actif peut être fluidifiant et plastifiant.

-et on note en particulier, l'eau est fluidifiante et non plastifiante, le ciment peut être considéré fluidifiant et plastifiant, un fluidifiant intrinsèque n'est pas généralement un plastifiant.

## 6 - Efficacité d'utilisation :

La répartition homogène des bulles d'air, la dispersion des grains de ciment et le mouillage obtenu par l'addition des plastifiants ou des fluidifiants contribuent à l'uniformité des propriétés du mélange et à l'augmentation de la qualité.

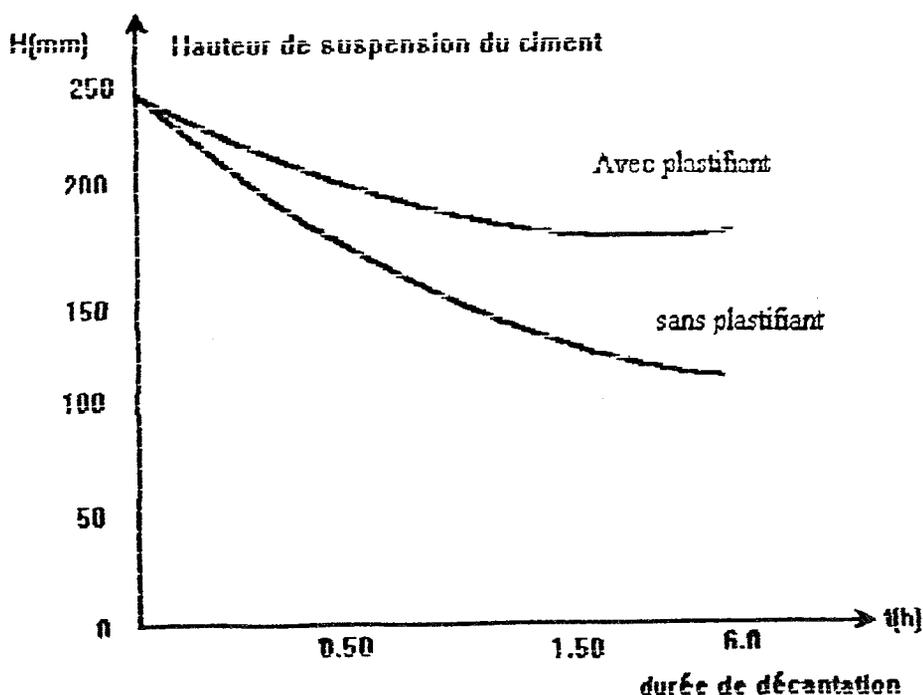


Fig.n° II. 4. L'influence d'adjuvant plastifiant sur la vitesse de sédimentation des grains de ciment [27].

Cette figure caractérise l'effet de dispersion et de défloculation de ciment provoqué par l'addition plastifiante.

La concentration et la nature de l'agent dispersion influent sensiblement sur la fluidité de la pâte de ciment. L'introduction d'adjuvant assure une meilleure efficacité d'emploi de ciment

et d'eau au cours d'une formation d'agglomération de ciment et d'eau car cette dernière entraîne une diminution de l'ouvrabilité et des résistances mécaniques. L'adjuvant permet de réduire le rapport ( E/C ), augmente les résistances mécaniques, améliore l'étanchéité et protège le béton contre la dégradation [28].

## 7 - Produits d'origine des adjuvants plastifiants et superplastifiants :

Ce sont souvent des sels solubles, d'acides organiques hydroxyliques ou des produits à base de sels lignosulfoniques qui sont des composés organiques tensio-actifs à structure moléculaire linéaire dont les radicaux sont hydrophobes et hydrophiles.

Les substances tensio-actifs provoquent un phénomène de peptisation permettant aux particules fines de se disperser, les molécules s'adsorbent conduisant à une lubrification de l'ensemble et à une diminution du frottement interne du mélange [29].

L'agent tensio-actif présente une propriété qui permet d'abaisser la tension interfaciale (superficielle) ou de modifier la nature du film interfacial du milieu dans lequel il se trouve lorsque ceux-ci sont en présence d'autres milieux solides et liquides [30].

Chimiquement, ces adjuvants peuvent être de nature anionique, cationique ou même ionique : ce sont des molécules qui présentent une extrémité fortement chargée qui vient neutraliser un site opposé sur les grains de ciments. Ceux de nature non ioniques, ces molécules agissent comme des dipôles qui se fixent dans les grains [31].

### Cas d'un lignosulfonate :

Ce sont des fluidifiants très puissants commercialisés sous forme de solution concentrée à 25 % de la matière solide, le lignosulfonate est constitué de produits à base d'un déchet des usines de pâtes à papier.

La lignine qui représente 20 ÷ 30 % du bois, est éliminée de la cellulose du bois par l'action dissolvante de bisulfite de sodium (ou de calcium) et l'acide sulfureux, on obtient ainsi des lignosulfonates complexes [32].

Le lignosulfonate est un tensio-actif à caractère anionique, possédant un effet de défloculant car il entoure les grains d'une couche électrisée empêchant l'agglomération des particules.

Le lignosulfonate se caractérise sous forme de liquide de couleur jaune brun à noire, d'un PH se situant entre 3 et 7 à caractère acide ; de densité de 1,15 à 1,18 g/cm<sup>3</sup> à 20°C et d'une solution aqueuse contient 40 à 60 % de lignosulfonate.

## **CHAPITRE N° III**

**ETUDE DE L'INFLUENCE DES PLASTIFIANTS  
ET DES SUPERPLASTIFIANTS SUR LES  
PROPRIETES DU BETON**

## ETUDE DE L'INFLUENCE DES PLASTIFIANTS ET DES SUPERPLASTIFIANTS SUR LES PROPRIETES DU BETON

Le béton, par sa conception, possède des propriétés à l'état initial (frais) et des propriétés à l'état final (durci) et, justement c'est sur l'ensemble de ces propriétés que nous orientons l'étude de l'influence du déchet industriel sur le comportement du béton hydraulique.

### A - Rappel des propriétés du béton :

#### \* Etat frais :

A.1- **Ouvrabilité** : C'est une propriété fondamentale caractérisée par un indice de consistance du béton (affaissement ; étalement ; indice de vibration, etc...).[6, 33]

A.2 - **Thixotropie** : C'est l'aptitude d'un mélange de passer à l'état quasi-liquide sous l'action des forces extérieures (efforts de malaxage) et de rétablir son état initial après achèvement.

A.3 - **Ségrégation** : C'est une propriété d'un mélange de se séparer en différents composants sous l'action des forces extérieures (malaxage insuffisant, vibration excessive, transport, etc...).

A.4 - **Ressuage** : C'est un phénomène de la remontée d'eau en surface du béton fraîchement placé qui engendre de multiples conséquences plastiques : finition des surfaces ; gain local en eau ; l'enrobage d'armature en eau ; fissuration avant prise ; etc... [34]

A.5 - **Compacité** : Elle représente un complément de porosité rapportée à 100 % ; le coefficient de compacité varie en fonction de la consistance ; de l'efficacité des moyens de serrage, et de la forme et grosseur maximum des granulats. [35]

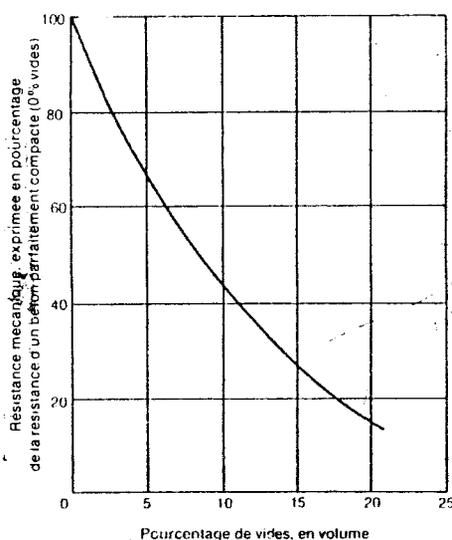


Fig.III.1 : - Relation entre la résistance mécanique du béton et la compacité ou % de vide [35].

## A.6 - consolidation

On emploie aussi des termes, serrage, densification et compactage dans le même sens, la consolidation contribue à l'augmentation de la compacité et la réduction des vides. Le damage, la centrifugation et la vibration sont des procédés pour effectuer la consolidation [2].

\* Etat durci :

### A.7- Masse volumique :

Un béton moins dense signifie la présence de porosités et de cavités qui se manifestent comme des centres de concentrations de contraintes provoquant une diminution de résistance.

### A.8- Capacité d'absorption d'eau :

L'absorption varie de (4 ÷ 8%) pour un béton à granulats denses et (20 ÷ 25%) pour un béton à granulats poreux (légers).

### A.9- Perméabilité :

La diminution du rapport E/C permet de réduire la perméabilité, l'emploi d'adjuvant et certains traitements de surface améliorent l'imperméabilité du béton (voir figure n° III.2 ).

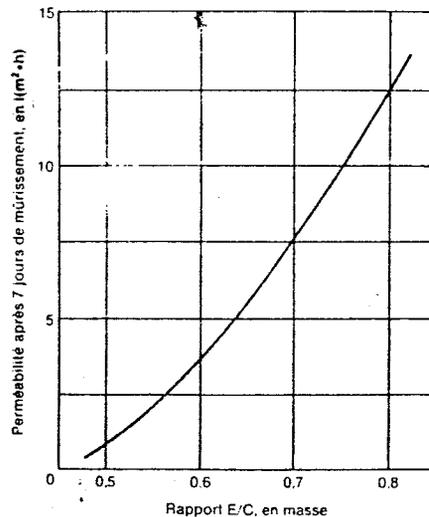


Figure III.2 : Effet du rapport E/C sur la perméabilité d'un béton sans air entrainé [2].

### A.10 - Résistance mécanique.

La résistance mécanique est considérée comme la propriété la plus représentative de la qualité globale du matériau. La résistance mécanique peut être de différentes natures, (compression, flexion, traction, torsion, cisaillement, etc...), et varie généralement en fonction du rapport eau/ciment. [2]

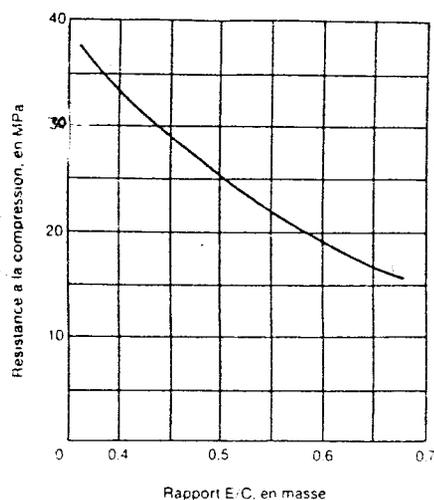


Figure.III.3 : Relation typique entre la résistance à la compression d'un béton et son rapport E/C [2].

En outre, il existe une relation approximative entre les résistances à la compression, à la traction et à la flexion du béton.

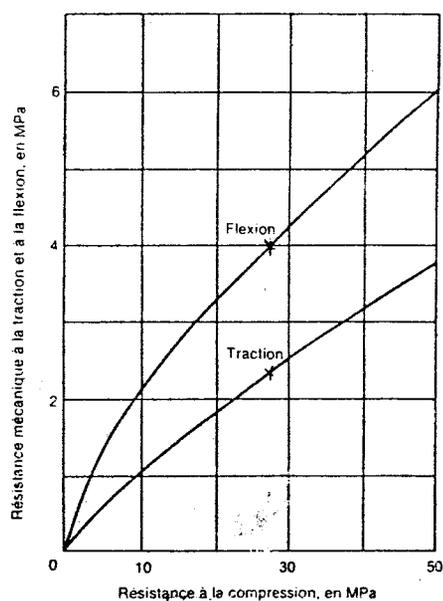


Figure.III.4 : Relation entre la résistance mécanique à la compression, à la traction et à la flexion [2].

### A.11 - Retrait et gonflement :

En absence de toute charge, le béton se déforme spontanément. Cette déformation est liée à l'humidité du milieu de conservation empêchant l'évaporation précoce d'eau de maniabilité. [36, 37] ( voir fig. n° III. 5)

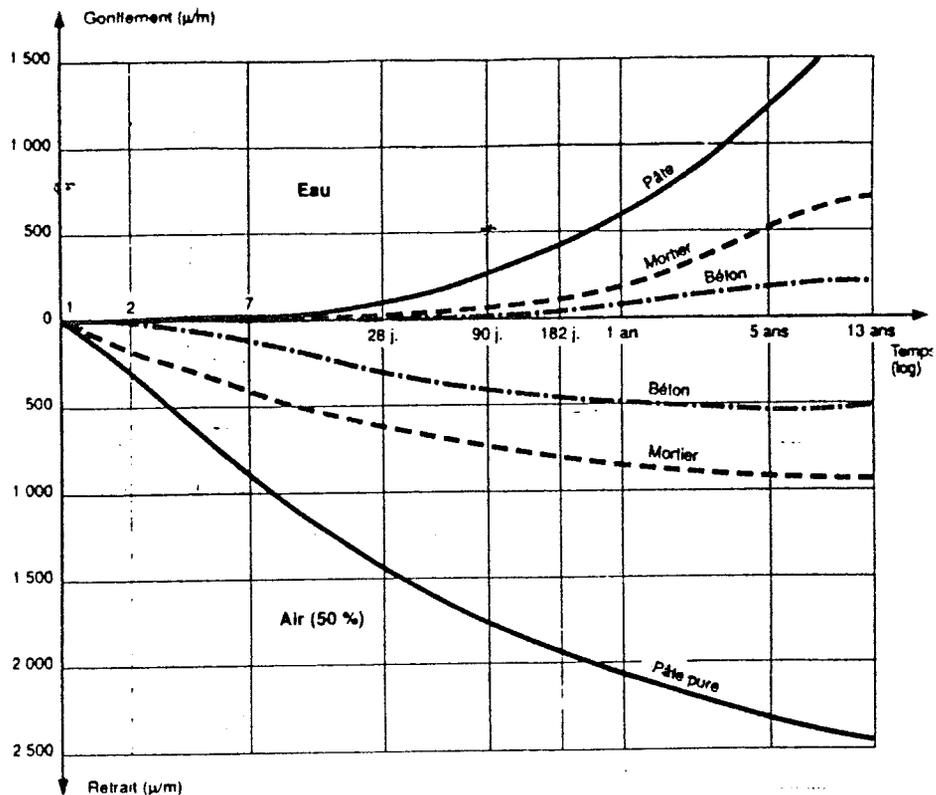


Figure.III.5 : Exemples de courbes de retraits mesurés en laboratoire sur pâte, mortier, béton (CPA 45) [36].

### A.12 - Fluage

C'est un phénomène de déformation différée sous charge fixe indéfiniment appliquée. L'éprouvette gonfle ou se rétracte selon le degré hygrométrique de conservation, puis au cours du chargement, il se produit une déformation instantanée (élastique et plastique) et enfin dans le temps une lente déformation désignée sous le nom de fluage (voir diagramme explicatif). [33, 38]

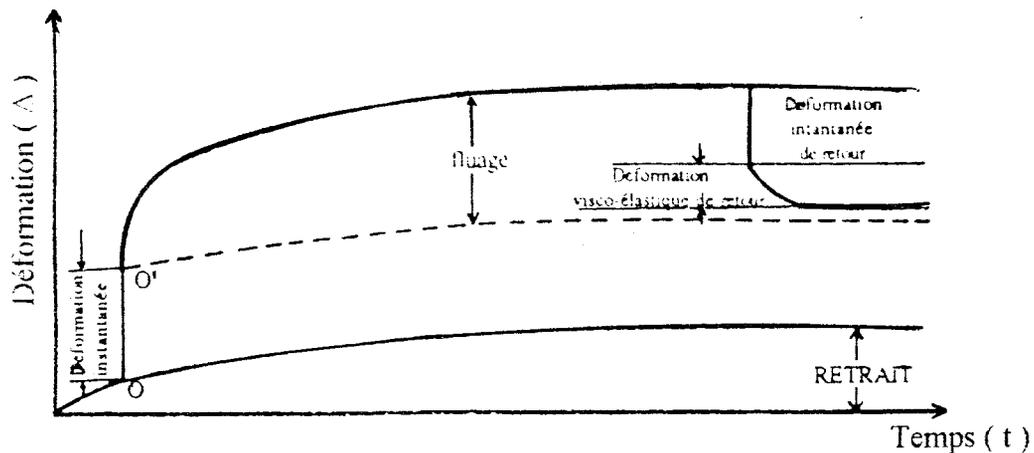


Figure.III.6 : Diagramme du phénomène de fluage [38].

### A.13 - DURABILITE . ( stabilité chimique)

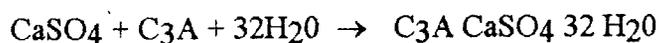
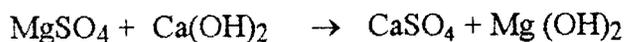
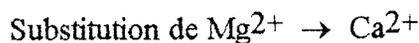
D'après M. DURIEZ, la durabilité est une résistance au béton à se dégrader par les actions physiques et chimiques du milieu. Et d'après M. GORCHAKOV, la durabilité est un temps pendant lequel le béton est capable d'exécuter ses fonctions. Le manque de durabilité en tant que résistance physico-chimique du béton peut dégrader la résistance mécanique à moyen ou à long terme, même lorsque celle-ci est très élevée au début. [39]

En principe, la pierre de ciment représente dans la masse du béton la partie moins résistante et rentre en action avec les agents agressifs.

Les causes principales de corrosion des bétons de ciment sont diverses : [6, 10]

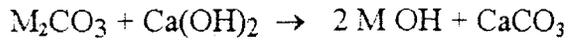
- Action des sels : chlorures - sulfates, etc...

Le mécanisme des réactions peut s'effectuer de la façon suivante :



L'étringite formée engendre un gonflement qui entraîne la fissuration de la structure.

- Action agressive d'origine interne : Alcalis - granulats.



$\text{Mg}(\text{OH})_2$  : la brucite ; avec  $\text{M} = \text{Na} ; \text{K} ; \text{Li}$  .

Ces créations conduisent à une faiblesse de la liaison pâte de ciment - granulats et à la fissuration du béton. Pour contrecarrer l'instabilité chimique, il faut respecter le choix de ciment et granulats, faire diminuer le rapport eau/ciment au minimum possible et éventuellement l'utilisation d'adjuvants dans des meilleurs cas.

## B- ACTION DE L'EAU DE GÂCHAGE EXCEDENTAIRE SUR LES PROPRIETES DU BETON.

### B.1- Aperçu :

L'eau de gâchage dans le mélange agit sous trois aspects différents : mécanique (apparition d'une tension superficielle et développement d'une viscosité); physique (création d'un mouillage accompagné d'une cohésion au mélange) et chimique (dissolution et réactions d'hydratation). La présence d'adjuvants plastifiants déclenche une diminution de la tension superficielle [27].

L'eau de gâchage excédentaire est un élément redoutable pour la qualité du béton, l'eau nécessaire à l'hydratation représente 13 à 20 % du poids de ciment, mais pour des raisons d'ouvrabilité, celle-ci est augmentée pour une maniabilité commode à une mise en oeuvre ou une mise en coffrage.

Cette eau excédentaire entraîne des repercussions néfastes sur la totalité des propriétés du béton qui le caractérise. [41]

### B.2- Son influence sur la porosité :

La porosité augmente relativement avec l'augmentation du dosage en eau. Cette figure nous montre l'élévation linéaire de la porosité par rapport à l'accroissement du dosage en eau [ 6 ]. (Voir figure n°III. 7 ).

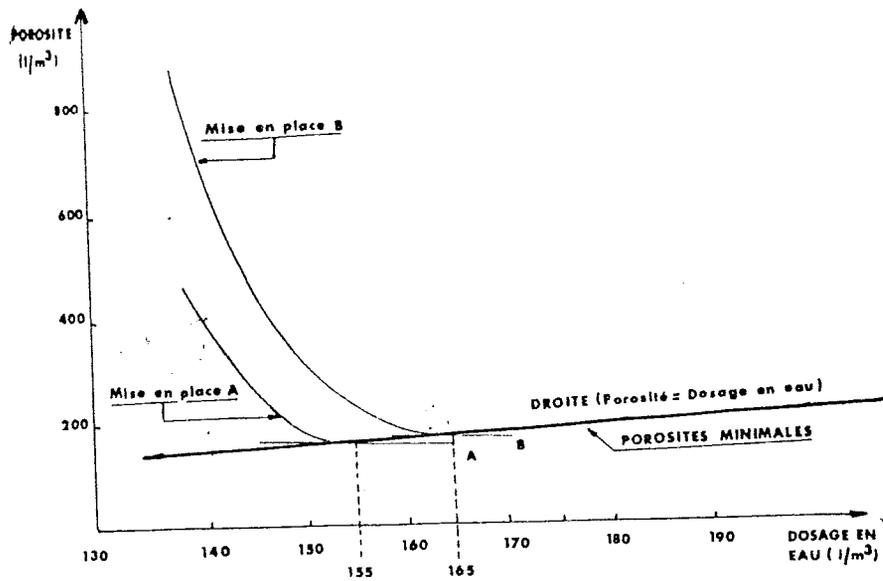


Figure.III.7 : Elévation linéaire de la porosité par rapport à l'accroissement du dosage en eau [06].

- Mise en place A : pervibration en 15 sec
- Mise en place B : table vibrante en 15 sec

En outre, la résistance en compression d'une pâte pure de ciment varie en fonction de sa porosité [36]. (comme indiqué dans la fig.n° III 8)

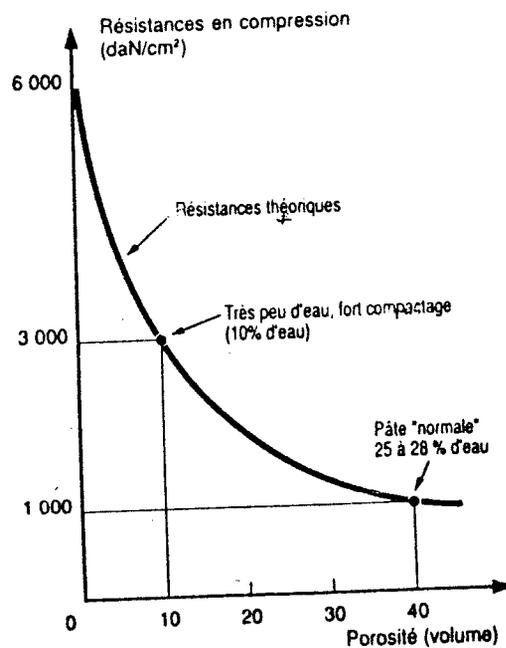


Figure.III.8 : Relation de la résistance à la compression en fonction de la porosité [36].

### B.3- Son influence sur la résistance mécanique :

La résistance mécanique varie sensiblement en fonction de l'augmentation du dosage en eau ; cette relation nous permet de signifier un écart de résistance relativement au mode de compactage. (voir fig.n° III 9)

Les courbes (1) et (2) désignent les éprouvettes vibrées respectivement 15 et 5 secondes sur une table vibrante à air comprimé pour une pression de 1 bar.

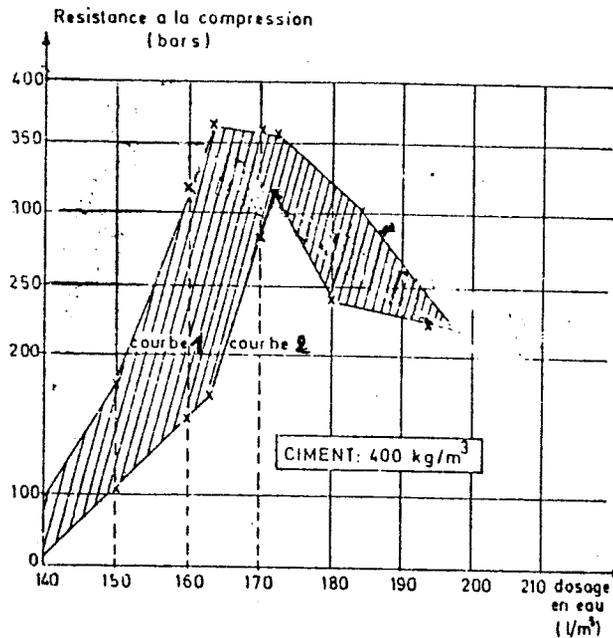


Figure.III.9 : Relation entre la résistance en compression à 7 jours et le dosage en eau [06]

En outre, la résistance mécanique en compression varie en fonction de la variation du rapport E/C. (voir fig.n° III 10 et fig.n°III 11)

- Pour un  $E/C > 0,37$  ; La résistance mécanique augmente tandis que le rapport E/C diminue.
- Pour un  $E/C < 0,37$  ; la résistance mécanique est indépendante de E/C et varie en fonction d'autres facteurs.( adjuvants, etc...).

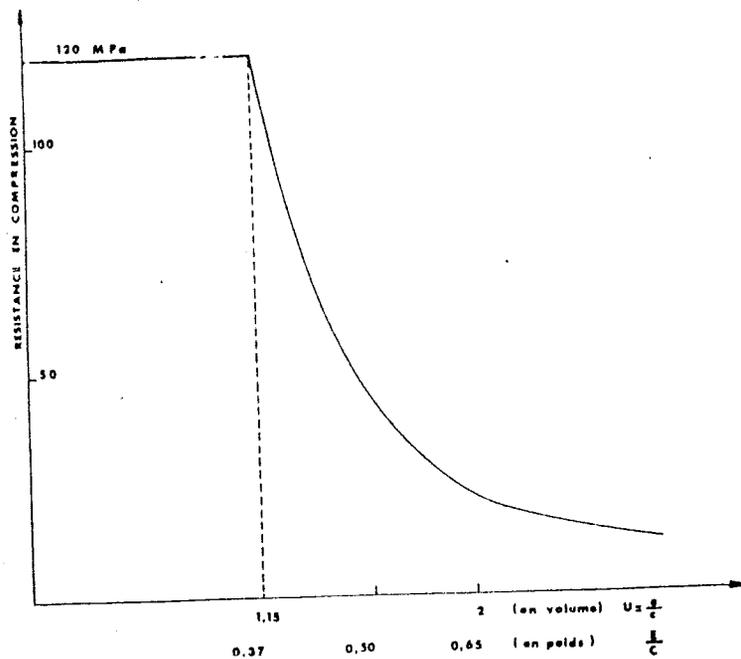


Figure.III.10 : Résultats de GRANJU-MASO 1978 [6].

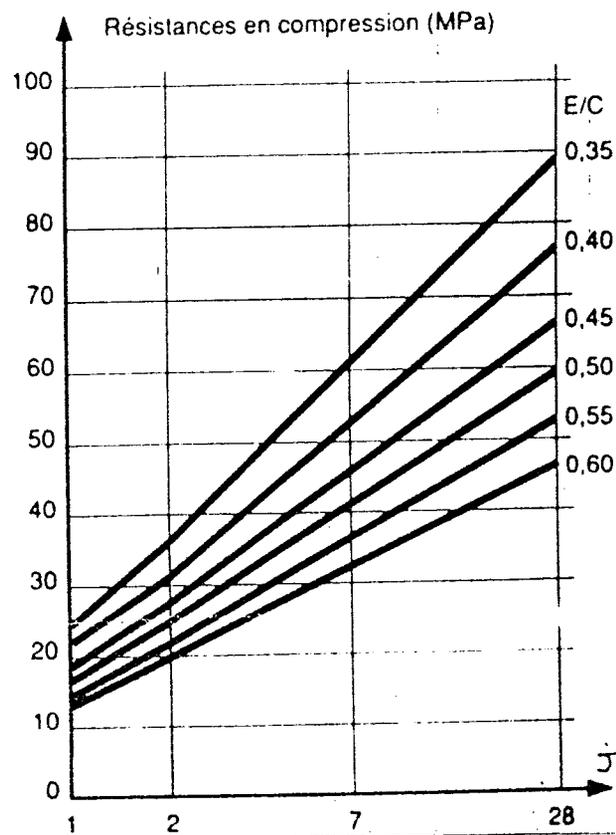


Figure.III.11 : Exemples d'évolution des résistances d'un béton de ciment HP à 20° C en fonction du rapport E/C [36].

#### B.4 - Son influence sur la durabilité :

La meilleure protection contre l'instabilité chimique du béton est sa meilleure compacité. Son dosage en eau a une part importante dans la compacité donc sur la vitesse de carbonatation [42]. Le dosage en eau excédentaire influe sur la carbonatation. Ici, on représente l'épaisseur de la couche de carbonatation formée dans le temps pour des rapports E/C différents

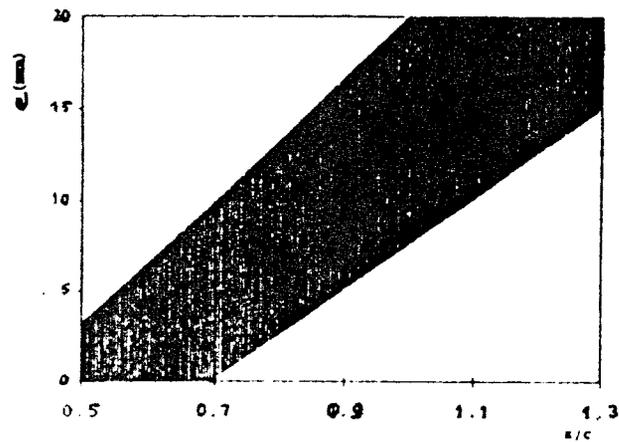


Figure.III.12 : Relation de l'épaisseur de carbonatation et des rapports E/C [42].

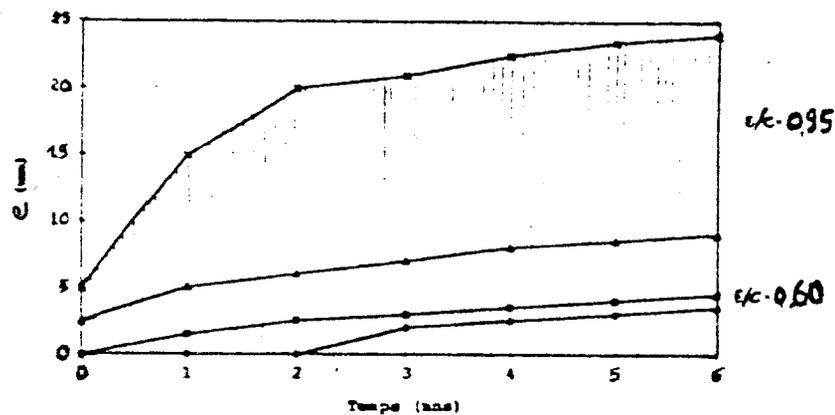


Figure.III.13 : Relation de l'épaisseur de carbonatation dans le temps pour des rapports E/C différents [42].

#### B.5 - Son influence sur l'effet de cycle gel et dégel.

La résistance au gel du béton est d'autant faible que la quantité d'eau de gâchage est forte, d'où une porosité capillaire importante provoque une microfissuration dans la structure du béton par l'effet de congélation du béton [43]

Ce phénomène est dangereux dans les pores capillaires ( $10^3 \div 10^{-1} \mu\text{m}$ ) et non dangereux dans les micropores ( $10^{-1} \div 10^{-4} \mu\text{m}$ ).

Il faut cependant tenir compte du béton à entraîneur d'air, qu'il s'agit des pores extrêmement fins sans communication entre eux et qui n'influencent pas la compacité. Il existe une relation qui exprime la porosité capillaire en fonction d'eau de gâchage (E), d'eau d'hydratation du ciment (W) après 28 jours dans les conditions normales et de quantité de ciment (C).

$$P_{\text{cap}} = \left[ \frac{E - 2 WC}{1000} \right] 100, \quad (\%) \quad [44]$$

### B.6- Son influence sur le retrait et le fluage

#### B.6.1- Le retrait :

Le retrait est un phénomène hygrométrique qui résulte principalement du départ d'eau retenue dans les pores et les capillaires. VERBECK en 1968, a réalisé l'accroissement du retrait en fonction de la perte du poids sur une pâte de ciment à l'âge de 07 jours avec un rapport E/C égal à 0.50. [45] (voir fig.n°III 14).

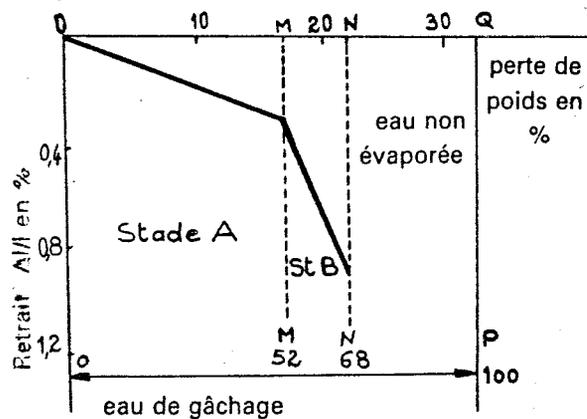


Figure.III.14 : Relation entre le retrait et la perte en poids.[45].

Stade A du retrait résulte le départ d'eau des capillaires qui représente 52 % d'eau évaporée.

Stade B du retrait résulte le départ d'eau des pores qui représente 16 % d'eau évaporée.

En outre, VERBECK a réalisé une variation du retrait A total des pâtes de ciment âgées de 90 jours en fonction du rapport E/C de ces pâtes. La figure n° III 15 illustre cette variation

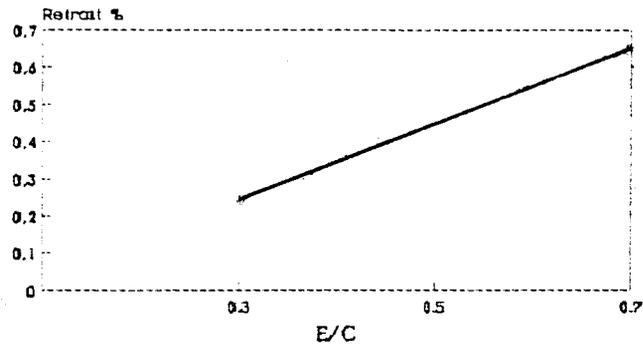


Figure.III.15 : Relation entre le retrait total et le rapport E/C.

#### B.6.2- Le fluage.

D'après P. ACKER et C HUET, l'eau introduite non liée chimiquement modifie sensiblement le fluage. Certains chercheurs ont mis en pratique que le fluage varie comme le carré des rapports en poids de E/C. [6]

$$\text{soit } \varepsilon_f = k. [E/C]^2$$

En conclusion finale, l'eau de gâchage excédentaire entraîne une variation à la baisse de toutes les propriétés performantes du béton frais et durci, c'est dans ce contexte que la limitation du dosage en eau soit au strict nécessaire et demeure l'objectif principal pour l'obtention d'un béton de qualité meilleure.

## C- Action de l'influence des plastifiants et des superplastifiants sur les propriétés du béton.

### C.1- Béton frais :

#### C.1.1- Son influence sur l'ouvrabilité :

L'ouvrabilité est une propriété fondamentale et permet d'assurer une certaine commodité dans la mise en oeuvre du mélange. L'effet de superplastifiant est représenté selon la figure qui suit :

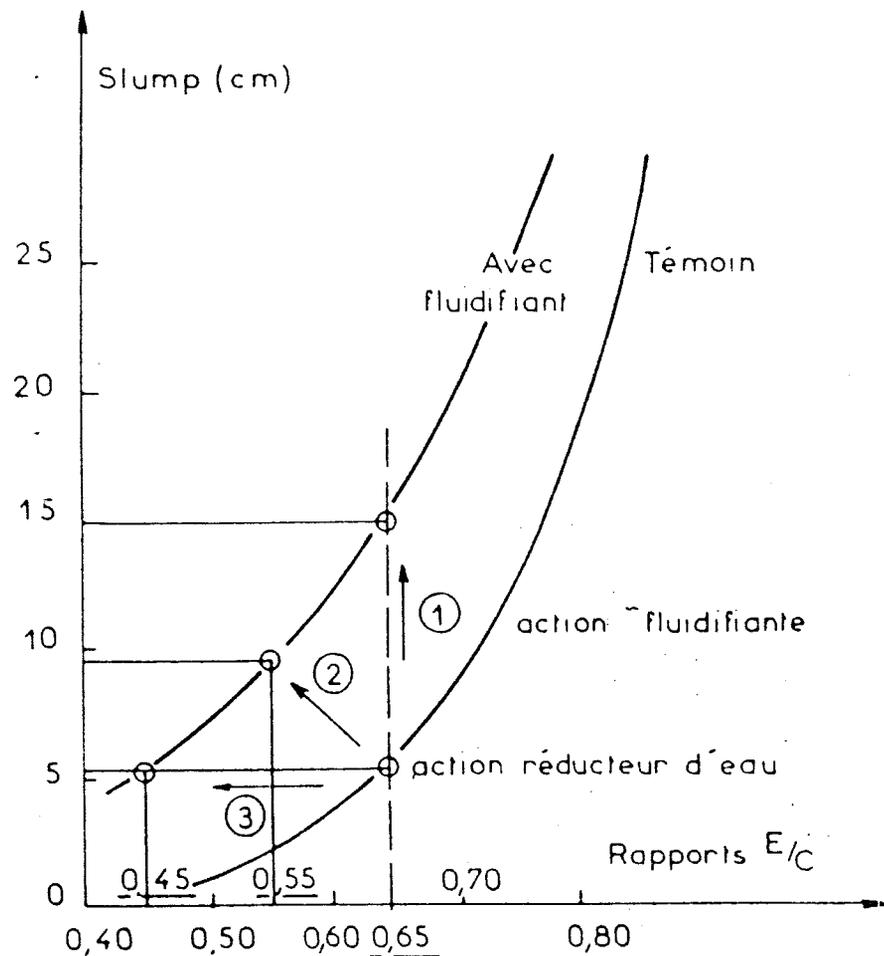


Figure.III.16 : Effet d'un superplastifiant. [36, 46]

Cet effet du superplastifiant caractérise :

- 1- l'augmentation du slump (à teneur en eau égale),
- 2- la diminution de la teneur en eau et augmentation du slump.
- 3- la diminution de l'eau (à slump égal),

Et en outre, son emploi engendre des phénomènes bénéfiques :

- Une moindre eau de ressuage.
- Une homogénéité du béton frais.
- Un malaxage simple et commode.
- Une élévation de compacité.
- Une amélioration de mise en place et d'aspect de démoulage.
- Une assurance d'enrobage des armatures.

### C.1.2- Durée d'action des superplastifiants :

La durée d'action de meilleurs plastifiants et fluidifiants sur l'ouvrabilité varie de 30 à 60 minutes suivant leur efficacité [47]. Certains types ont une durée d'action courte (10 minutes) mais d'autres peuvent aussi s'étendre jusqu'à 10 heures. (effet retardateur). V.M. MALHOTRA [48] montre la durée d'action de certains superplastifiants suivant les figures ci-après :

Figure.III. 17 : perte d'affaissement.  
- Durée d'action d'adjuvant à base de lignosulfonate type MELMENTE 10 à 03 dosages [47].

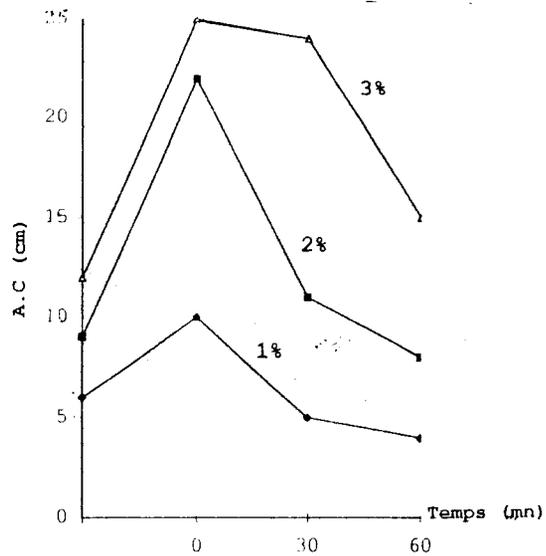
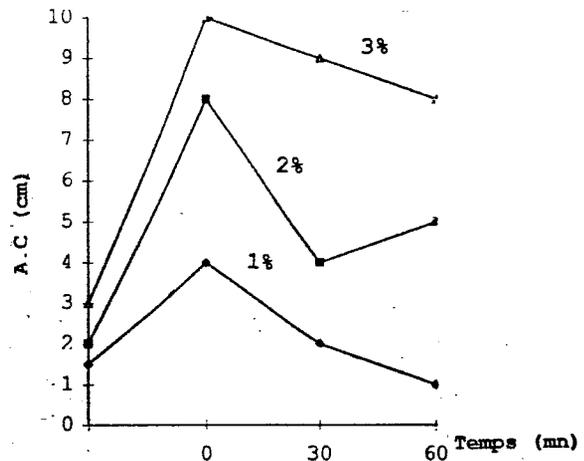


Figure III. 18 : Variation d'affaissement.  
- Durée d'action d'adjuvant à base de lignosulfonate type malcoplast CF à dosage variable [47].



### C.1.3- Contenu d'air (air occlu):

Selon R.C MIELENZ, un béton avec et sans adjuvant tensio-actif possède la même proportion d'air en volume total, les résistances mécaniques sont voisines mais la rhéologie et la résistance au gel sont différents [49]

VANDERIZANDEN montre qu'il n'existe pas d'effet considérable sur le contenu d'air [47]

Les lignosulfonates causent souvent une augmentation dans le contenu d'air désignés sous le nom d'entraîneur-d'air.

### C.1.4- Ressuage :

Le phénomène de ressuage est éliminé en présence d'adjuvants réducteurs d'eau dans le mélange du béton qui permettent de réduire la perméabilité à l'eau du béton frais [19, 26].

## C.2- Béton durci :

### C.2.1 - Résistance mécanique :

Afin de montrer l'influence des plastifiants et des superplastifiants sur la résistance mécanique, trois modes d'utilisations peuvent être traités différemment.

#### C.2.1.1- Accroissement de l'ouvrabilité à teneur en eau constante :

- Les chercheurs LEWANDOWSKI et PEFERTY [37] ont montré que le béton fluidifié compacté par rapport à un béton fluidifié non compacté même à grande ouvrabilité (A.C = 20 cm) présente un écart de résistance mécanique d'environ 10 %, ce qui dénote l'importance même d'un léger compactage.

- Aussi, d'autres recherches montrent que les conditions de mûrissement influent sur la résistance mécanique d'un béton fluidifié.

Les résultats [46] montrent que les superplastifiants améliorent la résistance mécanique des bétons en engendrant une meilleure compacité et une bonne liaison de la structure (pâte de ciment - granulats). (Voir fig. n° III 19 et fig. n°III 20 ).

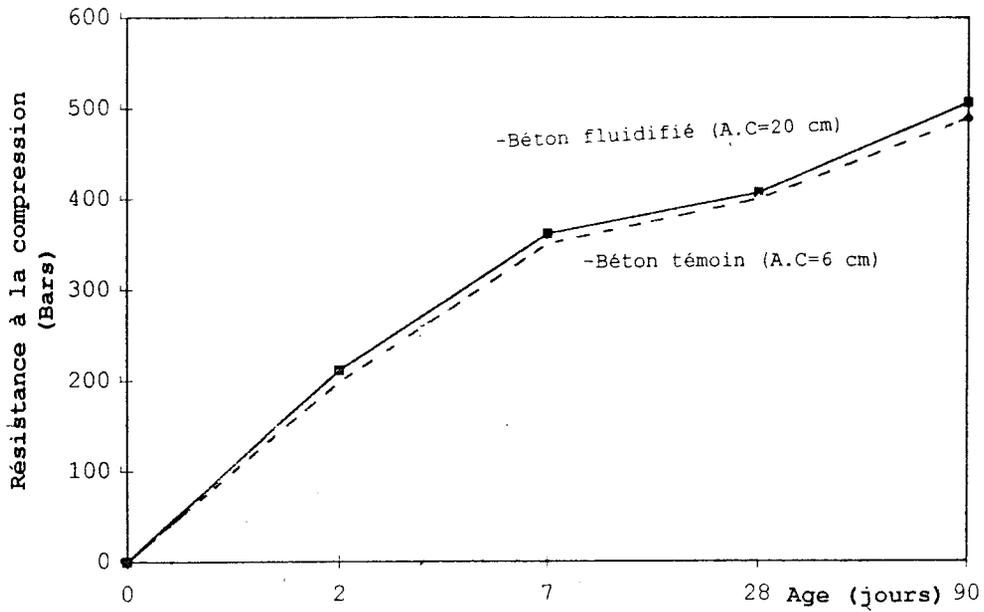


Figure.III.19 : Influence d'un fluidifiant sur la résistance en compression (a teneur en eau constante) [46].

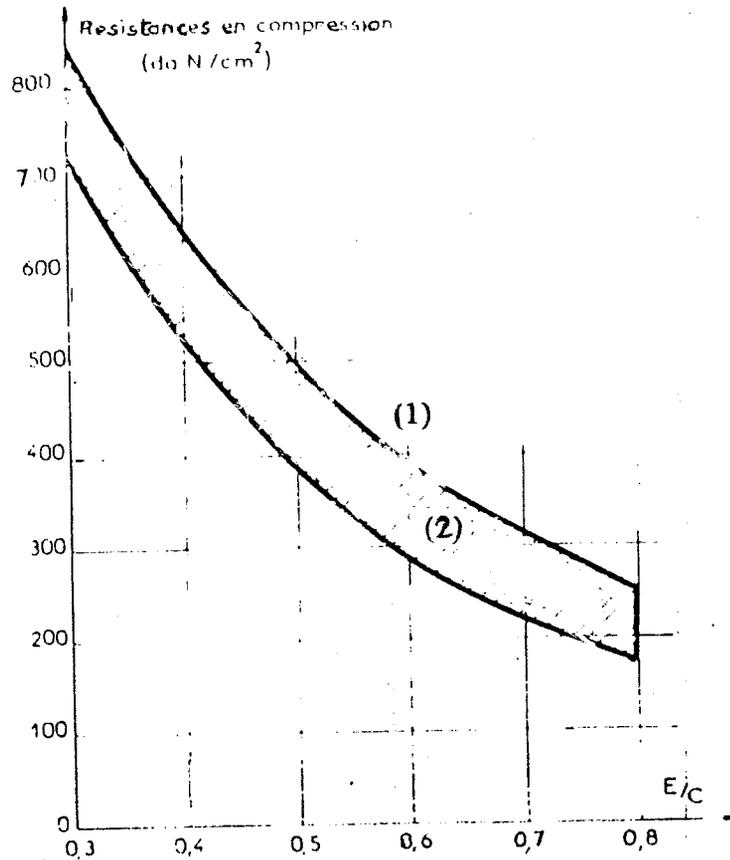


Figure.III.20 : Relation entre les résistances et les rapports E/C pour un béton avec ou sans fluidifiant [36] (1) Béton avec fluidifiant (2) Béton sans fluidifiant

### C.2.1.2 - Ouvrabilité constante avec réduction en eau :

L'emploi des plastifiants et des superplastifiants permet de réduire sensiblement la teneur en eau sans modifier l'ouvrabilité. Cette diminution du rapport E/C engendre un accroissement plus important de la résistance mécanique. On note un accroissement de 103 kgf/cm<sup>2</sup> de résistance mécanique en compression à l'âge de 28 jours. [46] (voir fig.n°III 21)

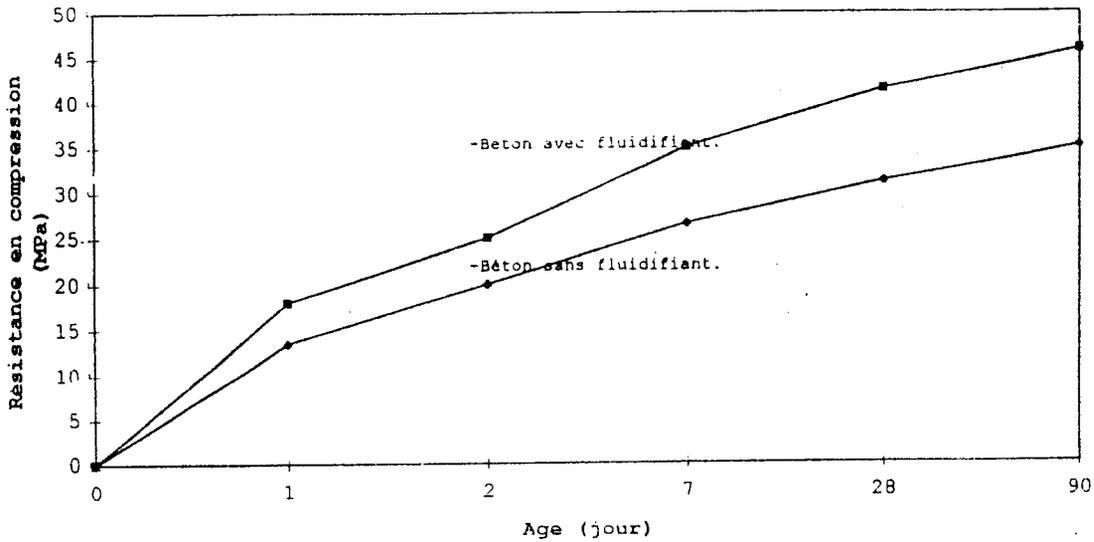


Figure.III.21 : Influence d'un fluidifiant sur la résistance mécanique à ouvrabilité constante [46].

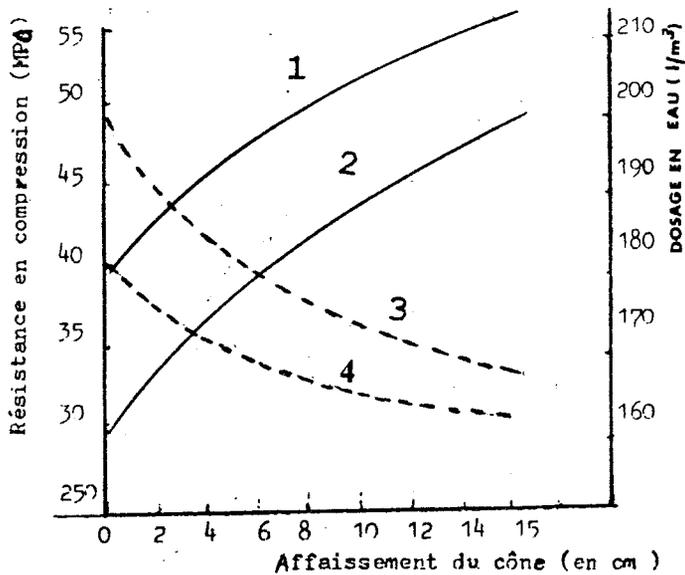


Figure.III.22 : Influence d'un fluidifiant : - Résistance mécanique sur l'ouvrabilité.  
- Teneur en eau sur l'ouvrabilité [33]

- Relation teneur en eau de gâchage et l'ouvrabilité
  - Courbe (1) - béton sans fluidifiant
  - Courbe (2) - béton avec fluidifiant
- - - - - Relation résistance mécanique et l'ouvrabilité
  - Courbe (3) - béton avec fluidifiant
  - Courbe (4) - béton sans fluidifiant

On note que le fluidifiant est un réducteur d'eau et améliore la résistance mécanique pour une ouvrabilité constante. (selon l'illustration de la figure n° III 22)

En outre, VALLETTE a montré par l'introduction d'un plastocrete (plastifiant + Entraîneur d'air) dans un béton de ciment pouzzolanique une diminution d'eau (environ 10 litres) pour la même plasticité avec un accroissement de résistance mécanique en compression à 28 jours de l'ordre de 85 kgf/cm<sup>2</sup> [50]

### C.2.1.3- Réduction du dosage en ciment : (économie de ciment)

D'après le professeur A. KOMAR [3] l'emploi des additions tensio-actives (0,05 ÷ 0,20 %) permet de réduire 7 à 10 % du taux de consommation de ciment dans les bétons sans entraver à la résistance mécanique escomptée.

Selon M. DURIEZ - J. ARRAMBIDE [51] les économies les plus remarquables sont obtenues avec des dosages en ciment 300 et 400 ; certaines entreprises de bâtiment économisent jusqu'à 30 tonnes de ciment pour 1000 m<sup>3</sup> de béton à couler.

### C.2.2 - Le retrait :

VAN WALLENDIAEL et J. CALLEJA [52, 54] ont prouvé que les adjuvants fluidifiants font diminuer le retrait hydraulique dans la mesure où ils réduisent le dosage en eau de gâchage et qu'ils ne contiennent pas une proportion forte d'ions restant en solution et augmentant le retrait (Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, etc...).

Ainsi les chercheurs VM MALHOTRA, RS GHOSH ONTARIOHYDRO [14] ont montré que l'introduction d'adjuvant superplastifiant avec la réduction du rapport eau/ciment fait diminuer le retrait.

### C.2.3- Résistance au gel.

Le chercheur BONZEL [51] a montré que le béton fluidifié (A.C = 20 cm) ne possède pas une meilleure résistance à l'action du gel que celle du béton non fluidifié.

Cependant d'autres chercheurs [14] prouvent que l'introduction d'un superplastifiant accompagné d'une réduction d'eau améliore énormément la résistance au gel.

Pour palier aux dégradations importantes causées par les cycles de gel et degel, on utilise des entraîneurs d'air qui conduisent à la formation de micro-bulles d'air dont la répartition est homogène dans le béton [53]

#### C.2.4 - Le flûage :

Un adjuvant "entraîneur d'air "diminue les résistances mécaniques et ipso facto les modules de déformation [55]. Alors le flûage s'en trouve augmenter [56].

Dans une investigation, V.M MALHOTRA [48] constaté qu'il n'existe pas de différence entre le flûage d'un béton témoin après 72 jours de chargement et le flûage des bétons fluidifiés. Partant du faite, l'eau joue un rôle important dans le fluage, plus le rapport eau/ciment est faible, et plus faible sera le flûage. D'après certains auteurs les bétons fluidifiés accompagnés d'une réduction d'eau fluent moins que les bétons ordinaires [57]

Les auteurs P. ACKER et F. DELARRARD [58] prouvent par des résultats sur les bétons fluidifiés, une très forte diminution de flûage de dessiccation et une modification de la cinétique du flûage propre qui se stabilise beaucoup plus vite que celui du béton ordinaire [31].

#### Conclusion :

L'étude del'influence des adjuvants considérés dans ce chapitre, permet d'aboutir à la modification de l'ensemble des propriétés du béton par une amélioration de la qualité.

L'introduction des plastifiants et des superplastifiants dans le béton pourrait être conçue sous différentes actions :

- Action plastifiante.
- Action fluidifiante.
- Action réducteur d'eau.
- Action économique du ciment.

Notre travail consiste à vérifier l'effet fluidifiant du déchet industriel en comparaison aux adjuvants plastifiants , superplastifiants et reducteurs d'eau normalisés .

# **PARTIE B**

**CARACTERISATION DES MATERIAUX  
UTILISES**

**CHAPITRE N° IV**  
*CARACTERISATION DES CONSTITUANTS  
UTILISES*

# CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET ADOPTION D'UNE COMPOSITION DE BETON TEMOIN

Le présent chapitre traite la détermination des caractéristiques de différents constituants entrant dans la confection des mélanges du béton. La connaissance de leurs caractéristiques est impérative à toute recherche ou étude d'investigation puisque chaque caractéristique pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. C'est pour cela, nous avons choisi d'une part les mêmes échantillons pour chaque constituant et d'autre part les mêmes constituants pour tous les mélanges considérés et élaborés. Les essais et les analyses sur les matériaux utilisés ont été réalisés au laboratoire des liants et bétons de l'UREG/ ENDMC BOUMERDES.

## 1- Caractérisation des constituants:

### 1.1- Le ciment :

Le ciment utilisé est un ciment portland artificiel (CPA), de classe 325 fabriqué à l'usine (ERCC) de MEFTAH. Les valeurs de ses caractéristiques se présentent selon le tableau ci-après et sont obtenues conformément aux essais normalisés en vigueur (NF).

Tableau IV.1 : Résultats d'essais physiques :

N°	Caractéristiques	Unité	Résultats
1	Consistance normale	%	24.5
2	Temps de prise debut fin	h . mn	2 . 10
			4 . 15
3	Poids spécifique	g/cm <sup>3</sup>	3.1295
4	Surface spécifique	cm <sup>2</sup> /g	3085.0

Tableau IV.2 : Résultats d'essais mécaniques :

N°	Caractéristiques	Unité de mesure	Résultats	
1	Résistance à la flexion	kgf/cm <sup>2</sup>	02 jours	51.84
			07 jours	72.29
			28 jours	79.57
2	Résistance à la compression		02 jours	190.71
			07 jours	413.56
			28 jours	500.46

### 1.1.2 : Eau de gâchage :

Nous avons utilisé dans notre recherche l'eau potable du robinet de la ville de BOUMERDES. Il en résulte par l'analyse chimique l'inexistence des matières en suspension ainsi qu'une quantité infime des sels dissous.

Tableau n°IV.3 : Résultats d'analyse chimique.

N°	Caractéristiques	Unité	Résultats
1	Matière en suspension	g/l	Néant
2	Sels dissous		≈ 0.010

### 1.3 : Sable

Le sable utilisé dans notre étude de recherche est prélevé directement du lit de sable de mer de BOUMERDES.

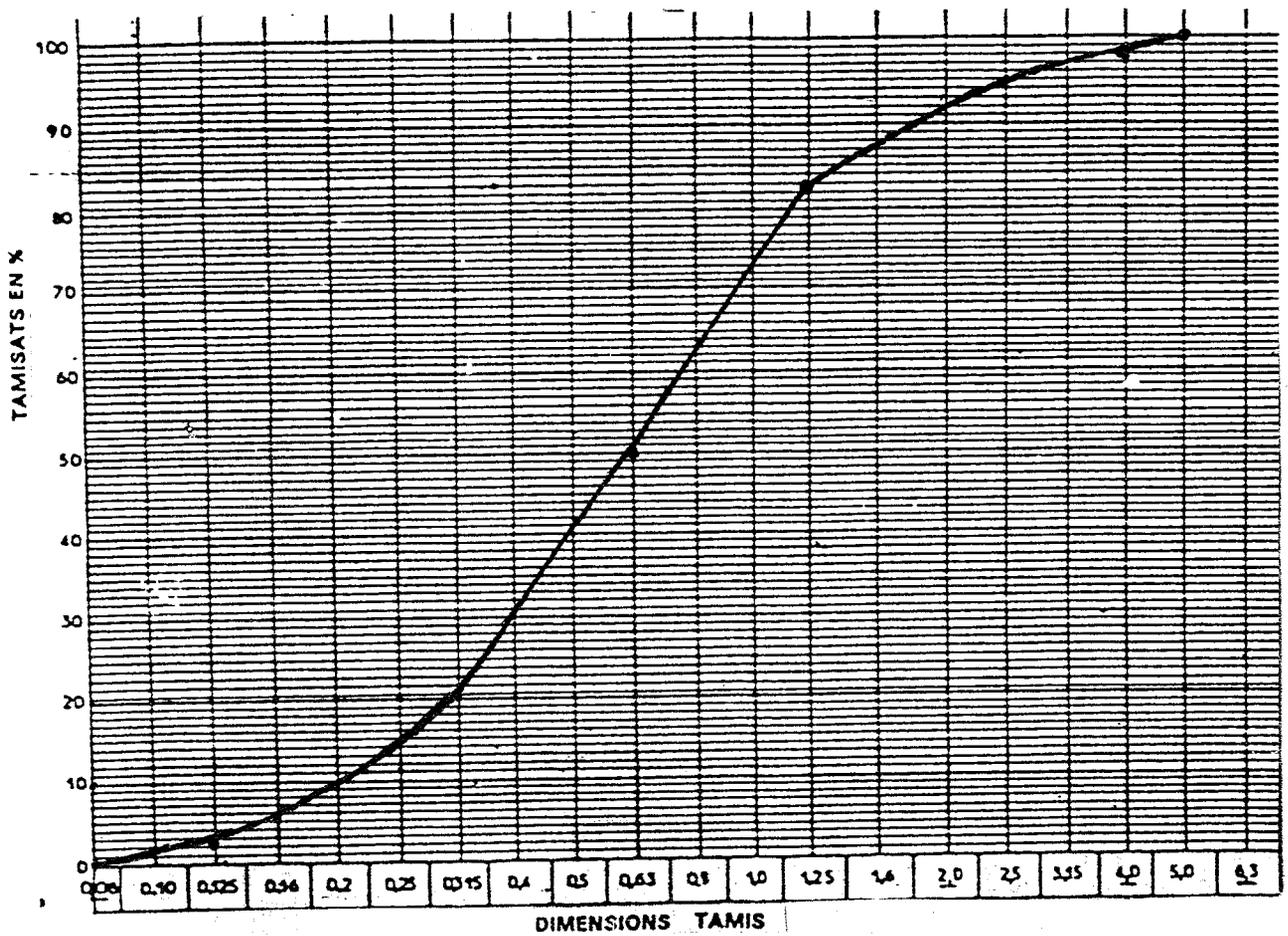
Tableau n°IV.4 : Résultats d'essais physiques et chimiques du sable.

N°	Caractéristiques	Unité	Résultats
1	Masse Volumique en vrac	g/cm <sup>3</sup>	1.615
2	Masse Volumique absolue	g/cm <sup>3</sup>	2.520
3	Teneur en fine	%	0.94
4	Propreté	E.S.V	99.0
		E.S.P	91.8
5	Teneur en sulfates et sulfures	%	0.10
6	Teneur en chlorures	%	0.0045

Tableau IV.5 : Analyse granulométrique du sable :

Ouv. Des tamis (mm)	Refus partiel ponderal (g)	Refus partiel en (%)	Refus cumulé en (%)	Module
5	0	0	0	2.46
3.15	36.00	1.80	1.80	
2.50	62.00	3.10	4.90	
1.25	251.00	12.55	17.45	
0.63	639.00	31.95	49.40	
0.315	605.60	30.28	79.68	
0.160	303.20	15.16	94.84	
0.125	59.60	2.98	97.82	
0.080	24.80	1.24	99.06	
F.T	18.80	0.94	100	
	2000	100		

Courbe granulométrique du sable



#### 1.4 : Gravillons :

Les fractions granulaires 3/8 et 8/16 utilisées dans la présente recherche proviennent de la carrière d'agrégat GHARDAIA. Ces échantillons ont été acheminés au labo UREG et se caractérisent suivant tableau :

Tableau n° IV.6 : Résultats d'essais physiques et mécaniques du gravillon.

N°	Caractéristiques	Unité	Résultats
1	Masse Volumique en vrac	g/cm <sup>3</sup>	1.415
2	Masse Volumique réelle	g/cm <sup>3</sup>	2.4740
3	Masse Volumique absolue	g/cm <sup>3</sup>	2.6267
4	Absorption d'eau	%	2.7093
5	Porosité	%	6.5993
6	Propreté superficielle	%	0.95
7	Résistance en compression	kgf/cm <sup>2</sup>	481.20
8	Coef. Los - Angeles	%	25.18
9	Coef. Micro - Deval	%	26.22

- Granularité des gravillons

Tableau n° IV.7 : Analyse granulométrique de la fraction 3/8

Ouv. des tamis (mm)	Refus partiel pondéral (g)	Refus partiel (%)	Refus cumulé (%)
12.50	0	0	0
10.00	20	0.40	0.40
8.00	365	7.30	7.70
6.30	1925	38.50	46.20
5.00	1075	21.50	67.70
4.00	910	18.20	85.90
3.15	315	6.30	92.20
2.50	150	3.00	95.20
1.60	125	2.50	97.70
1.25	105	2.10	99.80
F.T	10	0.20	100
	5000	100	

- Selon l'exigence normative granulaire :

$$\frac{1}{3} < \text{passant de } \frac{d+D}{2} < \frac{2}{3}$$

Dans notre cas la proportion de passant de  $\frac{d+D}{2}$  est égale à 40 %

- Aussi  $d/D = 3/8$  ; la condition de D est :  $D > 1.56.d$  ce qui correspond  $8 > 1.56 \times 3$

Le refus au tamis D est : 7.70 %, c'est une valeur comprise entre 1 et 15 % conformément à la norme.

Le tamisat au tamis d est 7.80 %. C'est une valeur admissible puisqu'elle est comprise également entre 1 et 15 %.

Tableau n°IV.8 : Analyse granulométrique de la fraction 8/16

Ouv. Des tamis (mm)	Refus partiel pondéral (g)	Refus partiel (%)	Refus cumulé (%)
25.0	0	0	0
20.0	0	0	0
16.0	270	5.40	5.40
12.50	1825	36.50	41.90
10.0	1460	29.20	71.10
8.0	1010	20.20	91.30
6.30	380	7.60	98.90
5.00	20	0.40	99.30
F.T	35	0.70	100
	5000	100	

- L'exigence normative de la granularité

$$1/3 < \text{passant de } \frac{d + D}{2} < 3/2$$

Dans notre cas, le passant de  $\frac{d + D}{2}$  égal à 50 %, c'est une valeur admissible conformément à la norme en vigueur.

- Aussi, la granularite doit satisfaire à la condition :

$$D > 1.56.d \text{ ce qui correspond à } 16 > 1.56 \times 8 \text{ c'est à dire : } D = 12.48$$

Le refus à D et le tamisat à d sont respectivement à 5.40 et à 8.70 ; ces deux valeurs sont acceptables puisqu'elles se situent dans les limites 1 à 15 %.

Exigence du fuseau granulaire [10].

Tableau n°IV.9 : fraction granulaire 3/8

Ouv. des tamis (mm)	Valeurs des tamisats (%)	Exigence du fuseau (%)
10.0	99.60	100
8.00	92.30	85 ÷ 92
6.30	53.80	50 ÷ 70
5.0	32.30	30 ÷ 40
4.0	14.10	12 ÷ 23
3.15	7.80	5 ÷ 10
2.50	4.80	4 ÷ 70
2.00	--	3 ÷ 6
1.60	2.30	2 ÷ 4
1.25	0.20	0

Tableau n°IV.10 : fraction granulaire 8/16

Ouv. des tamis (mm)	valeurs des tamisats (%)	Exigence du fuseau (%)
20	100	100
16	94.60	93 ÷ 95
12.50	58.10	50 ÷ 70
10.00	28.90	17 ÷ 30
8.00	8.70	5 + 10
6.30	1.10	1 ÷ 3
5.00	0.70	0

#### IV.1.5- Constituant secondaire utilisé : le déchet industriel de la cellulose

Le déchet industriel est sous forme d'un jus noir obtenu lors du traitement de la cellulose pour la fabrication du papier. Ce jus noir est récupéré de l'usine d'une entreprise dénommée CELPAP de BABA Ali.

Selon certaines investigations, la lignine est une substance végétale possédant des propriétés tensio-actives [32].

Partant de cette idée, il est systématiquement indispensable de faire de ce jus noir une recherche d'approche d'un adjuvant plastifiant ou superplastifiant pour les bétons et les mortiers.

Ce déchet industriel (DI) est une substance liquide de couleur très foncée maron à noire. La lignine, une substance très complexe, présente déjà des modifications de ses propriétés lors de son isolement du végétal.

Nous nous n'étalons pas davantage sur l'aspect chimique mais nous nous contenterons des caractéristiques principales énumérées ci-après puisque l'impact de ce travail est d'étudier l'influence du déchet sur les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci [60].

Tableau n°IV.11 : Résultats d'essais obtenus sur le déchet industriel (DI) :

N°	Caractéristiques	Unité	Résultats
1	Densité	g/cm <sup>3</sup>	1.0230
2	Résidu solide /ou extrait sec	%	5.389
3	Potentiel hydrogène (pH)	Solution basique à 20°C	12.5
4	Tension superficielle	dyn/cm à 30°C	39.7
5	Conductibilité électrique	mS/cm	2.10

Tableau n°IV.12 : Valeurs comparatives d'une eau de robinet et d'un lignosulfonate :

N°	Caractéristiques	Unités	Résultats	
			Eau	Lignosulfonate
1	Potentiel hydrogène pH		7.5	8
2	Tension superficielle	dyn/cm	72.8	45.8
3	Conductibilité électrique	mS/cm	0.120	1.20

## 2- Adoption d'une composition de béton témoin :

En se servant préalablement de l'analyse granulométrique des granulats (sable + gravillons), nous avons choisi la méthode de calcul G. DREUX, puisqu'elle tient compte de la connaissance de la courbe granulométrique de référence.

Les essais de la confection des éprouvettes, de mise en place, de la mesure d'affaissement, du surfacage, et d'écrasement, etc... sont réalisés conformément aux normes d'essais en vigueurs (NF).

## Calcul de la composition :

Nous avons fixé par hypothèse :

- Un mélange de béton ordinaire pour une résistance projetée de l'ordre de 300 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Une ouvrabilité d'environ 5 cm d'affaissement au cône .
- Un ouvrage moyennement ferrailé.
- Un ciment de classe vraie de l'ordre : 500.

### 2.1- Dosage en ciment :

D'après la formule de BOLOMEY

$$C / E = \frac{\sigma' 28}{G. \sigma' c} + 0.5$$

d'où, C/E : rapport ciment- eau

$\sigma' 28$  : résistance à la compression du béton à 28 j

$\sigma' c$  : classe vraie de ciment

G : coefficient de qualité des granulats.

$$C/E = \frac{300}{0.455 \times 500} + 0.50 = 1.82$$

A priori le choix du dosage en ciment est fixé à  $350 \text{ kg/m}^3$ , il en résulte suivant l'abaque dans la méthode G. DREUX permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée.

$$C = 350 \text{ kg}$$

$$E/C = 0.55$$

$$A.C = 5,0 \text{ cm}$$

## 2.2- Le dosage en eau :

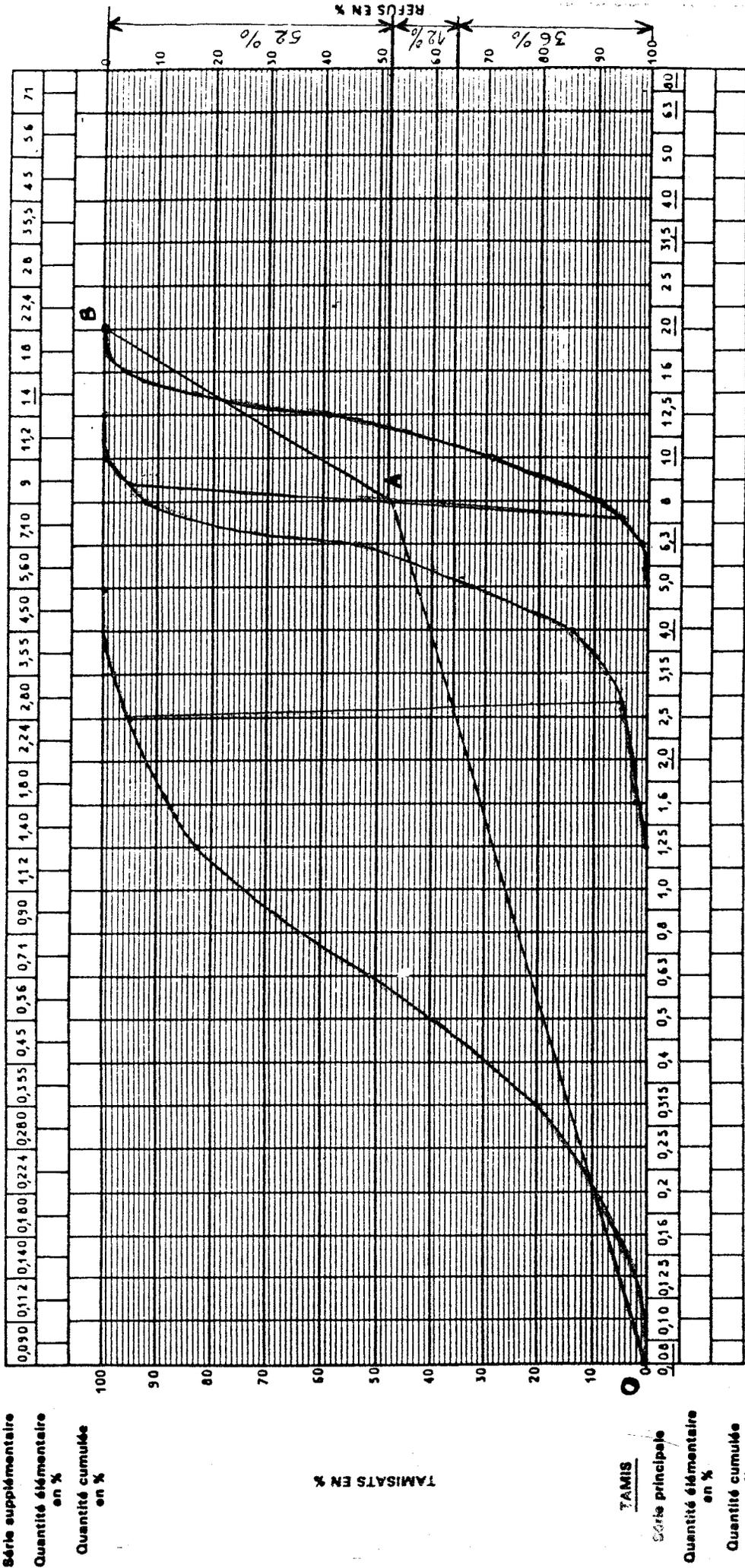
Sachant le dosage en ciment, on tire le dosage en eau totale à prévoir à partir du rapport C/E.

$$C/E = 1.82 \rightarrow E = \frac{C}{1.82} = \frac{350}{1.82} = 192 \text{ litres}$$

$$E = 192 \text{ litres/m}^3$$

# ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DES GRANULATS

Norme NF P 18-304



### 2.3- Le dosage des granulats :

En traçant les lignes de partage des courbes successives par rapport à la courbe de référence OAB les pourcentages en volumes absolus pour chacun des granulats sont :

Sable (0/3)	=	36 %
Gravillons (3/8)	=	12 %
Gravillon (8/16)	=	52 %

Le volume absolu des trois (03) granulats pour  $1\text{m}^3$  de béton en oeuvre est :

$$V_g = 1000 \gamma - V_c$$

$V_g$  : volume absolu des granulats

$\gamma$  : coefficient de compacité, dans notre cas  $\gamma = 0.815$

$V_c$  = volume absolu du ciment  $V_c = 112.90$  litres

$$V = 1000. 0.815 - 112.90 = 702.10 \text{ litres}$$

$$V_g = 702.10 \text{ litres/m}^3$$

Connaissant la masse volumique absolue de chaque granulats, leur dosage en masse est

$$M_{\text{sable}} = 0.36 \times 702.1 \times 2.54 = 642.0 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{g(3/8)} = 0.12 \times 702.1 \times 2.62 = 220.740 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{g(8/16)} = 0.52 \times 702.1 \times 2.62 = 956.54 \text{ kg/m}^3$$

En faisant arrondir les valeurs :

$$\begin{aligned}M_{\text{sable}} &= 640 \text{ kg/m}^3 \\Mg (3/8) &= 220 \text{ kg/m}^3 \\Mg (8/16) &= 956 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Les dosages en matériaux secs seront donc :

$$\begin{aligned}\text{Ciment} &= 350 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Eau} &= 192 \text{ l/m}^3 \\ \text{Sable} &= 640 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Gravillon (3/8)} &= 220 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Gravillons (8/16)} &= 956 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Il serait bien entendu de tester cette formulation par quelques essais d'études et de convenance et d'apporter éventuellement des corrections nécessaires suivant les résultats obtenus.

### Conclusion :

Compte tenu des résultats d'essais et d'analyses sur les composants de base à savoir le ciment, l'eau, le sable et le gravillon, il en résulte une bonne aptitude d'utilisation dans les bétons; En outre, les résultats d'essais sur le déchet industriel nous permettent de l'identifier à titre orientatif quant à son emploi dans le mélange du béton.

La formulation du mélange de béton déterminée est une composition témoin qui servirait à la confection des éprouvettes au cours de cette étude .

**PARTIE C**

**RECHERCHE EXPERIMENTALE**

## **CHAPITRE N° V**

**ETUDE EXPERIMENTALE DE L'INFLUENCE  
DU DECHET INDUSTRIEL SUR LE  
COMPORTEMENT PHYSIQUE ET  
MECANIQUE DU BETON HYDRAULIQUE**

# ETUDE EXPERIMENTALE DE L'INFLUENCE DU DECHET INDUSTRIEL SUR LE COMPORTEMENT PHYSIQUE ET MECANIQUE DU BETON HYDRAULIQUE

## V.1- Introduction :

Avant de procéder à la réalisation des essais de laboratoire, nous avons conçu un plan de recherche nous permettant de trouver des formulations possibles à paramètres variables. Le but recherché est de faire une approche de ce déchet industriel local "jus noir" à un adjuvant plastifiant et/ou un adjuvant superplastifiant et/ou à un adjuvant réducteur d'eau.

Dans la théorie énoncée, l'eau de gâchage excédentaire dans le mélange du béton est un élément néfaste à la performance mécanique du béton, qui se présente sous la forme d'un rapport Eau/ciment que nous considérerons le premier paramètre impératif.

Partant de la même vision, le deuxième paramètre important que nous retenons est l'ouvrabilité qui assure une commodité de mise en oeuvre et un remplissage parfait du moule.

En outre, dans le même ordre d'idée, nous avons introduit un troisième paramètre qui est le couple déchet industriel/ciment responsable de la variation tant au point de vue rhéologique que du point de vue résistance mécanique.

C'est pour cela, nous voulons développer une première étape de travail composée de quatre (04) variantes à formulations différentes nous montrant l'influence de ce déchet industriel sur le comportement du béton à l'état frais et à l'état durci.

L'impact de cette recherche scientifique, dans cette première présentation, est d'aboutir à sélectionner en un lieu donné une formulation efficace en terme de comportement rhéologique et mécanique.

## V.2- Présentation des trois (03) paramètres :

### V.2.1- Rapport E/C

C'est un paramètre qui tient compte du dosage en eau totale de gâchage par rapport au dosage en ciment, il caractérise la quantité d'eau nécessaire à une ouvrabilité souhaitée.

### V.2.2- Ouvrabilité :

C'est un paramètre qui dépend particulièrement du dosage en eau. L'augmentation du dosage en eau engendre l'accroissement de la maniabilité, par conséquent, on assiste à une perte de résistance mécanique et une diminution de la durabilité du béton. La maniabilité peut être caractérisée, soit par la mesure d'affaissement au cône d'ABRAMS, soit par la détermination d'étalement à l'aide de la table d'étalement, ou par évaluation de l'indice de vibration à partir d'un viscosimètre technique.

lors des essais, nous avons utilisé le cône d'ABRAMS pour sa disponibilité au laboratoire et à son utilisation à des mélanges plus ou moins plastiques.

### 2.3- Couple déchet industriel / ciment :

Le couple déchet industriel / ciment correspond au rapport de la quantité du déchet industriel à introduire dans le mélange au prorata de la quantité de ciment. Nous exprimons dans notre cas, ce couple par un dosage en déchet industriel que nous utilisons en pourcentage d'extrait sec à la masse du ciment.

- Soit : 15 ml de déchet à l'état liquide correspond à 0.8269 g d'extrait sec, c'est à dire 1 ml correspondra à 0.05512 g.

- Pour une composition de béton dosée à 350 kg de ciment et un déchet de l'ordre 0.15 %, la quantité du déchet à introduire sera :

$$X \text{ g} = \frac{350\,000 \text{ g} \times 0.15}{100} = 525 \text{ g d'extrait sec du déchet}$$

Le dosage du déchet à l'état liquide serait :

$$X \text{ ml} = \frac{1 \times 525}{0.05512} = 9524.6 \text{ ml}$$

Donc nous aurons :

$$0.15 \% \text{ de DI correspond à } 9.525 \text{ litres /m}^3$$

### 3- Traitement statistiques des résultats d'essais de la résistance mécanique du béton :

Le béton, par sa propre hétérogénéité et la dispersion des essais mécaniques, il est nécessaire de calculer l'écart type et le coefficient de variation pour apprécier la qualité des résultats obtenus.

A titre de rappel, le traitement statistique s'opère de la façon suivante :

#### 1)- Calcul de la moyenne arithmétique

$$Ma = \frac{\sum Mi}{n} \quad \text{ou} \quad \begin{array}{l} Ma : \text{Moyenne arithmétique} \\ n : \text{nombre de résultats obtenus pour le même béton,} \\ \sum Mi : \text{somme des valeurs obtenues} \end{array}$$

2)- Calcul de la dispersion :

$$S = \sqrt{\frac{\sum (M_i - M_a)^2}{n - 1}} \quad \text{ou } M_i : \text{valeurs individuelles}$$

3)- Calcul du coefficient de variation :

$$C.V = \frac{100 \cdot S}{M_a} \quad [\%]$$

Tableau n° V.1 : Exigences des valeurs du coefficient de variance (C.V).

Béton fabrique	Valeurs du C. V. (%)		
	Excellents	bonnes	mauvaises
Au labo	8	12	15
A la centrale	10	15	> 20
Sur chantier	15	20	> 25

La valeur du coefficient de variance est en général d'autant moins fort que le béton a une résistance plus élevée. D'après G. DREUX [33], la qualité du béton est évaluée selon les valeurs du coefficient de variance.

#### 4 - Travaux expérimentaux.

A priori, nous mettons en évidence, l'influence du déchet par son introduction à dosages variables dans le mélange du béton de référence. La teneur en eau de gâchage est maintenue constante. Les résultats obtenus sont représentés selon le tableau ci-après.

Tableau n° V.2 - Résultats d'essais physiques et mécaniques :

Cod. Epr.	dosage DI (%)	Propriétés du béton frais			Propriétés du béton durci			
		Ouvr. (cm)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	T. Comp. (sec)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Résistance Mécanique en Compression (kgf/cm <sup>2</sup> )		
						1 jour	7 jours	28 jours
B00 06	0	5.0	2502	28	2528	38	220	330
B10 16	0.10	9.0	2492	20	2498	30	202	307
B20 26	0.20	16.0	2427	15	2475	22	183	257
B30 36	0.30	18.0	2412	10	2446	15	148	225
B40 46	0.40	20.0	2387	5	2405	8	95	144

A cet effet, la détermination des valeurs des coefficients de variance est représentée dans le tableau V.3 ci-après :

Tableau n° V.3 : Représentation statistique des valeurs obtenues :

Cod. Epr.	Age du béton (J)	Force (N)	Surface (cm <sup>2</sup> )	Contrainte individ. (bars)	Contrainte moyenne (bars)	Ecart type (bars)	Coef. de variance (%)
B01	07	20300	94.985	214	220	6.67	3.03
B02		21600		227			
B03		20700		218			
B04	28	30200	94.985	318	330	10.40	3.15
B05		32000		337			
B06		31800		335			
B11	07	19700	94.985	207	202	13.80	6.83
B12		17700		186			
B13		20100		212			
B14	28	29600	94.985	312	307	5.0	1.63
B15		28700		302			
B16		29200		307			
B21	07	16500	94.985	174	183	8.18	4.47
B22		17600		185			
B23		18000		190			
B24	28	23000	94.985	242	257	13.22	5.14
B25		25400		267			
B26		24900		262			
B31	07	12900	94.985	136	148	11.25	7.60
B32		14300		151			
B33		15000		158			
B34	28	22000	94.985	232	225	7.00	3.11
B35		21400		225			
B36		20700		218			
B41	07	8300	94.985	87	95	7.00	3.11
B42		9300		98			
B43		9500		100			
B44	28	13900	94.985	146	144	8.62	5.97
B45		14400		152			
B46		12800		135			

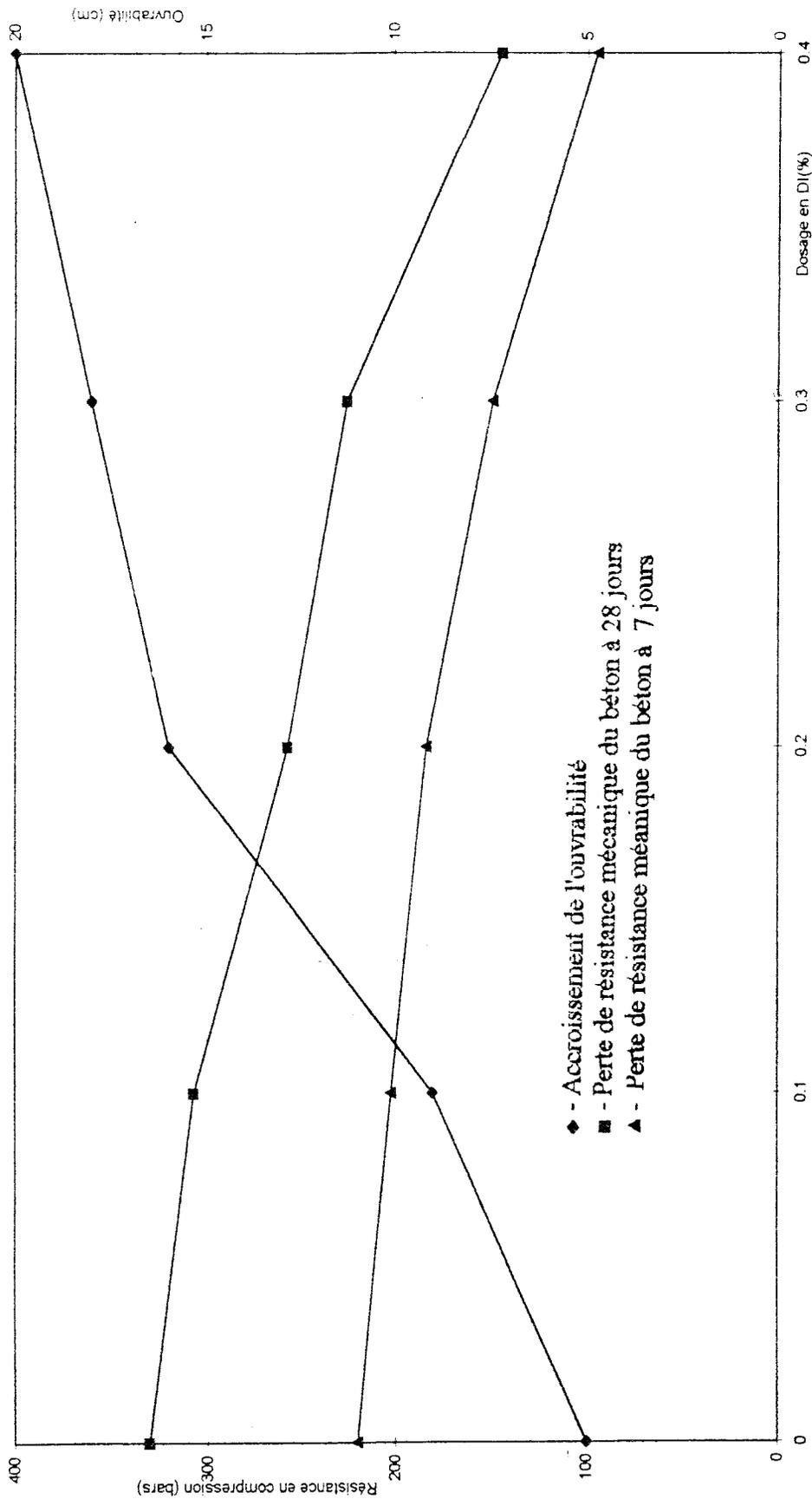


Fig.n°V.1 : Relation de la résistance mécanique et de l'ouvrabilité du béton en fonction du dosage en déchet industriel

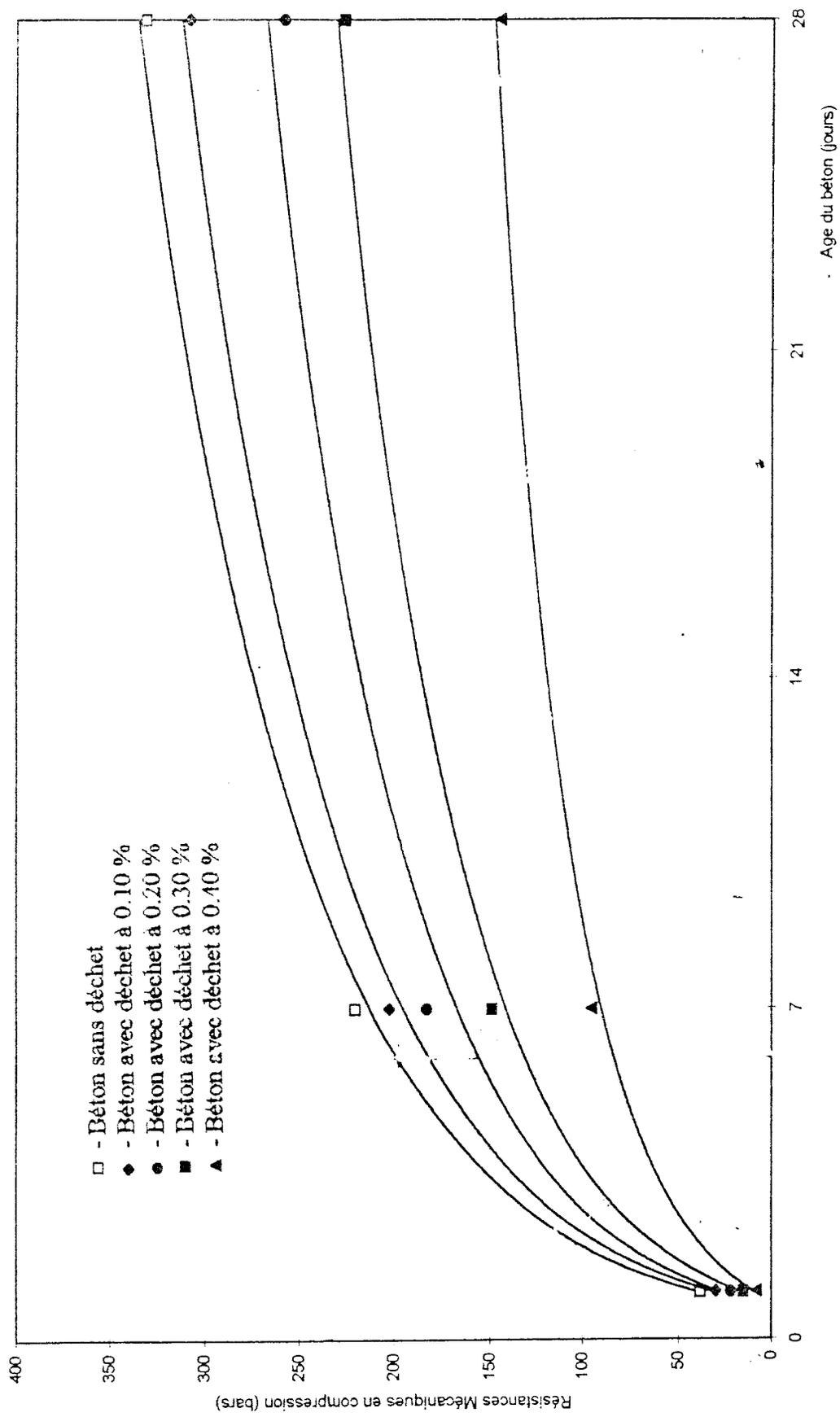


Fig.n°V.2: Evolution des résistances mécaniques du béton sans et avec déchet à dosage variable.

## Interprétation :

Les résultats obtenus dans le tableau V.2 montrent une augmentation très sensible de l'ouvrabilité par l'ajout du déchet à dosages variables avec une teneur en eau de gâchage constante. Par conséquent, on assiste à une perte sensible de la résistance mécanique.

Cette lubrification impressionnante est engendrée par l'effet tensio-actif de déchet. Les molécules d'ajout s'adsorbent sur la surface des grains de ciment et font diminuer la tension superficielle entre grains solides et eau. Ce phénomène d'adsorption provoque une dispersion des grains et une défloculation des grumeaux qui donnent une mobilité accrue des particules de ciment. Ce qui a contribué à l'augmentation de l'ouvrabilité.

La présence et la formation irrégulière sur les résistances mécaniques. Ceci est constaté par la diminution des valeurs de densité pour le béton frais (entraînement d'air) et pour le béton durci (présence de porosité).

Aussi nous assistons au ralentissement de la vitesse d'hydratation des grains du ciment, ce qui provoque un retard de durcissement et ce qui explique l'effet retardateur - colmateur. Un dosage à 0.40 % du déchet fait accroître un affaissement au cône d'ABRAMS de l'ordre de 150 mm et une perte de résistance mécanique de 56, 36 %. A cet effet ce déchet peut être qualifié de fluidifiant par l'apport d'une grande lubrification du mélange conformément aux exigences normatives du tableau n°II.1.

Les valeurs des coefficients de variance représentées dans le tableau n°V.3 sont généralement supérieures à celles du béton témoin, ce qui dénote une baisse de la qualité due à l'état poreux de la structure du béton. L'élévation des valeurs de coefficients de variance nous signifie l'hétérogénéité de la structure due probablement à l'irrégularité de la porosité existante.

La figure n°V.1 illustre l'influence du déchet sur le mélange du béton. Le graphe n°1 nous montre l'accroissement de l'ouvrabilité en fonction de l'augmentation du dosage de déchet. Nous remarquons que le dosage de 0 à 0.20 % engendre une ouvrabilité de 11 cm, par contre pour une même quantité, c'est à dire le dosage de 0.20 à 0.40 % provoque seulement une ouvrabilité de 4 cm. Ceci nous permet de mettre en évidence l'effet tensio-actif du déchet à des dosages faibles. Le graphe n°2 nous montre les pertes des résistances mécaniques à 7 et 28 jours en fonction de l'augmentation du dosage de déchet. Nous constatons que la perte de résistance mécanique est moins accentuée pour la même quantité de déchet au dosage de 0 à 0.20 % qu'au dosage de 0.20 à 0.40 %, ceci est due à la porosité plus accentuée au dosage de 0.20 à 0.40 % qu'au dosage de 0 à 0.20 %, comme le confirment les valeurs de résultats des densités du béton durci à 28 jours au tableau n°V.2.

La figure n°V.2 nous indique l'évolution des résistances mécaniques en compression du béton avec et sans déchet. Une chute des résistances mécaniques est constatée à l'âge de 1, 7 et 28 jours du béton en présence du déchet.

Nous remarquons que le coefficient d'âge de 1 à 28 jours du béton sans déchet est évalué à 0.12 environ, alors que le même coefficient d'âge du béton avec déchet dosé à 0.40 %, sa valeur est égale à 0.05, ce qui nous signifie une variation de la vitesse de durcissement.

Afin de remédier à ces pertes de résistances mécaniques, nous nous sommes inspirés de la théorie énoncée [36, 47], selon laquelle nous pouvons par l'introduction d'un fluidifiant, faire augmenter l'ouvrabilité accompagnée d'une légère diminution de la teneur en eau et par conséquent nous assisterons à une augmentation légère de la résistance mécanique.

Donc nous faisons varier le rapport E/C et le dosage en déchet dans le mélange du béton en gardant les quantités constantes de ciment, de sable et de gravillon 3 8 et 8 16.

Tableau n° V.4 : Résultats d'essais physiques et mécaniques :

Cod.	Dosage	Rapport	Propriétés du béton frais			Propriétés du béton durci						
			Epr.	DI (%)	E/C	Ouvr. (cm)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	T. Com. (sec)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Résistance Mécanique en compression (kgf/cm <sup>2</sup> )		
										1 jour	7 jours	28 jours
B00-06	0	0.55	5.0	2502	28	2528	38	220	330			
B50-56	0.10	0.53	7.5	2520	22	2556	26	181	335			
B60-66	0.20	0.51	12.0	2539	16	2552	24	195	331			
B70-76	0.30	0.49	15.0	2549	10	2561	20	214	339			
B80-86	0.40	0.47	16.5	2553	05	2566	17	210	338			

Tableau n°V.5 : Représentation statistique des valeurs obtenues :

Cod. Epr.	Age du béton ( Jours )	Force ( N )	Surface ( cm <sup>2</sup> )	Contrainte individ. ( bars )	Contrainte moyenne ( bars )	Ecart type ( bars )	Coef. de variance ( % )
B51	07	17400	94.985	183	181	5.70	3.15
B52		16600		175			
B53		17700		186			
B54	28	31800	94.985	354	335	7.55	2.25
B55		31200		328			
B56		32600		343			
B61	07	19000	94.985	200	195	5.00	2.56
B62		18500		195			
B63		18000		190			
B64	28	32000	94.985	337	331	5.57	1.68
B65		31300		330			
B66		31000		326			
B71	07	19900	94.985	210	214	7.24	3.38
B72		19850		209			
B73		21100		222			
B74	28	32900	94.985	346	339	6.08	1.80
B75		31800		335			
B76		31900		336			
B81	07	19400	94.985	204	210	5.57	2.65
B82		20000		211			
B83		20400		215			
B84	28	32100	94.985	338	338	2.57	0.75
B85		32300		340			
B86		31800		335			

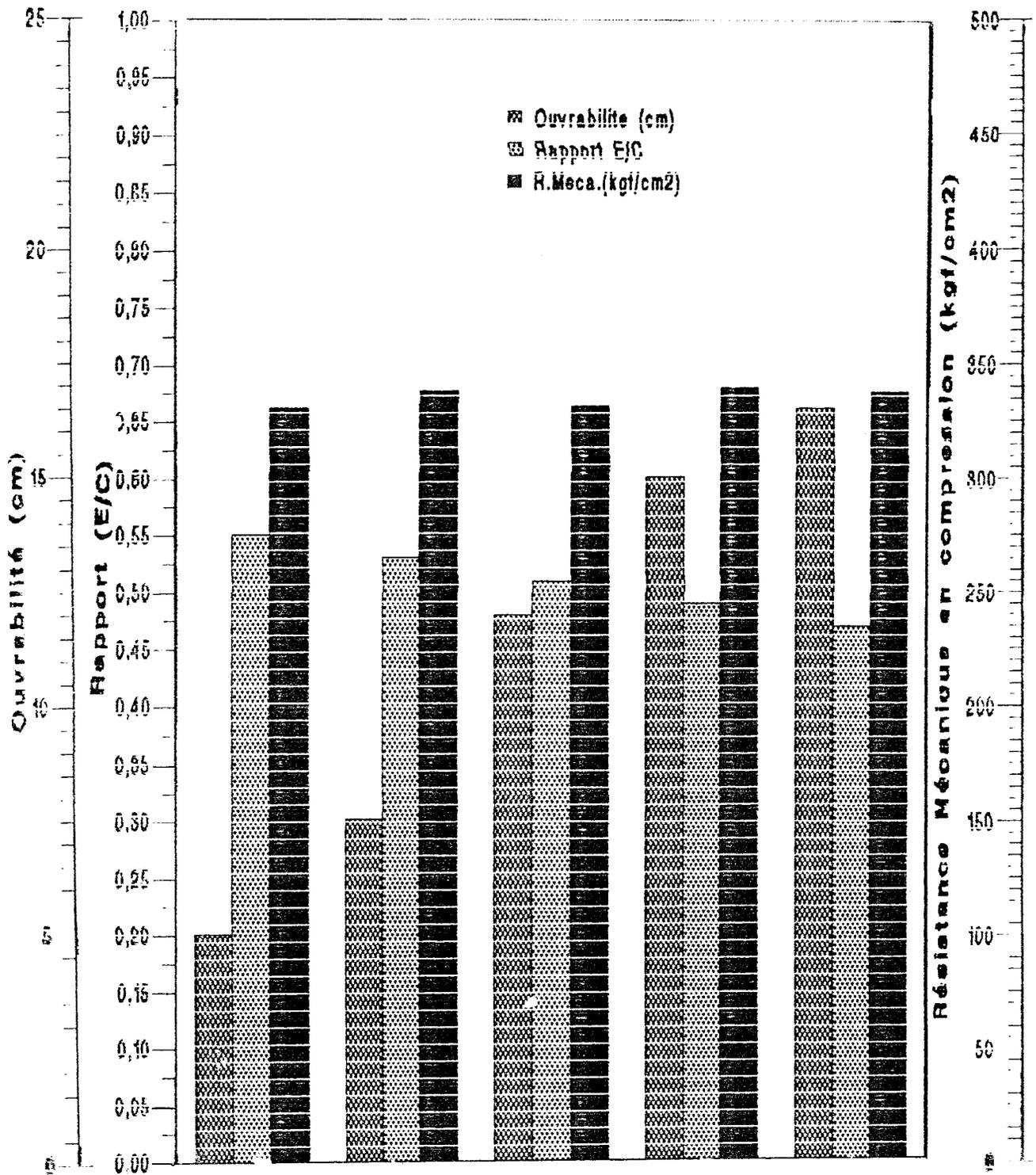


Fig.n°V.3 : Histogramme : Variation de l'ouvrabilité, du rapport E/C et de la résistance mécanique

## Interprétation :

A travers les résultats obtenus au tableau n°V.4, nous constatons que pour un rapport E/C égal à 0.47 et un déchet de 0.40 %, l'ouvrabilité se trouve augmenter de 11.5 cm et la résistance mécanique améliorée de 2.42 %.

Par contre, pour le même dosage en déchet ( DI = 0.40 % ) avec un rapport E/C égal à 0.55 et une ouvrabilité de 20 cm, nous avons obtenu au tableau n°V.2 une perte de résistance mécanique estimée à 56.36 %.

Dans ce contexte et selon le tableau n°II.1, le déchet est qualifié d'un plastifiant puisqu'il améliore l'ouvrabilité et en même temps il augmente légèrement la résistance mécanique. Cette diminution légère de lubrification du mélange a contribué à l'élimination d'une partie de la porosité d'où résulte un gain de résistance mécanique.

Les valeurs des coefficients de variance obtenus au tableau n° V.5 représentent une bonne approche de la résistance réelle du béton conformément aux exigences du tableau n°V.1. Il est à noter que les valeurs du coefficient de variance sont généralement inférieures à celle du béton témoin ce qui signifie une diminution de repartition des pores et une amélioration de l'homogénéité de la structure.

La figure n°V.3 nous montre cinq (05) formulations dont les caractéristiques physiques et mécaniques de chaque mélange à l'état frais et durci sont toutes variables. Les formulations n°2, 3, 4 et 5 nous indiquent l'acroissement à la fois les résistances mécaniques et l'ouvrabilité. Par contre, dans la figure précédente (fig. n°V.1), l'augmentation de l'ouvrabilité influe négativement les résistances mécaniques

Toujours dans le même ordre d'idées, nous faisons accroître davantage la résistance mécanique en se servant de la théorie énoncée [36, 47]. Cette dernière stipule sous l'effet d'un fluidifiant accompagné d'une réduction d'eau avec une ouvrabilité constante que la performance mécanique augmente considérablement.

Lors de la réalisation de ces essais, nous fixons à priori l'ouvrabilité égale à 5.0 cm et ainsi que les dosages des constituants du mélange tels que le ciment, le sable et les fractions granulaires 3.8, 8.16 respectivement égal à 350, 640, 220 et 956 exprimés en  $\text{kg/m}^3$ .

Tableau n°V.6 : Résultats d'essais physiques et mécanique :

Cod.	Dosage	Rapport	Propriétés du béton frais			Propriétés du béton durci						
			Epr.	DI (%)	E/C	Ouvr. (cm)	Densité ( $\text{kg/m}^3$ )	T. Com. (sec)	Densité ( $\text{kg/m}^3$ )	Résistance Mécanique en compression ( $\text{kgf/cm}^2$ )		
										1 jour	7 jours	28 jours
B00-06	0	0.55	5.0	2502	28	2528	38	220	330			
B90-96	0.15	0.45	5.0	2516	28	2545	42	256	402			
B100-106	0.36	0.35	5.0	2506	28	2536	45	249	387			
B110-116	0.58	0.30	5.0	2496	28	2502	45	235	307			
B120-126	0.73	0.25	5.0	2480	28	2495	40	187	272			

Tableau n°V.7 : Représentation statistique des valeurs obtenues :

Cod. Epr.	Age du béton ( Jours )	Force ( N )	Surface ( cm <sup>2</sup> )	Contrainte individ. ( bars )	Contrainte moyenne ( bars )	Ecart type ( bars )	Coef. de variance ( % )
B01	07	20300	94.985	214	220	6.67	3.03
B02		21600		227			
B03		20700		218			
B04	28	30200	94.985	318	330	10.40	3.15
B05		32000		337			
B06		31800		335			
B91	07	24400	94.985	257	256	3.60	1.40
B92		23900		252			
B93		24600		259			
B94	28	38800	94.985	409	402	7.55	1.87
B95		37400		394			
B96		38300		403			
B101	07	23700	94.985	249	250	3.16	1.26
B102		24000		253			
B103		23400		246			
B104	28	35800	94.985	377	387	9.16	2.36
B105		37500		395			
B106		36900		389			
B111	07	21800	94.985	230	235	5.00	2.12
B112		22800		240			
B113		22300		235			
B114	28	28200	94.985	297	307	15.62	5.08
B115		30900		325			
B116		28400		299			
B121	07	18300	94.985	193	187	6.55	3.50
B122		17100		180			
B123		17900		188			
B124	28	24900	94.985	262	272	10.00	3.67
B125		25800		272			
B126		26800		282			

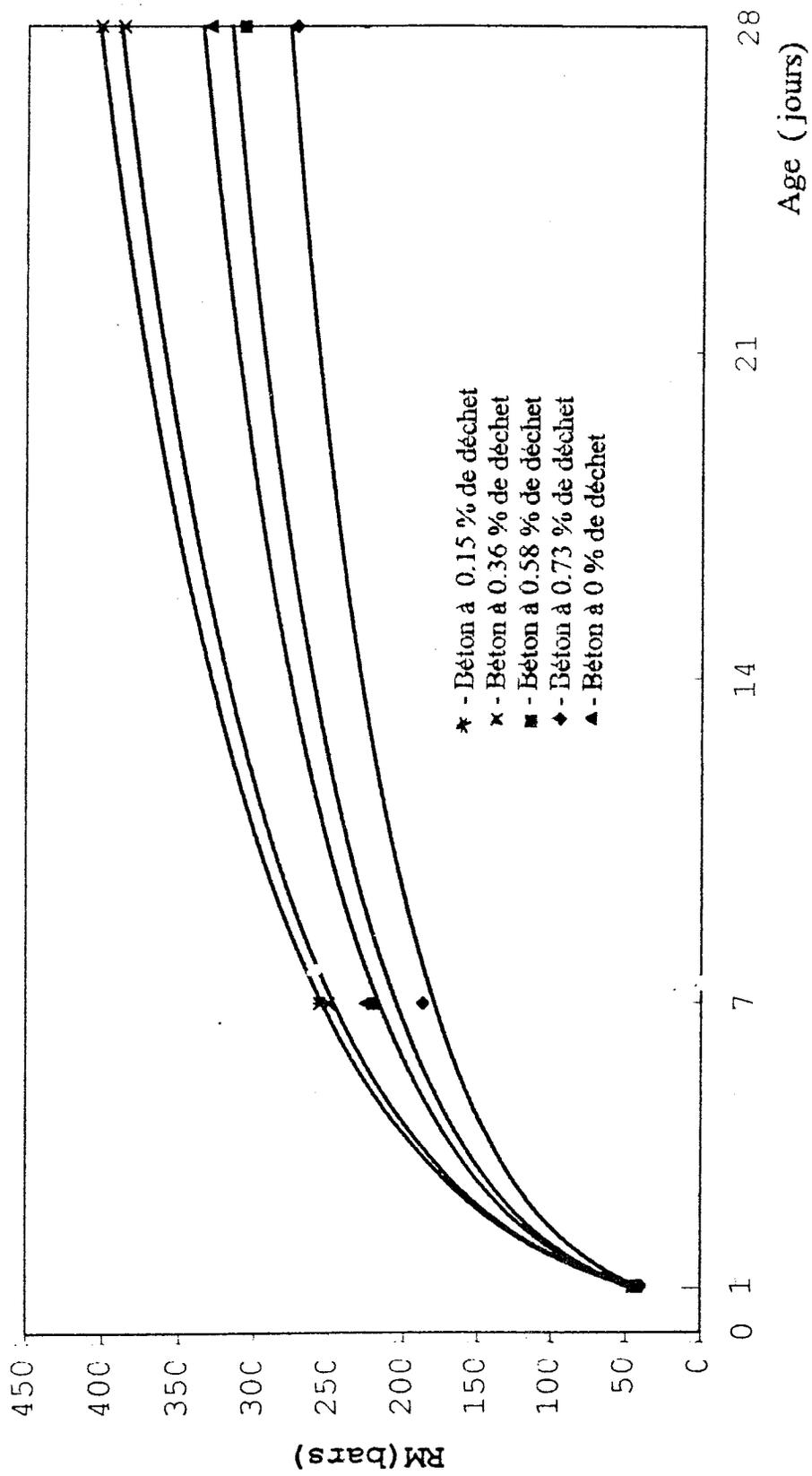


Fig.n°V.4 : Evolution des résistances mécaniques du béton sans et avec déchet à ouvrabilité constante

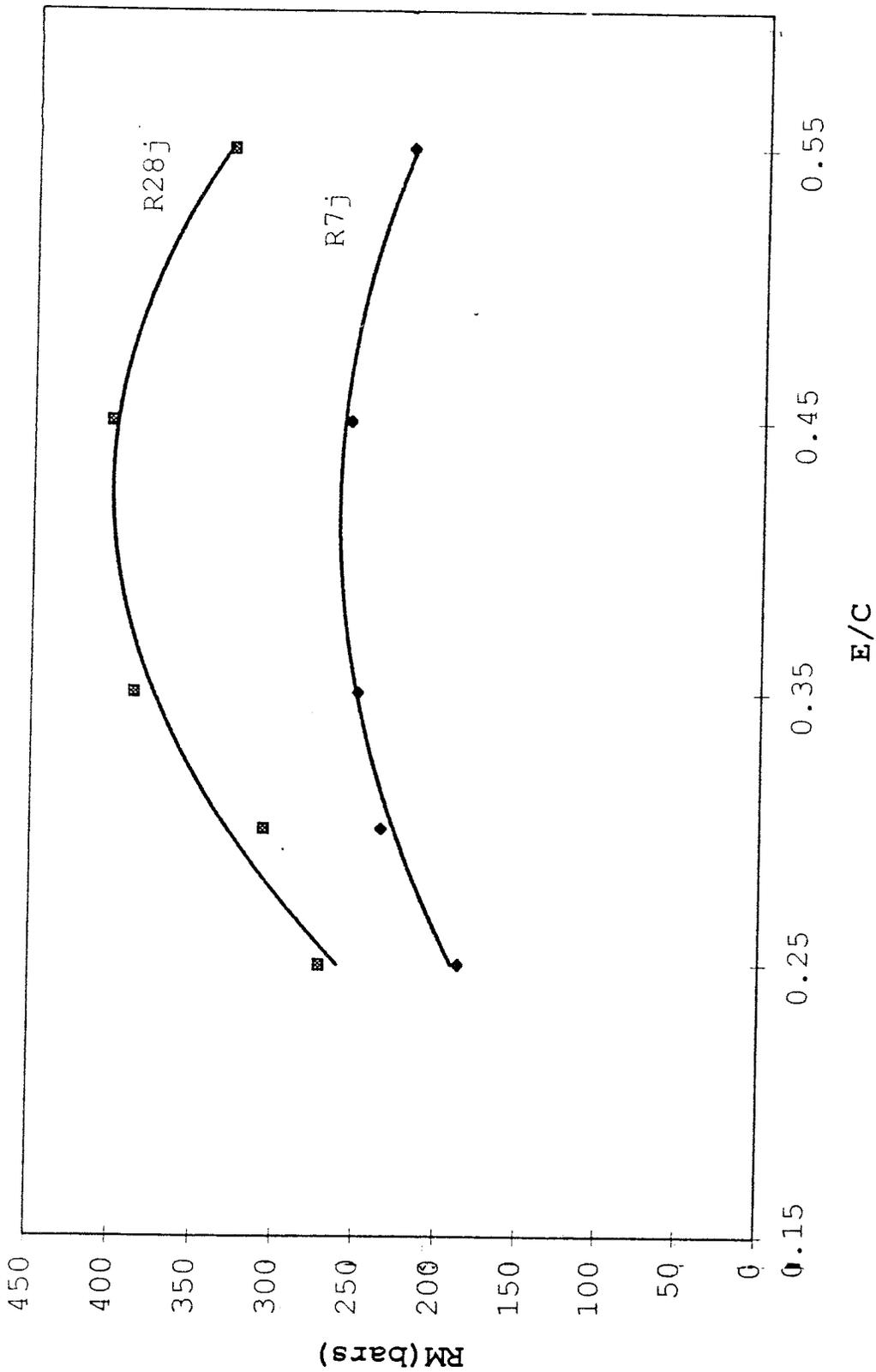


Fig.n°V.5 : Relation de la résistance mécanique en compression en fonction du dosage en eau

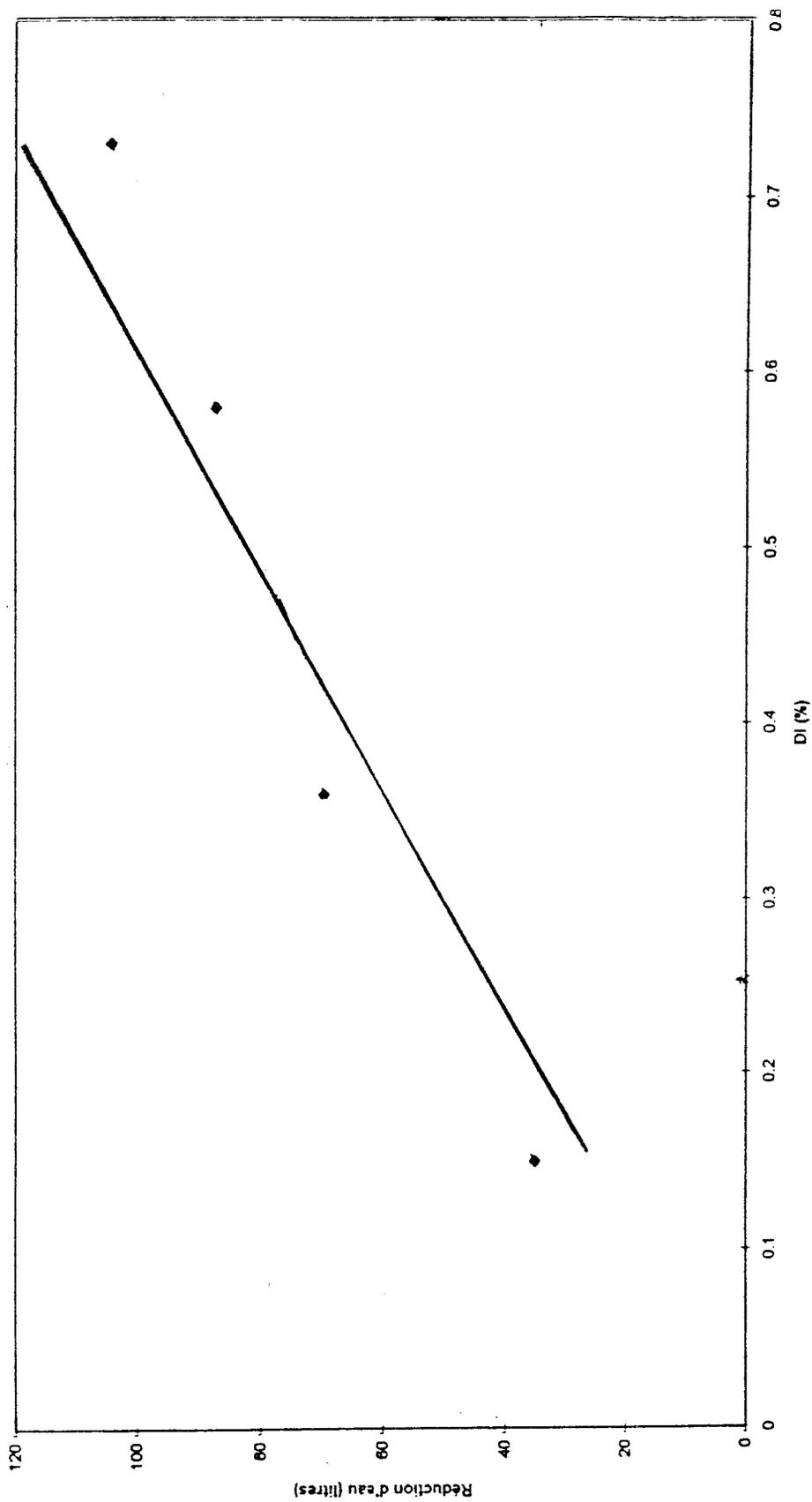


Fig.n°V.6 : Relation de la réduction d'eau de gâchage en fonction du dosage en déchet.

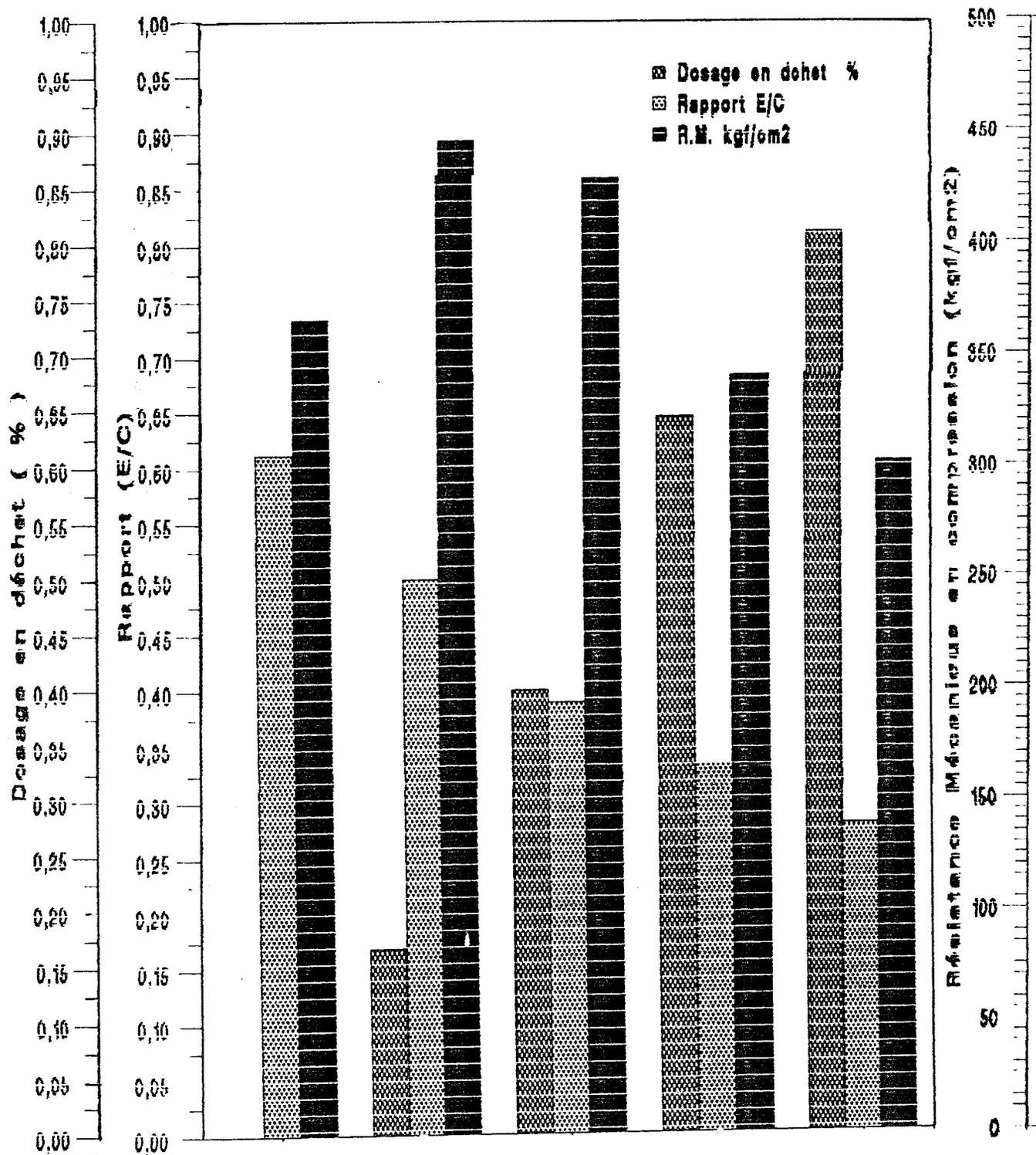


Fig.n°V.7: Histogramme : Variation du dosage en déchet, du rapport E/C et de la résistance mécanique

## Interprétation :

Compte tenu des résultats obtenus des cinq (05) formulations étudiées au tableau n°V.6, il en ressort une amélioration de la résistance mécanique en compression d'environ 21.80 % et d'une réduction d'eau de l'ordre de 18.0 % par rapport au mélange de béton témoin. Ceci s'explique par une élimination d'une partie de porosité dont celle-ci a contribué en conséquence à une amélioration de la performance mécanique.

Cependant, autant la réduction d'eau est plus importante autant les résistances mécaniques diminuent également. De ce fait, le dosage en déchet augmente impérativement pour assurer une ouvrabilité constante. En conséquence, nous assistons à une perte de résistance mécanique d'environ 17.58 % avec une réduction d'eau égale à 54.55 %. Ceci s'explique par un effet du dosage excessif du déchet qui a occasionné un entrainement d'air et qui a provoqué l'élévation de la porosité.

En définitive, le déchet à 0.15 et à 0.36 % est qualifié comme un réducteur d'eau - plastifiant conformément au tableau n°II.1 ( chapitre n°II).

Les valeurs des coefficients de variance représentées dans le tableau n°V.7 nous indiquent que la dispersion des résultats est conforme à celle exigée au tableau n°V.1.

D'autre part, les coefficients de variance pour les dosages à 0.15 et à 0.36 % sont inférieurs en grandeur à ceux du mélange témoin ce qui dénote une amélioration de l'homogénéité et une meilleure compacité du mélange dues probablement à une défloculation des grumeaux et à une baisse de porosité.

Tandis que, les coefficients de variance pour les dosages à 0.58 et à 0.73 % sont généralement supérieurs à ceux du mélange témoin ce qui explique l'élévation de la porosité et une apparition de l'hétérogénéité du mélange dues probablement à l'entrainement d'air non ordonné dans le mélange provoqué par l'état excessif du déchet.

La figure n°V.4 nous montre l'évolution des résistances mécaniques du béton avec et sans déchet avec une ouvrabilité constante. Les formulations à 0.15 et à 0.36 % de dosage de déchet possèdent une vitesse de durcissement mieux performante à celle du mélange témoin due probablement à l'empêchement de formation de floes et une meilleure hydratation des grains de ciment. Tandis que pour les formulations à 0.58 et à 0.73 %, la vitesse de durcissement est moins accentuée à celle du mélange témoin due au ralentissement de la cinétique d'hydratation causé par l'effet retardateur - colmateur du déchet.

La figure n°V.5 illustre la variation des résistances mécaniques du béton en fonction du dosage en eau de gâchage ; ceci nous montre que les résistances mécaniques en compression à 7 et à 28 jours à l'état optimum se situent approximativement dans la fourchette du rapport E/C égal à 0.35 jusqu'au rapport E/C égal à 0.45.

La figure n°V.6 illustre quasiment une relation linéaire de réduction d'eau avec l'augmentation du dosage de déchet. A titre d'exemple, 9.52 litres de déchet (équivalent à 0.15 % de déchet) se substitue à 35.0 litres d'eau de gâchage pour assurer la même ouvrabilité dans 1 m<sup>3</sup> de béton frais.

La figure n°V.7 nous montre la croissance puis la décroissance de la résistance mécanique du béton en fonction de l'augmentation continue du dosage en déchet.

Dans le but, de prendre connaissance de l'état d'évolution d'ouvrabilité du mélange dont la composition est constante à savoir ciment, sable, fraction 3/8 et 8/16 respectivement égal à 350, 640, 220 et 956 kg/m<sup>3</sup> ; nous avons préparés des mélanges à quatre (04) rapports E/C (0.55, 0.45, 0.35 et 0.25) et chaque rapport E/C est traité avec des dosages variables en déchet.

Tableau n°V.8 : Evolution de l'ouvrabilité en fonction du rapport E/C et du dosage en déchet industriel :

Cod. des mélanges	Dosage en D.I (%)	Rapport E/C	Eau de gâchage (litre)	Ouvrabilité (cm)
B131	0	0.55	192.5	5.0
B132	0.10			9.0
B133	0.20			16.0
B134	0.30			21.0
B135	0.50			25.0
B141	0	0.45	157.5	0.0
B142	0.15			5.0
B143	0.30			12.0
B144	0.40			15.0
B145	0.70			23.0
B151	0	0.35	122.5	0.0
B152	0.20			3.0
B153	0.60			10.0
B154	0.80			16.0
B155	1.00			23.0
B161	0	0.25	87.5	0.0
B162	0.20			0.0
B163	1.00			8.0
B164	1.30			13.0
B165	1.50			20.0

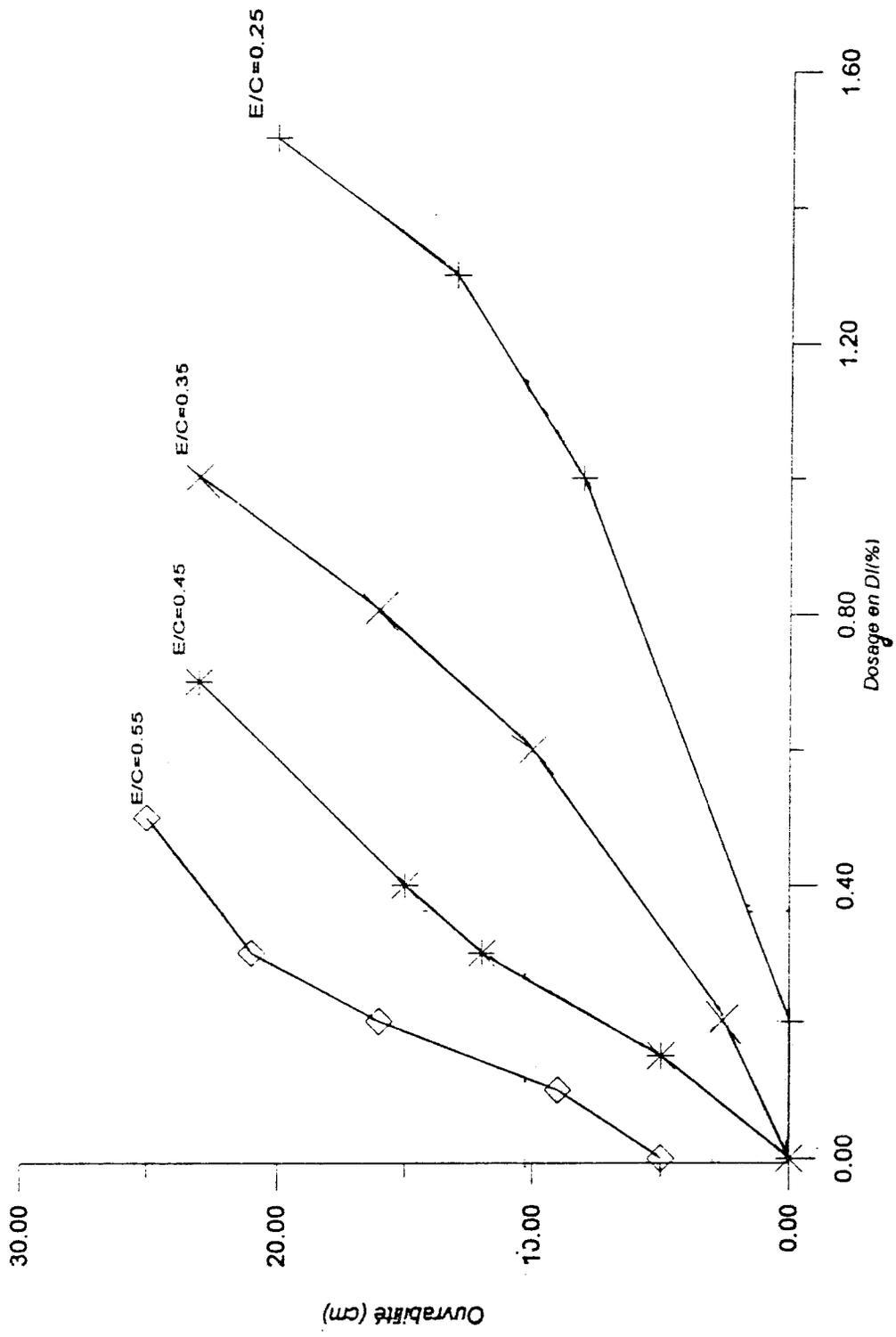


Fig.n°V.8 : Evolution de l'ouvrabilité en fonction du dosage en D1 pour des rapports E/C à 0.55, 0.45, 0.35 et 0.25

## Interprétation :

Les résultats obtenus au tableau n°V.8 nous montrent une évolution croissante de l'ouvrabilité par addition du déchet à dosage variable. L'ouvrabilité se développe à chaque rapport E/C constant. Nous constatons que le pouvoir mouillant du déchet varie selon le dosage du milieu aqueux. Ceci s'explique que pour un même dosage à 0.30 % en déchet au rapport E/C égal à 0.55 et à 0.45 dont l'écart en eau de gâchage est égal à 35 litres. Nous constatons à cet effet une diminution d'ouvrabilité de 4.0 cm.

Cependant pour un autre cas, de dosage à 1.0 % de déchet au rapport E/C égal à 0.35 et à 0.25 dont l'écart en eau est aussi égal à 35 litres, nous remarquons une diminution importante d'ouvrabilité de l'ordre de 15.0 cm.

La figure n°V.8 illustre l'évolution de l'ouvrabilité en fonction des dosages en déchet pour des rapports E/C égal à 0.55 , à 0.45, à 0.35 et à 0.25. L'augmentation de l'ouvrabilité du mélange à rapport E/C égal 0.55 est beaucoup plus importante qu'à celle des mélanges à rapport E/C égal à 0.45, à 0.35 ou à 0.25.

## 5 : Possibilité d'économie de ciment :

M. BOLOMEY a établi une relation permettant à la résistance mécanique du béton de varier en fonction de la variation des dosages en ciment, en eau, de la résistance vraie du ciment et de la qualité des granulats.

Partant de cette idée, nous voulons dégager l'économie de ciment dans le mélange du béton sans pour autant entraver la résistance du béton fixée au préalable et en se basant à partir de la formule de BOLOMEY.

1)- Dépense de ciment dans une composition de béton.

$$C/E = \frac{R_b}{AR_c} + 0.50$$

Dans notre cas :  $R_b = 330$ ,  $A = 0.455$ ,  $R_c = 500$ .

$$\text{Donc } C/E = 1.95$$

$$\frac{D_0}{E_0} = C/E \Rightarrow D_0 = C/E \times E_0 \quad \text{où } D_0 : \text{dépense de ciment au mélange initial}$$

$$D_0 = 1.95 \times 1.92 = 374.40 \text{ kg/m}^3$$

2)- Dépense de ciment dans une composition de béton avec l'introduction d'un déchet industriel dosé 0.15 %, formulation jugée meilleure et satisfaisante (avec  $R_b = 402$ ,  $A = 0.455$ ,  $R_c = 500$ )

$$C_1/E_1 = \frac{R_b}{AR_c} + 0.50 \Rightarrow C_1/E_1 = 2.26$$

$$\frac{D_1}{E_1} = C_1/E_1 \Rightarrow D_1 = 2.26 \times 157.50 = 356 \text{ kg/m}^3$$

ou  $D_1$  : dépense de ciment au mélange à 0.15 % de DI

3)- Economie de ciment :

$$X\% = \frac{D_0 - D_1}{D_0} \times 100$$

$$X\% = \left( \frac{374.40 - 356}{374.40} \right) 100 = 4.92 \%$$

ou X % : Pourcentage en économie de ciment.

C'est à dire un gain de ciment par l'introduction du déchet à 0.15 % est de l'ordre 18,4 tonnes pour 1000 m<sup>3</sup> de béton à couler.

Tableau récapitulatif n°V.9 : Gain en ciment

Dosage en DI (%)	Depense de ciment (kg)	Economie de ciment		
		Pourcentage (%)	Pour 1m <sup>3</sup> de Béton. (kg)	Pour 1000m <sup>3</sup> de béton (kg)
0	374.40	--	--	--
0.15	356	4.92	18.40	18400.00

L'incorporation de ce déchet dans le mélange de béton permet donc une économie non négligeable de ciment comme le montrent les valeurs du tableau ci-dessus, un gain de 18.4 tonnes de ciment pour 1000 m<sup>3</sup> de béton à mettre en oeuvre.

## 6 - Conclusion du chapitre.

Dans ce présent chapitre, il est à noter que le déchet industriel local possède un pouvoir de "lubrification" du mélange impressionnant. De ce fait, il est capable de jouer le rôle d'adjuvant superplastifiant, d'adjuvant plastifiant, et d'un adjuvant reducteur d'eau.

Les résultats de cette étude d'investigation nous ont emmenés à déboucher sur une formulation optimum en terme de performance mécanique et qui se définit par la composition et les paramètres suivants :

- 1)- Dosage en ciment :  $350.0 \text{ kgf/m}^3$
- 2)- Dosage en eau :  $157.5 \text{ kg/m}^3$
- 3)- Dosage en sable :  $640.0 \text{ kg/m}^3$
- 4)- Dosage en gravillon (3/8) :  $220.0 \text{ kg/m}^3$
- 5)- Dosage en gravillon (8/16) :  $956.0 \text{ kg/m}^3$
- 6)- Dosage en DI :  $9.52 \text{ litre /m}^3$
- 7)- Rapport E/C : 0.45
- 8)- couple dechet/ciment : 0.15 %
- 9)- Ouvrabilité (Af. au cône) : 50 mm
- 10)- Durée de compactage à l'aide d'une microtable vibrante : 28 secondes
- 11)- Performance mécanique : 40,2 MPa

Aussi, il y a lieu de noter une économie de ciment de l'ordre 4.92 % soit 18,40 tonnes de ciment pour  $1000 \text{ m}^3$  de béton à couler.

Le prochain chapitre fera l'objet d'une deuxième étape de travail de recherche qui se rapportera à l'optimisation de la composition du béton adjuvanté retenue.

**CHAPITRE N° VI**  
*OPTIMISATION DE LA FORMULATION  
DU BETON ADJUVANTE A 0.15% DE  
DECHET*

## OPTIMISATION DE LA FORMULATION DU BETON ADJUVANTE A 0.15 % DE DECHET

A- Accroissement du dosage en ciment avec rapport E/C constant :

Compte tenu des résultats obtenus au chapitre précédent (chap. n°V) en ce qui concerne le dosage efficace à 0.15 % de déchet, nous optimisons en terme de performance mécanique ce même dosage par l'accroissement des dosages en ciment. A cet effet, le rapport E/C, le dosage en déchet, la quantité en sable, en gravillon 3/8 et 8/16 sont tous constants, respectivement égal à 0.45 ; 0.15 % ; 690, 240 et 1030 kg/m<sup>3</sup>.

Les résultats du travail expérimental sont représentés selon le tableau n°VI.1 ci - après :

A.1- Présentation des résultats expérimentaux :

Tableau n°VI.1. Résultats des essais physiques et mécaniques du béton frais et durci.

Cod.	Dosage ciment kg/m <sup>3</sup>	Propriétés Béton frais			Propriétés Béton durci			
		Densité kg/m <sup>3</sup>	Ouvr. (cm)	T. Comp (sec)	Densité kg/m <sup>3</sup>	Résistance Mécanique en compression (kgf / cm <sup>2</sup> )		
						1 jour	7 jours	28 jours
X10.26	350	2510	5.0	28	2524	45	305	422
X20.26	450	2445	12.5	16	2466	42	263	390
X30.36	550	2436	20.0	5	2447	40	255	360

Et aussi, nous avons déterminé la dispersion des résultats qui se présentent dans le tableau n°VI.2 ci-après :

Tableau n° VI.2 : Valeurs du calcul statistique des résistances mécaniques en compression à 7 et 28 jours :

Cod. Epr.	Effort (N)	Surface (cm <sup>2</sup> )	Contrainte individ. (bars)	Contrainte moyenne (bars)	Ecart type (bars)	Coefficient de variance (%)
X11 X12 X13	290.000 294.500 285.000	95.0	305 310 300	305	5.00	1.64
X14 X15 X16	395.200 399.000 408.500	95.0	416 420 430	422	7.21	1.71
X21 X22 X23	247.000 252.700 248.900	95.0	260 266 262	263	3.08	1.17
X24 X25 X26	368.600 364.800 378.100	95.0	388 384 398	390	7.21	1.85
X31 X32 X33	238.400 242.200 245.100	95.0	251 255 258	255	3.00	1.17
X34 X35 X36	342.000 340.100 340.000	95.0	360 358 362	360	2.00	0.56

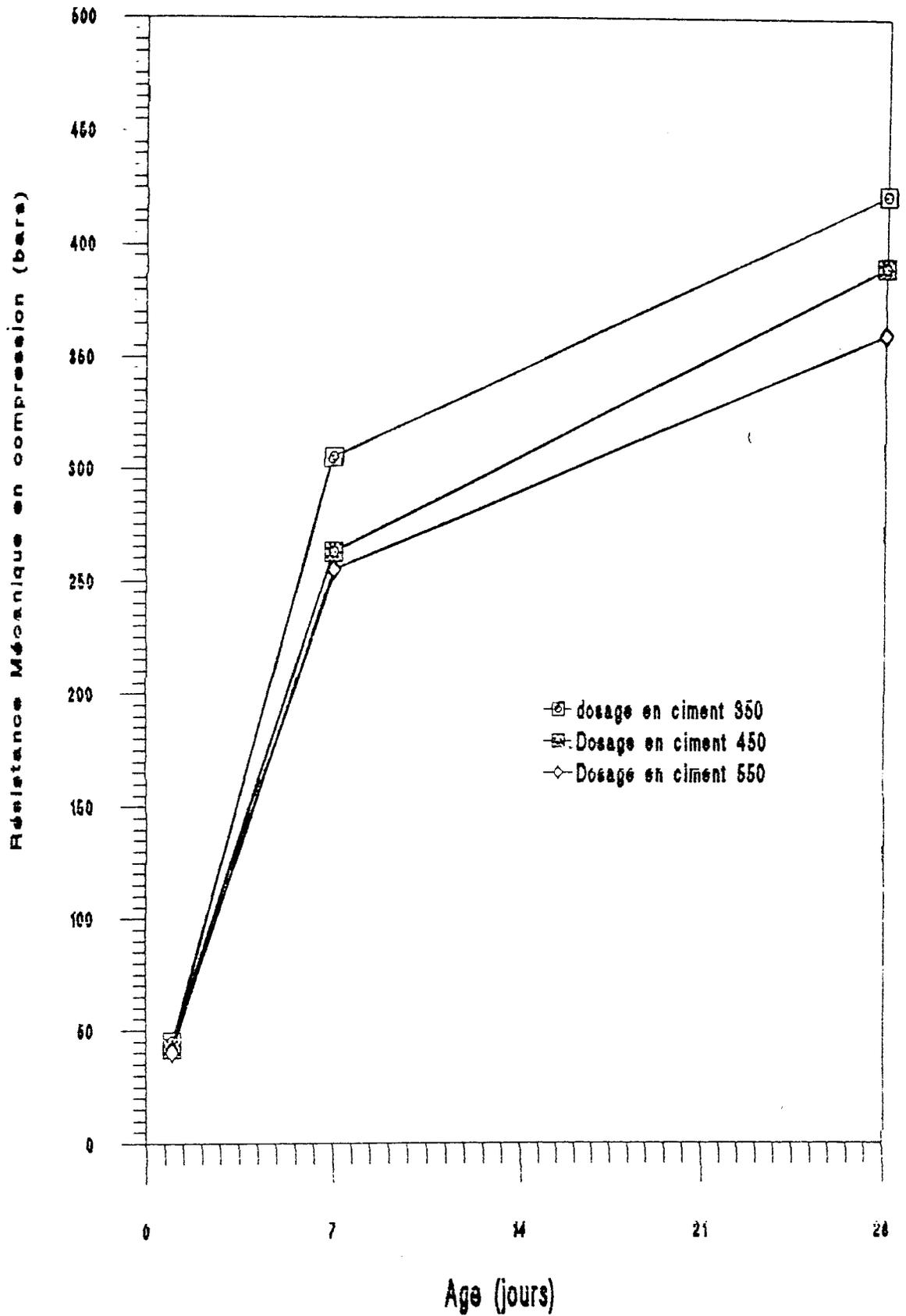


Fig.N°VI.1 : Evolution de la résistance mécanique en fonction du dosage en ciment

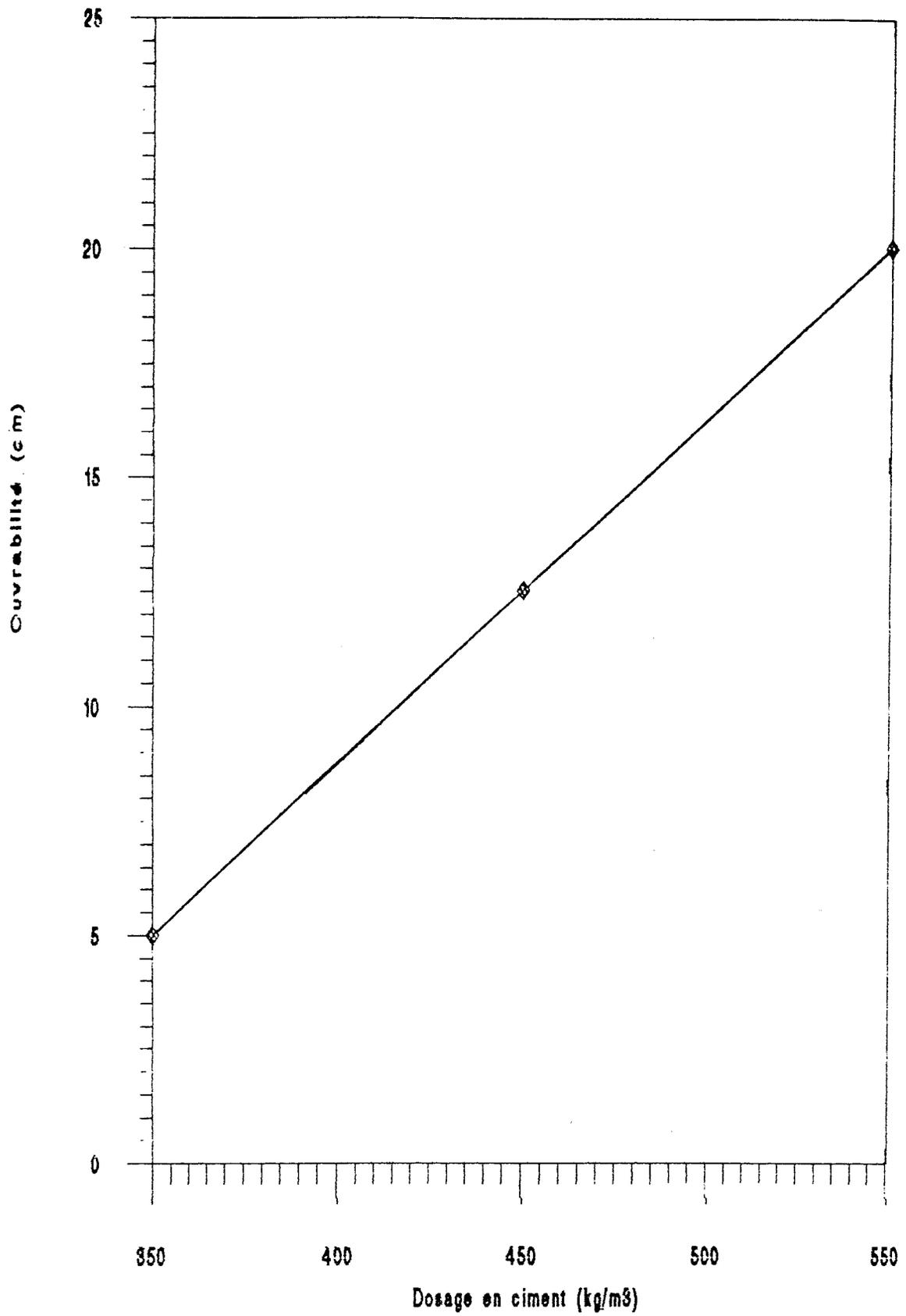


Fig.N°VI.2 : Relation de l'ouvrabilité en fonction du dosage en ciment

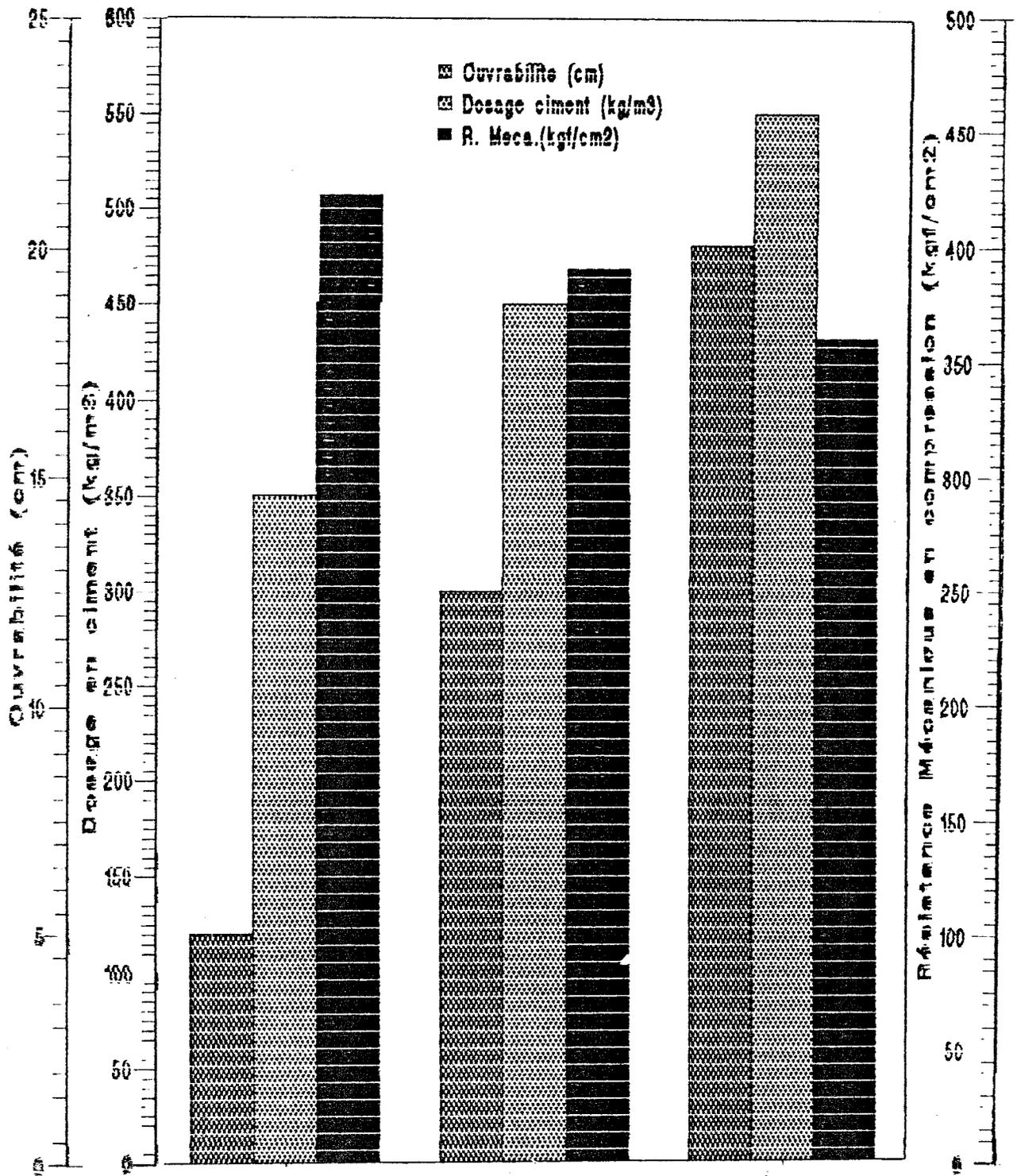


Fig.n°VI.3 : Histogramme : Variation de l'ouvrabilité, du dosage en ciment et de la résistance mécanique.

## A.2 - Interprétation :

Les résultats du tableau n°VI.1 nous montrent l'augmentation de l'ouvrabilité et la diminution des résistances mécaniques par l'accroissement du dosage en ciment. Un dosage en ciment de 350 à 550 nous donne une variation d'ouvrabilité de 5 à 20 cm, c'est à dire 36.40 % de ciment provoque une élévation d'ouvrabilité de 75 % nous constatons que le dosage en ciment joue un rôle de plastifiant grâce à ses grains fins comme l'a montré Albert JOISEL[26].

En conséquence, nous assistons par cette grande ouvrabilité, à une perte de résistance mécanique de 15 % due à la présence des pores signalées par la diminution des densités. Dans ce cas, un dosage à 350 est plus intéressant en terme de performance mécanique.

Les valeurs du coefficient de variabilité au tableau n°VI.2 sont inférieures à 8 %, ce qui signifie que la résistance moyenne en compression calculée représente une bonne approche de la résistance réelle.

La figure n°VI.1 illustre l'évolution des résistances mécaniques à la compression à l'âge de 1,7 et 28 jours pour les dosages 350, 450 et 550. Nous constatons que le durcissement est plus significatif à 28 jours en comparaison à celui de 7 jours.

La figure n°VI.2 donne l'allure de l'augmentation de l'ouvrabilité avec l'accroissement du dosage en ciment. La relation est quasiment linéaire.

La figure n°VI.3 est un histogramme qui nous montre la croissance à la fois du dosage en ciment et de l'ouvrabilité accompagnée de la décroissance des résistances mécaniques.

## B- Accroissement du dosage en ciment avec réduction du rapport E/C.

Suite aux résultats obtenus, il est intéressant de minimiser et d'ajuster la grandeur de l'ouvrabilité dans le but d'améliorer la compacité du béton d'où résulte une meilleure performance mécanique. Pour cela, nous avons procédé à la réduction du rapport E/C avec l'accroissement du dosage en ciment.

En outre, le dosage en déchet, sable et gravillon de 3/8 et 8/16 sont constants et respectivement égal à 0.15 %, 690, 240 et 1030 kgf/m<sup>3</sup>.

Les résultats expérimentaux se présentent comme suit :

### B.1 - Présentation des résultats :

Tableau n°VI.3 : Résultats d'essais physiques et mécaniques :

Cod. Epr.	Dosage ciment kg/m <sup>3</sup>	Rapport E/C	Propriétés du Béton frais			Propriétés du Béton durci			
			Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Ouvr. (cm)	T.Com p (sec)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Résistance Mécaique en compression (kgf/m <sup>2</sup> )		
							1 jours	7 jours	28 jours
X40/46	450	0.40	2520	5.5	30	2558	100	352	480
X50/56	550	0.40	2516	9.0	20	2538	92	325	468
X60/66	450	0.35	2502	0.5	45	2516	80	320	452
X70/76	550	0.35	2484	0.0	50	2496	75	308	442

Tableau n°VI.4 : Valeurs du calcul statistiques des résultats d'essais des résistances mécaniques en compression à 7 et 28 jours

Cod. Epr.	Effort (N)	Surface (cm <sup>2</sup> )	Contrainte individ. (Bars)	Contrainte moyenne (bars)	Ecart type (bars)	Coefficient Variance (%)
X41	338.200		356			
X42	330.600	95.0	348	352	4.0	1.13
X43	334.400		352			
X44	460.700		485			
X45	454.100	95.0	478	480	4.35	0.90
X46	453.100		477			
X51	304.000		320			
X52	309.700	95.0	326	325	4.58	1.40
X53	312.500		329			
X54	438.900		462			
X55	446.500	95.0	470	468	5.29	1.13
X56	448.400		472			
X61	305.900		322			
X62	305.900	95.0	322	320	3.46	1.08
X63	300.200		316			
X64	421.800		444			
X65	437.000	95.0	460	452	8.00	1.77
X66	429.400		452			
X71	298.300		314			
X72	290.700	95.0	306	308	5.29	1.72
X73	288.800		304			
X74	413.200		435			
X75	425.600	95.0	448	442	6.56	1.48
X76	420.800		443			

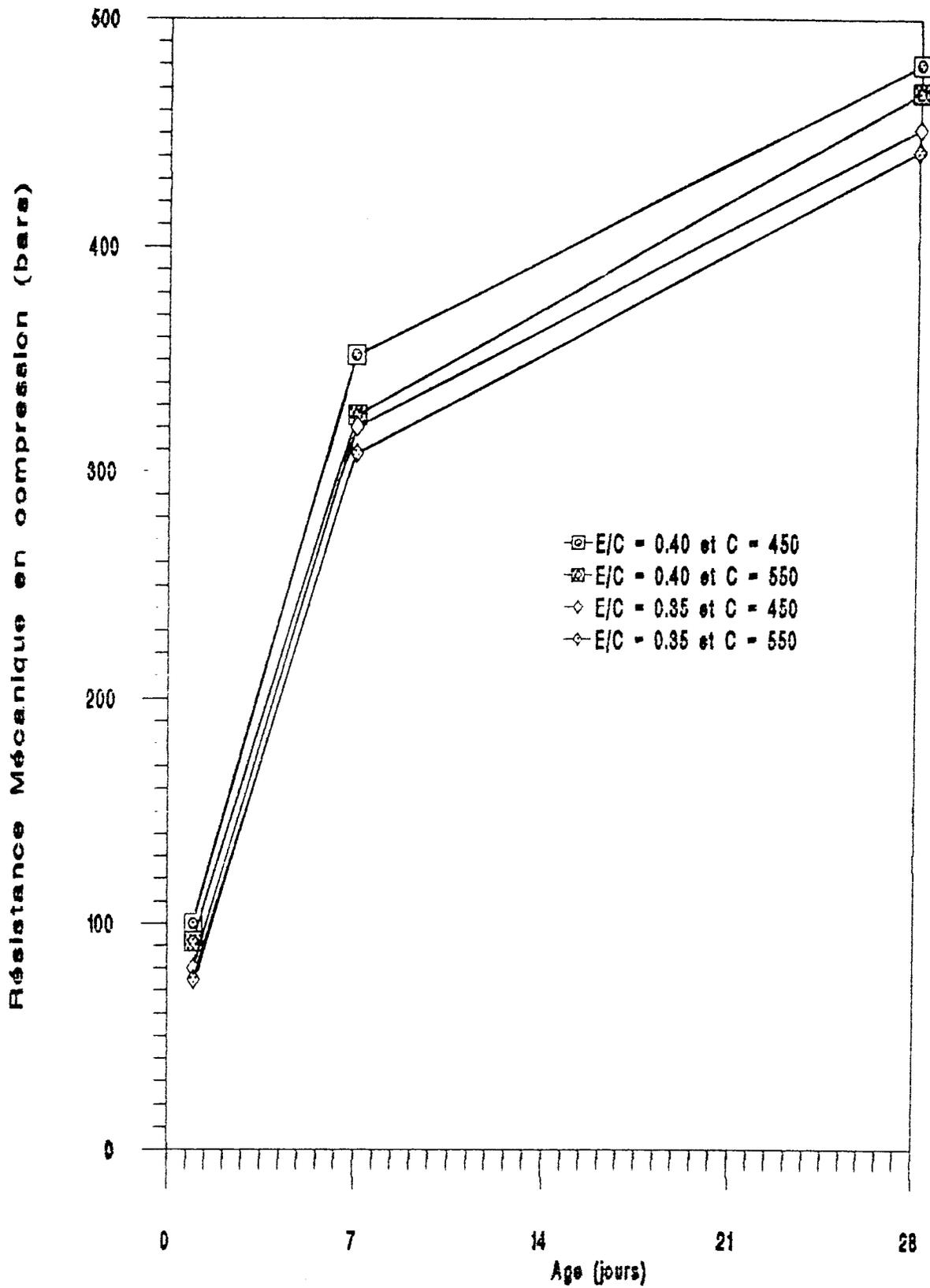


Fig.N°VI.4 : Evolution des résistances mécaniques en fonction du dosage en ciment et du rapport E/C.

## B.2- Interprétation :

Les résultats obtenus au tableau n°VI.3 nous donnent à rapport E/C égal à 0.40 pour les dosages 450 et 550, une faible augmentation d'ouvrabilité et une diminution moins accentuée de la résistance mécanique. Tandis qu'au rapport E/C égal à 0.35 pour les dosages 450 et 550, l'ouvrabilité est quasiment nulle et une faible diminution de résistances mécaniques, nous constatons lors de la mise en oeuvre, une mauvaise mise en place du mélange et un moyen de serrage insuffisant à l'aide d'une microtable vibrante ce qui a conduit à une faiblesse des résistances mécaniques. Cependant, les résistances mécaniques obtenues au rapport E/C égal à 0.40 et à 0.35 sont relativement meilleures que celles obtenues avec E/C égal à 0.45.

Cette amélioration s'explique par la diminution de la porosité comme le confirment les valeurs des densités du béton durci dûe à l'ajustement de l'ouvrabilité et à la diminution de la teneur en eau de gâchage. Cette investigation nous fait savoir que le dosage en ciment n'entraîne pas automatiquement l'élévation des résistances mécaniques mais au contraire de tenir compte des autres paramètres à savoir le dosage en déchet, la teneur en eau de gâchage et l'ouvrabilité. Cette investigation nous mène à une performance mécanique optimale de l'ordre de  $480 \text{ kgf/cm}^2$ .

Les coefficients de variance représentés au tableau n°VI.4 permettent de signifier les résultats obtenus comme excellents.

L'évolution des résistances mécaniques aux rapports E/C égaux à 0.40 et à 0.35 pour les dosages en ciment à 450 et 550 est illustrée par la figure n°VI.4 .

## C- Mesure du retrait et du gonflement et détermination des modules d'élasticité

### C.1- Mesure du retrait et du gonflement

#### C1.1- Variations dimensionnelles

L'essai du retrait et de gonflement consiste à suivre les variations subies par les éprouvettes au cours de durcissement d'un mortier, béton ou pâte pure de ciment.

Après avoir pris connaissance de l'impact du déchet industriel sur les performances mécaniques du béton, nous examinons entre autres, les variations dimensionnelles des mélanges sous l'effet du déchet industriel. Dans ce cas, l'ouvrabilité du mélange est prise constante égale à la consistance normale.

L'identification des mélanges est représentée suivant le tableau ci-après.

Tableau n°VI.5 : Identification des mélanges.

Cod. Epr.	Ciment (g)	Eau (ml)	Sable (g)	Déchet Industriel		E / C
				%	ml	
T1	450	225	1350	0	0	0.50
T2	450	212.75	1350	0.15	12.25	0.47
T3	450	202.50	1350	0.20	16.32	0.45
T4	550	192.50	1350	0.20	19.96	0.35

T1 : Mélange témoin (sans déchet)

T2 : Mélange à 0.15 M de déchet

T3 : Mélange à 0.20 % de déchet

T4 : Mélange à 0.20 % de déchet au dosage en ciment de 550 kg/m<sup>3</sup>.

Les résultats de retrait et de gonflement sont représentés dans le tableau n°VI 6 . Une série d'éprouvettes de mortier a été conservée dans une ambiance à 50 % d'humidité et à 20 ° C; l'autre série a été conservée dans l'eau .

Tableau n°VL.6 : Résultats d'essais du retrait et du gonflement:

Cod. Epr.	Durée de Conser (jours)	Conservation à l'air H = 50 % ; T = 20°C				Conservation dans l'eau			
		Retrait		Perte de poids		gonflement		gain de poids	
		( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	(%)	(g)	(%)	( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	(%)	(g)	(%)
T <sub>1</sub>	3	300	0.030	21.70	3.70	40	0.004	0.60	0.10
	7	800	0.080	26.60	4.53	80	0.008	5.70	0.90
	14	900	0.090	27.90	4.75	100	0.010	6.20	1.08
	28	970	0.097	29.50	5.02	120	0.012	6.80	1.19
T <sub>2</sub>	3	250	0.025	18.50	3.68	50	0.005	0.80	0.16
	7	700	0.070	22.30	4.43	85	0.008	6.00	1.20
	14	800	0.080	23.50	4.67	110	0.011	7.50	1.50
	28	850	0.085	25.00	4.28	140	0.014	10.80	2.15
T <sub>3</sub>	3	200	0.020	16.40	3.09	60	0.006	1.50	0.28
	7	600	0.060	17.80	3.35	100	0.010	6.80	1.28
	14	700	0.070	20.50	3.86	140	0.014	8.50	1.60
	28	750	0.075	23.60	4.45	160	0.016	11.70	2.20
T <sub>4</sub>	3	100	0.010	14.20	2.43	70	0.007	3.10	0.53
	7	150	0.015	16.80	2.88	120	0.012	7.50	1.29
	14	150	0.015	17.50	3.00	160	0.016	9.60	1.65
	28	200	0.020	18.20	3.12	190	0.019	12.80	2.20

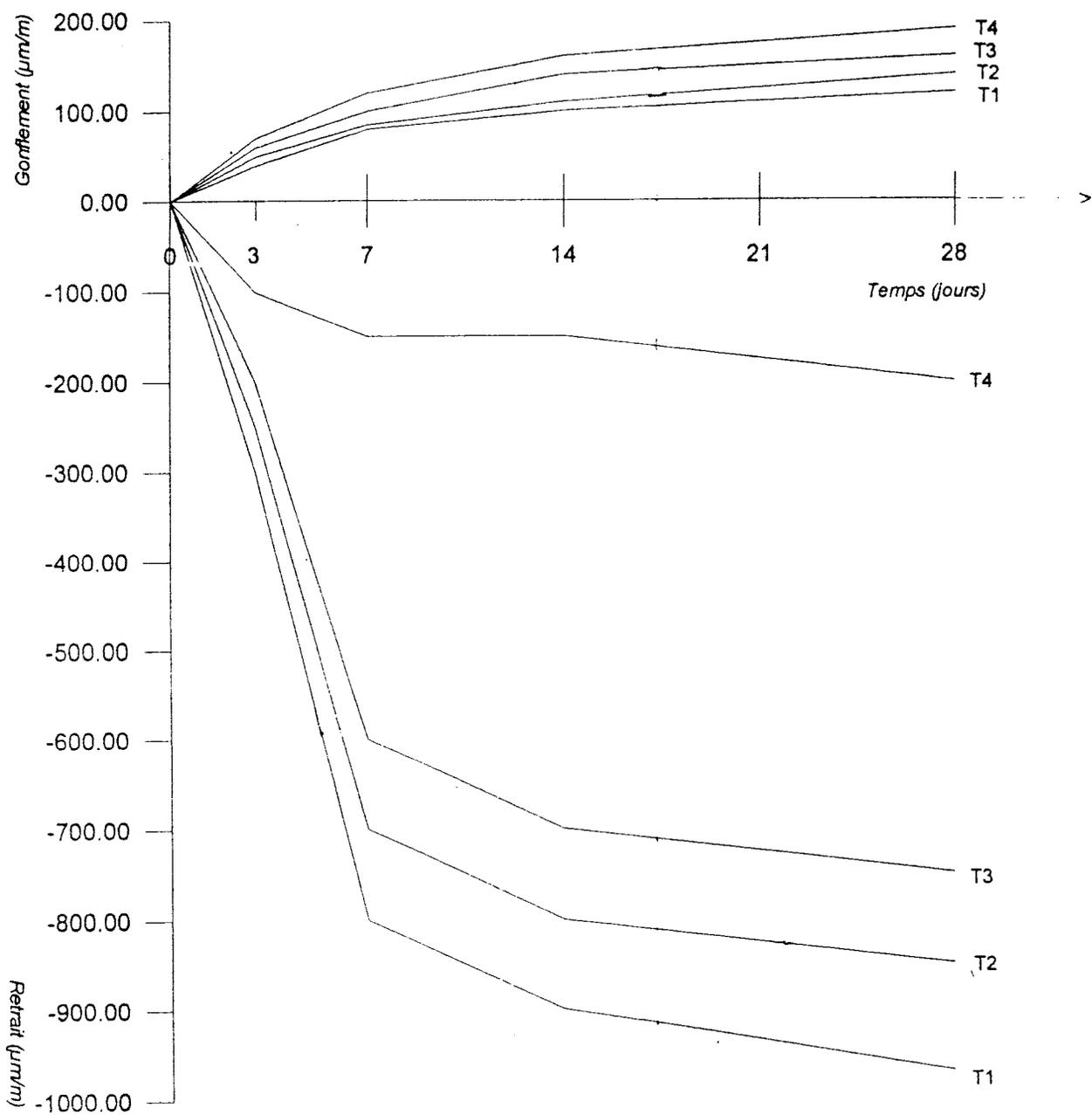


Fig.n°VI.5 : EVOLUTION DE RETRAIT ET DE GONFLEMENT  
DES MELANGES AVEC ET SANS ADDITION DE  
DECHET INDUSTRIEL

### C.1.2- Interprétation :

Les valeurs représentés dans le tableau n°VI.6, nous indiquent l'amélioration de retrait et de gonflement des mélanges avec déchet en comparaison aux mélanges sans déchet.

Cette diminution du retrait des mélanges adjuvantés est due à la densification de la matrice , devenue moins poreuse .

Cette augmentation de gonflement est accompagnée d'un gain de poids des éprouvettes due à la quantité d'eau absorbée au cours de durcissement dans le milieu aqueux.

Les éprouvettes T2 et T3 présentent une diminution de retrait à 28 jours respectivement de 12.37 % et de 22.68 % par rapport à l'étalon T1 , la diminution de retrait de T4 est très remarquable et représente 79.38 % par rapport au mélange T1. Ces résultats corroborent ceux obtenus par d'autres chercheurs.

La figure n° VI.5 illustre la variation des déformations de retrait et de gonflement du mélange avec et sans déchet, nous constatons que la vitesse de retrait est rapide jusqu'à l'âge de 7 jours, moins rapide entre 7 et 14 jours et lente à partir de 14 jours, ce qui denote que la plus grande quantité d'eau évaporée se situe dans les premiers âges à savoir 3 et 7 jours.

Cependant la déformation au retrait du mélange T4 est faible par rapport au mélange T1. ceci s'explique par la faiblesse du rapport E/C qui se manifeste par une faible quantité d'eau évaporée en comparaison à celle du mélange T1.

En conclusion, la diminution des pertes de poids à 28 jours de durcissement des mélanges T1, T2, T3 et T4 est respectivement égale à 5.02 ; 4.98 ; 4.45 et 3.12 %. Cette diminution est en étroite relation avec la diminution du retrait des mélanges T1, T2, T3 et T4 et équivaut respectivement à 0.097 ; 0.085 ; 0.075 et 0.020 %. Ceci s'explique que le retrait hydraulique est dû à l'évaporation de l'eau du béton durci à l'air ambiant, la tension superficielle des ménisques de l'eau restée dans les interstices met cette eau en dépression, certaines parties des solides se trouvent ainsi comprimées et il en résulte un retrait. L'apport de ce déchet dans le béton a contribué favorablement pour la diminution de la déformation au retrait et ce qui met en évidence notre but recherché.

## C.2- Détermination des modules d'élasticité :

### C.2.1- Comportement élastique :

A défaut des résultats de mesures expérimentales, nous avons déterminé analytiquement les modules d'élasticité à partir des formules empiriques proposées par certains règlements de calcul du béton. Dans le cas de compression, nous citons des formules suivantes:

Code de calcul	Valeur du M.E.	Unités
B.A.E.L. 83	$12000 (\sigma_c)^{1/3}$	MPA
C.C.B.A 68	$21\ 000 (\sigma_c)^{1/2}$	bars
C.E.B	$9\ 500 (\sigma_c)^{1/3} - 8$	MPA
C.E.S	$48\ 000 (\sigma_c)^{1/3}$	bars

Dans ces formules  $\sigma_c$  et M.E représentent respectivement la résistance à la compression du béton et le module d'élasticité.

Les valeurs de M.E obtenues diffèrent d'un règlement à l'autre, dans notre cas nous adoptons le BAEL 83 puisque le choix est justifié du fait que ces dernières sont actuellement les plus utilisées dans le calcul des structures.

En prenant comme valeurs de  $\sigma_c$ , la valeur mesurée expérimentalement par des essais de compression sur des éprouvettes cylindriques, donc le module d'élasticité est égal à :

$$ME_{ij} = 12000 (\sigma_{cj})^{1/3}$$

$ME_{ij}$  : module d'élasticité à j jours

$\sigma_{cj}$  : Résistance en compression à j jours

Le module d'élasticité caractérise un coefficient de proportionnalité de la contrainte à sa déformation, par la relation  $\sigma = ME \cdot \Sigma$ ,  $\Sigma$  : représente la déformation.

L'enregistrement du diagramme contrainte-déformation lors de l'essai d'une éprouvette à la compression simple conduit à une courbe dont l'allure est rappelée de la manière suivante : le béton suit pratiquement la loi de Hooke, c'est à dire que la déformation croît de façon quasi-linéaire jusqu'à une contrainte égale à environ la moitié de la contrainte ultime, au delà, la courbe contrainte-déformation s'incurve progressivement jusqu'à l'atteinte de la contrainte maximale, puis la résistance décroît légèrement et la ruine complète a eu lieu pour une déformation donnée.

Donc la forme sensiblement linéaire de la courbe à son début permet de compter sur un module d'élasticité constant dans toute la zone qui correspond à l'utilisation normale du béton, la partie restante de la courbe n'étant considérée que pour des calculs d'adaptation plastique sous forte contrainte, ou pour la vérification vis à vis de l'état limite ultime.

En outre, à titre de rappel, le coefficient de ductilité dépend du comportement élastique, puisque c'est le rapport de la formation de rupture à la déformation élastique sous la même sollicitation.

Les valeurs des modules d'élasticités et des déformations sont représentées dans les tableaux ci-après.

D'une part, nous avons présenté les modules d'élasticité du mélange sans et avec déchet à dosage variable au tableau n° VI.7. Les résistances mécaniques en compression à 28 jours sont prises du chapitre précédent suivant la codification portée aux éprouvettes.

Et d'autre part, suite au dosage à 0.15 % de déchet jugé efficace, nous avons également déterminé les modules d'élasticité de ce mélange avec la réduction du rapport E/C au tableau n°VI.8, les résistances mécaniques en compression à 28 jours sont prise du présent chapitre selon la codification portée aux éprouvettes.

Tableau n°VI.7 : Valeurs des modules d'élasticité des mélanges avec et sans déchet.

Cod. Epr.	dosage en D I	Contrainte ( $\sigma_c$ ) MPa	Module d'élasticité (M.E) GPa	Déformation ( $\Sigma$ ) $10^{-3}$
B04/06	0	33.0	38.49	0.857
B94/96	0.15	40.2	41.11	0.978
B10/106	0.36	38.7	40.59	0.954
B114/116	0.58	30.7	37.57	0.817
B124/126	0.73	27.2	36.09	0.754

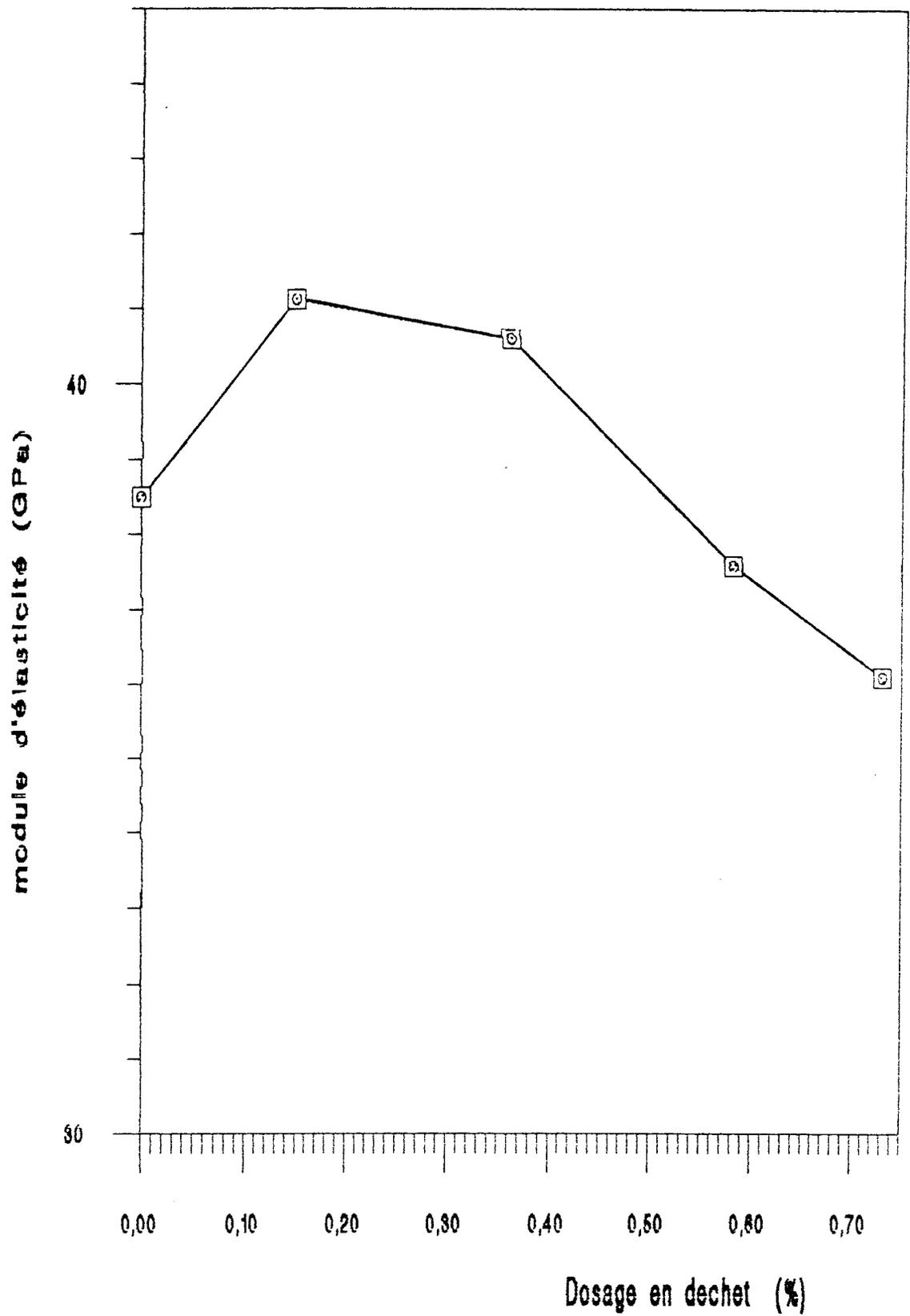


Fig.VI.6 : Relation du module d'élasticité en fonction du dosage en déchet.

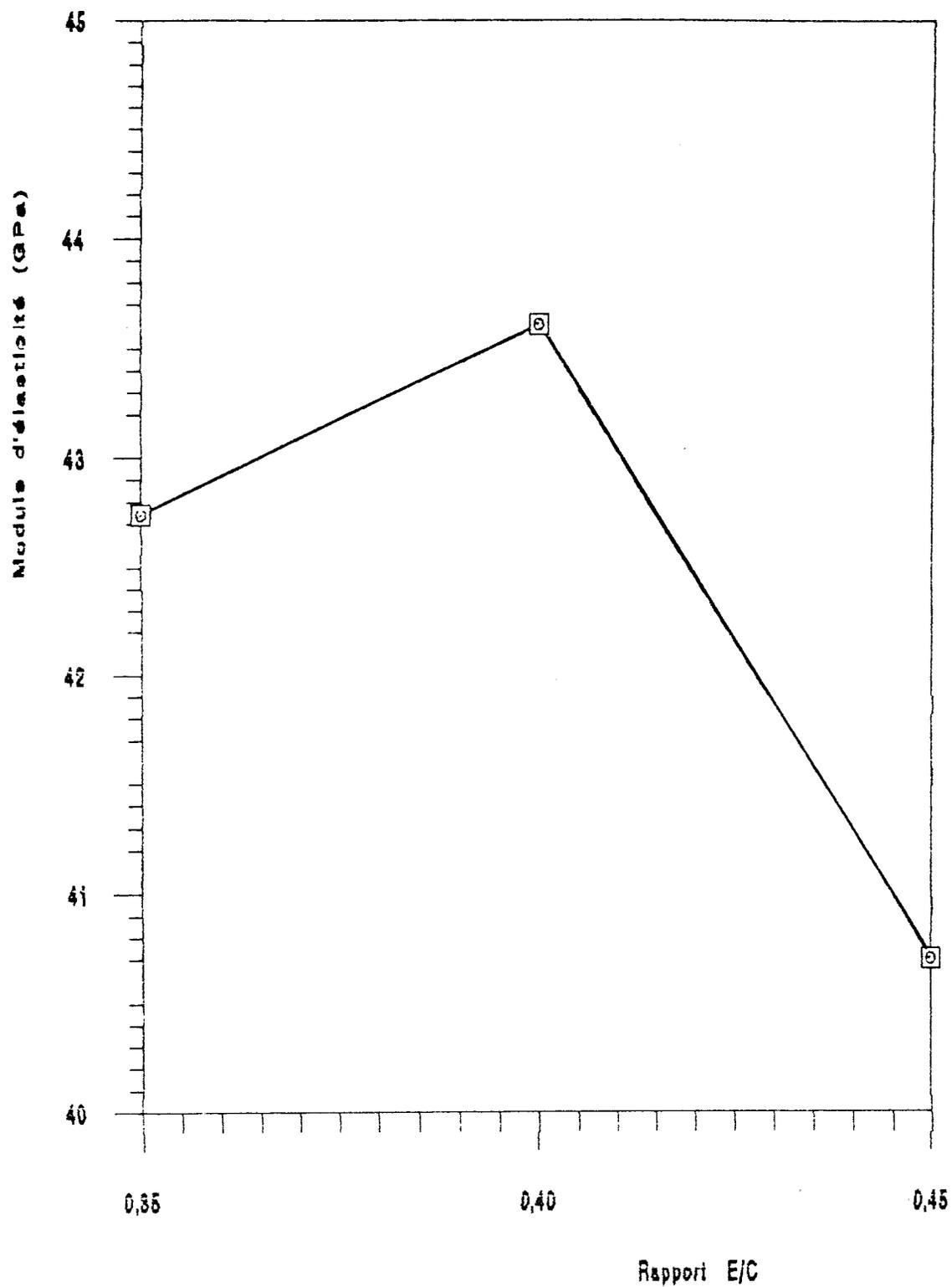


Fig.N°VI.7 : Relation du module d'élasticité en fonction du rapport E/C

Tableau n°VI.8 : Valeurs des modules d'élasticité des mélanges à rapport E/C variable :

Cod. Epr.	Rapport E/C	Contrainte ( $\sigma_c$ ) MPa	Module d'élasticité (M.E) GPa	Déformation ( $\Sigma$ ) $10^{-3}$
X24 26	0.45	39.0	40.70	0.958
X44 46	0.40	48.0	43.61	1.100
X64 60	0.35	45.2	42.74	1.058

### C.2.2- Interprétation :

Les résultats du tableau n°VI.7 nous montrent que le module d'élasticité décroît avec l'accroissement du dosage en déchet.

La valeur du module d'élasticité du mélange à 0.15 et 0.36 % en déchet est élevée par rapport à celle du mélange témoin (sans déchet).

Cependant le module d'élasticité du mélange à 0.58 et à 0.73 % est inférieur à celui du mélange témoin (sans déchet).

Le module d'élasticité dépend de la variation des résistances mécaniques autrement dit, il varie selon la compacité de la structure du béton .

Dans le tableau n°VI.8, le module d'élasticité croît puis décroît avec la diminution du rapport E/C, le module d'élasticité est maximal (c'est- à- dire M.E = 43.61 GPa) pour un rapport E/C égal à 0.40. Ceci s'explique que les mélanges au rapport E/C égal à 0.45 ; 0.40 et à 0.35 possèdent une ouvrabilité différente de l'un par rapport à l'autre. L'ouvrabilité optimum pour un minimum de porosité est pour le mélange à rapport E/C égal à 0.40 ce qui donne un module d'élasticité supérieur.

La figure n°VI.6 illustre la variation du module d'élasticité du béton avec et sans déchet à dosage variable, le module d'élasticité est élevé pour le dosage à 0.15 % de déchet.

La figure n°VI.7 illustre la relation du module d'élasticité en fonction de la réduction du rapport E/C. Le module d'élasticité est optimal pour un mélange à rapport E/C égal à 0.40.

**D- Modelisation mathématique de l'ouvrabilité des mélanges en fonction de la composition par la simulation mathématique des expériences.**

La recherche bibliographique [59] a permis de considérer les paramètres intervenant d'une manière déterminante sur l'ouvrabilité à savoir.

- 1)- Le dosage en eau
- 2)- Le dosage en ciment
- 3)- Le dosage en plastifiant (cas du déchet)

Notre objectif est de trouver une fonction de regression qui nous permet d'optimiser la composition du béton dont la forme de la fonction de regression est la suivante :

$$y_t = A_0 + A_1 x_1 + A_2 x_2 + \dots + A_{12} x_1 x_2 \dots$$

$y_t$  : propriété inconnue (dans notre cas c'est l'ouvrabilité).

$x_1, x_2, x_3$  : les valeurs des paramètres connus, (dans notre cas, ce sont respectivement le dosage en ciment, le dosage en eau, le dosage en déchet industriel).

Pour trouver les valeurs des coefficients  $A_0, A_1, A_2, \dots$  on peut utiliser la méthode des moindres carrés et résoudre dans ce cas, le système d'équation linéaire.

Pour faciliter le calcul, on fait le changement de variable :

$$X = k (x - x_m), \quad \text{ou } x : \text{valeur exacte de depense en matériau}$$

$$K = \frac{2}{x_{\max} - x_{\min}}$$

$$x_m \text{ (valeur moyenne)} = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$$

$x_{\max}, x_{\min}$  : depense maxi et mini en matériaux

Dans ce cas, les valeurs  $X_i$  peuvent varier de +1 à -1 si la valeur  $x_i$  varie dans un intervalle  $x_{\max}$  et  $x_{\min}$ .

Ainsi  $X_i = 0$ , si  $x_i = x_{\text{moyen}}$ , on aura donc l'équation suivante :

$$y_t = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 + A_{12} X_1 X_2 + A_{13} X_1 X_3 + A_{23} X_2 X_3$$

D'après cette méthode on peut déterminer les coefficients de l'équation à condition que  $(Y_t - Y_e)^2$  soit minimale.

$Y_t$  = valeur théorique

$Y_e$  = valeur expérimentale

Nous pouvons composer les équations pour déterminer les valeurs  $A_0, A_1, A_2, A_3, A_{12}, A_{13}, A_{23}$ .

$$- A_0n + A_1 \Sigma X_1 + A_2 \Sigma X_2 + A_3 \Sigma X_3 + A_{12} \Sigma X_1 X_2 + A_{13} \Sigma X_1 X_3 + A_{23} \Sigma X_2 X_3 = \Sigma Y_e$$

$$- A_0 \Sigma X_1 + A_1 \Sigma X_1^2 + A_2 \Sigma X_1 X_2 + A_3 \Sigma X_1 X_3 + A_{12} \Sigma X_1^2 X_2 + A_{13} \Sigma X_1^2 X_3 + A_{23} \Sigma X_1 X_2 X_3 = \Sigma X_1 Y_e$$

$$- A_0 \Sigma X_2 + A_1 \Sigma X_1 X_2 + A_2 \Sigma X_1 X_2^2 + A_3 \Sigma X_1 X_2 X_3 + A_{12} \Sigma X_1 X_2^2 + A_{13} \Sigma X_1 X_2 X_3 = \Sigma X_2 Y_e$$

$$- A_0 \Sigma X_3 + A_1 \Sigma X_1 X_3 + A_2 \Sigma X_2 X_3 + A_3 \Sigma X_2^3 + A_{12} \Sigma X_1 X_2 X_3 + A_{13} \Sigma X_1 X_2^3 + A_{23} \Sigma X_2 X_2^3 = \Sigma X_3 Y_e$$

$$- A_0 \Sigma X_1 X_2 + A_1 \Sigma X_1^2 X_2 + A_2 \Sigma X_1 X_2^2 + A_3 \Sigma X_1 X_2 X_3 + A_{12} X_1^2 X_2^2 + A_{13} \Sigma X_1^2 X_2 X_3 + A_{23} \Sigma X_1 X_2^2 X_3 = \Sigma X_1 X_2 Y_e$$

$$- A_0 \Sigma X_1 X_3 + A_1 \Sigma X_1^2 X_3 + A_2 \Sigma X_1 X_2 X_3 + A_3 \Sigma X_1 X_2^3 + A_{12} \Sigma X_1^2 X_2 X_3 + A_{13} \Sigma X_1^2 X_2^3 + A_{23} \Sigma X_1 X_2 X_2^3 = \Sigma X_1 X_3 Y_e$$

$$- A_0 \Sigma X_2 X_3 + A_1 X_1 X_2 X_3 + A_2 X_2^2 X_3 + A_3 \Sigma X_2 X_2^3 + A_{12} \Sigma X_1 X_2^2 X_3 + A_{13} \Sigma X_1 X_2 X_2^3 + A_{23} \Sigma X_2^2 X_2^3 = \Sigma X_2 X_3 Y_e$$

Tableau n°VI.9 : Planification des expériences pour déchet industriel (D.I).

N° d'exp.	Coef. De variable			Variable réelle			Ouv. (Y) (cm)
	X1	X2	X3	Cim. (x <sub>1</sub> ) (kg/m <sup>3</sup> )	Eau (x <sub>2</sub> ) (kg/m <sup>3</sup> )	DI (x <sub>3</sub> ) (l/m <sup>3</sup> )	
1	+1	+1	+1	450	192.5	0.70	24.0
2	+1	+1	-1	450	192.5	0.15	11.0
3	+1	-1	+1	450	157.5	0.70	10.0
4	+1	-1	-1	450	157.5	0.15	00.5
5	-1	+1	-1	350	192.5	0.70	25.0
6	-1	+1	-1	350	192.5	0.15	12.5
7	-1	-1	-1	350	157.5	0.70	23.0
8	-1	-1	-1	350	157.5	0.15	05.0

Sur la base de tableau de planification des expériences, On applique la loi  $2^n$  ou n représente le nombre de variable à planifier, dans notre cas n = 3. donc  $2^n = 8$ ; cela signifie qu'il faut réaliser 8 expériences.

Ainsi on peut voir que pour l'expérience simulé  $x_i = 0$  et  $x_i x_j = 0$ . donc nous pouvons tirer  $A_0 ; A_1, A_2, A_3, A_{12}, A_{13}, A_{23}$  selon les formules :

$$A_0 = Y_e \cdot 2^n$$

$$A_i = \Sigma Y_e \cdot x_i / \Sigma x_i^2, i = 1, 2, 3, \text{ etc...}$$

$$A_{ij} = \Sigma Y_e \cdot x_i \cdot x_j / \Sigma (x_i \cdot x_j)^2 \quad \text{ou} \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

$$j = 1, 2, 3, \dots \text{ si } i \neq j$$

Tableau n°. VI.10 : calcul de la fonction de regression :

N° exp.	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Ouvr. (Y <sub>e</sub> ) (cm)
1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	24.0
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	11.0
3	+1	-1	-1	-1	+1	-1	10.0
4	+1	-1	-1	-1	-1	-1	00.5
5	-1	-1	-1	-1	-1	-1	25.0
6	-1	-1	-1	-1	+1	-1	12.50
7	-1	-1	-1	+1	-1	-1	23.0
8	-1	-1	-1	+1	+1	+1	05.0

Si nous faisons la simulation d'expérience en intervalle +1 à -1, toutes les sommes de forme X<sub>i</sub><sup>2</sup> et (X<sub>i</sub>X<sub>j</sub>)<sup>2</sup> sont égales à n expérience, alors que les sommes de formes X<sub>i</sub> Y<sub>e</sub> sont égales à la somme algébrique des valeurs et X<sub>i</sub> X<sub>j</sub> Y<sub>e</sub> expérimentales, on peut déterminer les signes de cette somme d'après le tableau VI.5.2.

Résultats de calcul :

Dépendance ouvrabilité (AF au cône) = f(C, E, DI)

$$Y_T = 13,875 - 2.50 X_1 + 4.25 X_2 + 6.625 X_3 + 2.625 X_1X_2 - 1 X_1X_3 - 0.25X_2X_3$$

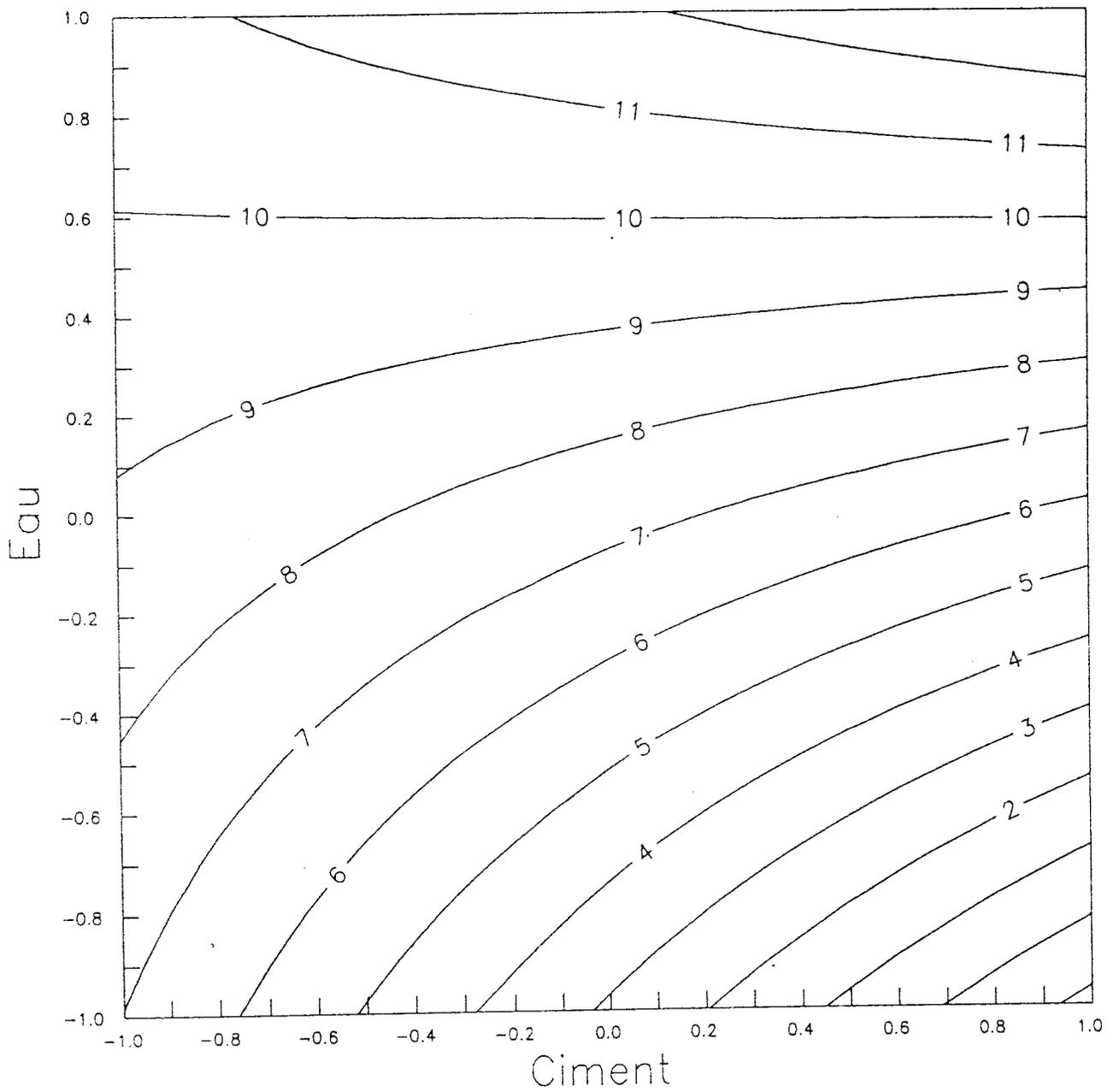


Fig.n°VI.8 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA FONCTION :

$$Y_t = 13.875 - 2.50 X_1 + 4.25 X_2 + 6.625 X_3 + 2.625 X_1 X_2 - X_1 X_3 - 0.25 X_2 X_3$$

Cas : DI minimum

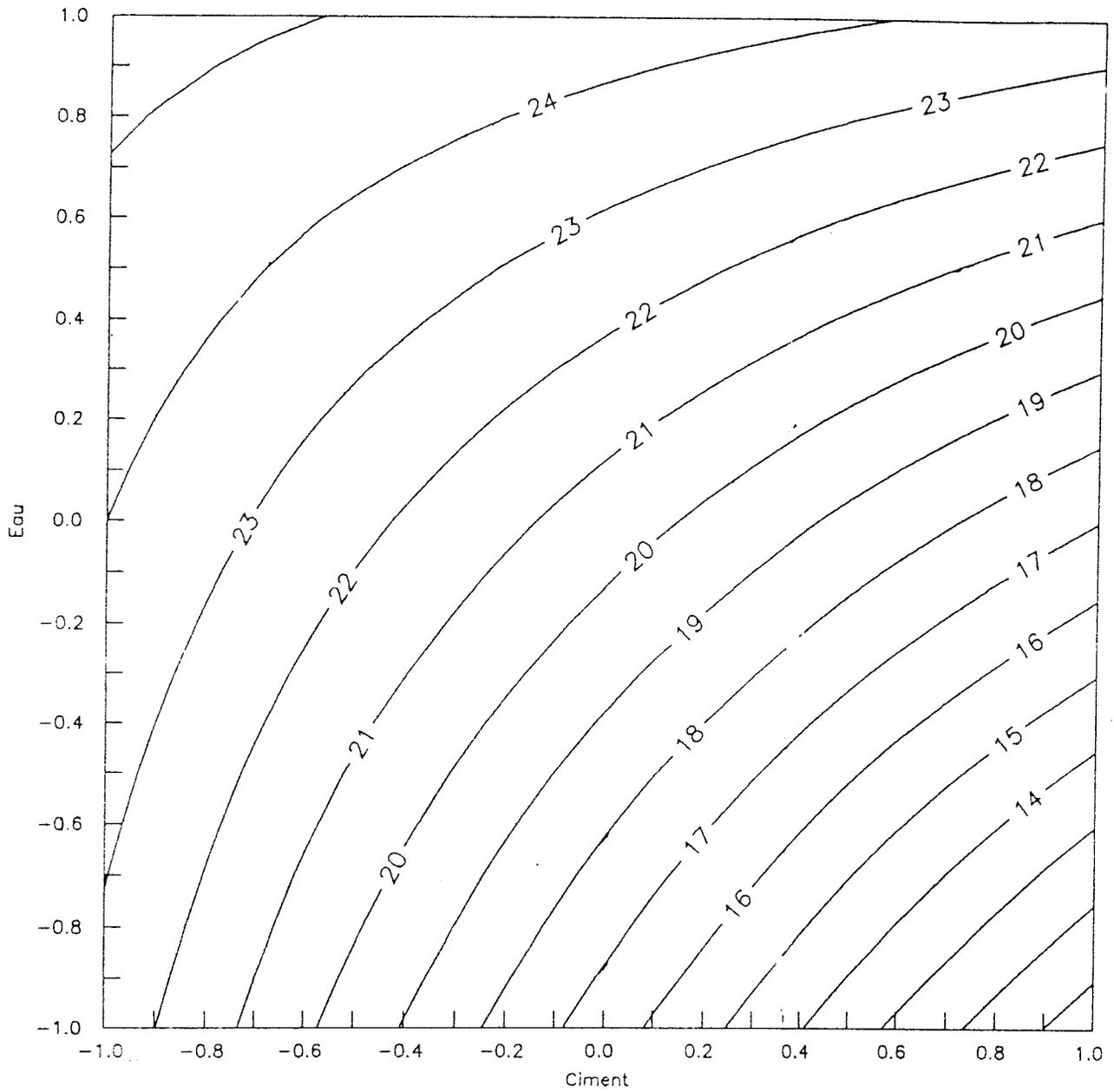


Fig.n°VI.9 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA FONCTION :

$$Y_t = 13.875 - 2.50 X_1 + 4.25 X_2 + 6.625 X_3 \\ + 2.625 X_1 X_2 - X_1 X_3 - 0.25 X_2 X_3$$

Cas : DI maximum

## E - Conclusion

Nous concluons à travers le présent chapitre, que l'accroissement du dosage en ciment dans le mélange du béton adjuvanté à 0.15 % du déchet engendre une augmentation d'ouvrabilité de 5.0 à 20.0 cm d'affaissement au cône d'Abrams et par conséquent une diminution de la résistance mécanique en compression de 422 à 360 kgf/cm<sup>2</sup> à l'âge de 28 jours.

En outre, l'accroissement du dosage en ciment accompagné d'une réduction d'eau de gâchage dans le but de minimiser la grandeur de l'ouvrabilité du mélange nous a conduit à une performance mécanique optimum de 480 kgf/cm<sup>2</sup>, soit une amélioration de 18.75 %. (C'est à dire le mélange x40 46 par rapport au mélange x20/26).

Et enfin, la présence du déchet dans le mélange du béton permet d'améliorer les variations dimensionnelles dues au phénomène de retrait et aussi les modules d'élasticité..

En conclusion finale nous avons déterminé une fonction de regression nous permettant de relier l'ouvrabilité du mélange au dosage en ciment, en eau et en déchet industriel. Cette fonction de regression se présente sous la forme :

$$y = 13.875 - 2.50 x_1 + 4.25 x_2 + 6.625 x_3 + 2.625 x_1 - x_1x_3 - 0.25 x_2x_3.$$

## **CHAPITRE N°VII**

### ***CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS***

## CONCLUSION GENERALE

Il est à noter que malgré les travaux de recherche menés à l'exemple de ceux de FREYSSINET pour vaincre la floculation en employant des puissants moyens mécaniques mais le phénomène de floculation des grains de ciments n'est pas complètement éliminé. Aujourd'hui la technique consiste à ajouter à l'eau de gâchage des additions ayant des molécules grosses et suffisamment ionisées (fluidifiants) pour augmenter la répulsion des grains et par conséquent empêcher la floculation.

La présente étude de recherche fait suite à cette technique et des conclusions peuvent être formulées au prorata des remarques signalées à chaque fin de chapitre à savoir :

- Les constituants du béton utilisés tels que le ciment, l'eau, le sable et les gravillons selon les essais de contrôle effectués présentent une bonne aptitude quant à leur emploi dans les bétons hydrauliques et ce conformément aux exigences normatives en vigueur (NFP 18 301).

- La formulation du béton témoin adoptée est calculée selon la méthode Georges DREUX basée sur la détermination de la courbe granulaire de référence, la résistance mécanique en compression à 28 jours obtenue est en adéquation à celle projetée.

- L'introduction du déchet dans le mélange entraîne une lubrification impressionnante du milieu. L'accroissement de son dosage provoque un gain d'ouvrabilité de 150 mm d'affaissement au cône ce qui signifie que le déchet est un superplastifiant à l'égard de la norme NFP 18 333.

- L'introduction du déchet améliore l'ouvrabilité et également la résistance mécanique, c'est à dire à 0.30 % de déchet, l'ouvrabilité augmente de 200 % et la résistance mécanique croît de 2.72 %, ce qui dénote que le déchet est un plastifiant vis à vis de la norme NFP 18 335.

- L'introduction du déchet dans le mélange fait également l'objet d'un réducteur d'eau puisque à ouvrabilité constante égale à 5.0 cm accompagnée d'une réduction d'eau de 18.18 %, la résistance mécanique augmente de 21.81 %. Ce déchet est qualifié d'un plastifiant réducteur d'eau et ce conformément à la norme NFP 18 336.

- L'accroissement du dosage en ciment de 350 à 550 kg/m<sup>3</sup> dans la composition du béton adjuvanté à 0.15 % de déchet permet une augmentation sensible de l'ouvrabilité de l'ordre 300 % et une perte des résistances mécanique de 14.70 %.

- Cependant, l'accroissement du dosage en ciment pour le même mélange, accompagné d'une diminution de rapport E/C provoque une nette amélioration de résistance mécanique et une augmentation moins sensible de l'ouvrabilité. Autrement dit, un dosage à 450 pour un E/C égal à 0.40 confère au mélange une résistance mécanique optimum de 480 kgf/cm<sup>2</sup>, soit un gain de 150 kgf/cm<sup>2</sup> équivalent à une et demie (1,5) classe de la qualité du béton.

- Un gain de ciment calculé sans compromettre à la résistance mécanique est d'environ 4.92 % soit 18.40 tonnes de ciment à gagner pour un coulage de 1000 m<sup>3</sup> de béton.

- L'incorporation du déchet dans le béton permet d'améliorer les variations dimensionnelles dues au phénomène de retrait et de gonflement. Cette diminution de retrait contribue à la réduction d'apparition des fissures dans des conditions de murissement surtout dans les pays chauds comme le notre.

- L'apport de ce déchet dans ses limites admissibles d'utilisation dans le mélange améliore le comportement élastique du matériau béton.

- Compte tenu de l'évolution de l'ouvrabilité par addition du dosage en déchet à chaque rapport E/C, la figure n°V.8 nous donne la possibilité de faire un choix d'une valeur d'ouvrabilité qui correspondra aux valeurs du dosage de déchet et du rapport E/C.

- La détermination de la fonction de régression nous a permis de réajuster les valeurs obtenues expérimentalement c'est à dire la variation de l'ouvrabilité en dépendance du dosage en ciment, en eau et en déchet pour des valeurs maximum et minimum.

- En définitive, par cette investigation d'approche technologique jugée bénéfique et satisfaisante quant à l'utilisation du déchet dans l'industrie du béton, il est évident de le récupérer, le traiter et le purifier pour le rendre disponible dans le marché et qui pourrait faire l'objet de la poursuite du travail.

En terme final, des questions restent pour de nombreux chercheurs sans réponses définitives à savoir.

La forme et l'état sous laquelle les molécules du superplastifiant ( dans notre cas le déchet industriel) se fixent sur la pâte de ciment hydraté. Sont-elles piégées dans les silicates hydratés ou dans les produits d'hydratations des aluminates. Sont-elles sous la forme originale ou sont-elles décomposées.

Cependant cela ne doit pas empêcher les producteurs du béton d'utiliser ces molécules qui ont jusqu'à maintenant donné entière satisfaction. L'étude de recherche des adjuvants est une clé essentielle pour la science de l'hydratation du ciment, et aussi pour toutes les qualités rhéologiques, physico-chimiques et mécaniques du béton, ils sont pour la conservation de son armature, ils sont aussi des remarquables catalyseurs du progrès du béton, du béton armé et béton précontraint.

## PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

1)- A travers les résultats obtenus, nous recommandons que la formulation du béton optimum ( RC moy = 480 ; C = 450 ; AC = 5.0 ; E/C = 0.40 ; DI = 0.15 %) puisse être adaptée au béton précontraint et la formulation améliorée ( RC moy = 422 ; C= 350 ; AC = 5.0 E/C = 0.45 ; DI = 0.15 %) pourrait être destinée pour béton de l'ossature des bâtiments d'habitation, industriels, scolaires et sanitaires.

2)- Il est indispensable de projeter une étude de recherche ayant pour objet l'introduction d'une poudre de pouzzolane, calcaire, cendre volante ou autre au béton adjuvanté en DI pour l'obtention d'un béton de haute performance et pourquoi pas de très haute performance à partir des matériaux purement locaux.

3)- Il est aussi intéressant de prévoir une étude de durabilité du béton adjuvanté en déchet industriel dans un environnement agressif non seulement par le fait de la diminution du rapport E/C qui résulte d'une meilleure compacité et par conséquent d'une meilleure durabilité mais d'observer l'état de freinage d'attaque chimique sur les composés hydratés du ciment déjà enveloppés partiellement par des molécules d'un tensio-actif.

4)- Il est aussi nécessaire d'élaborer une étude de comportement de corrosion des armatures dans un béton armé et béton précontraint en présence de ce déchet industriel.

5)- Compte tenu des résultats obtenus dans cette étude de recherche et d'investigation quant à l'utilisation jugée satisfaisante de ce déchet industriel dans l'industrie du béton, il est urgent de penser à sa valorisation et de créer des moyens nécessaires à sa récupération.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] - Extrait - CIMBETON - Fiches techniques chapitre V . paragraphe B1 (bétons) .  
Edité par : centre d'information de l'industrie cimentière 75008 PARIS 14 / 1989.
- [2] - DEVIS TREMBLAY - Béton et ciment. Année 1983 pages 9 - 27
- [3] - A. KOMAR - Matériaux et éléments de construction Traduction française -  
Ed. MIR, MOSCOU 1989 pages 174 - 230
- [4] - Norme AFNOR (NFP 18010) - Classification des bétons hydrauliques  
Année Décembre 1985
- [5] - VENUAT M - " Adjuvant et traitement des mortiers et bétons"  
1er Ed. VENUAT, PARIS 1971 pages 40 - 45
- [6] - Béton hydraulique - Connaissance et pratique J.A BARON et R. SAUTEREY  
Ed. Presse de l'école National Ponts et chaussées PARIS 1982 pages 59 - 142
- [7] - Norme AFNOR ( NFP18 303 ) Eau de gachage pour béton et construction  
Spécifications - Année Mai 1941
- [8] - Norme AFNOR NFP18 101 - Décembre 1990 Granulats - vocabulaire -  
définitions et classification
- [9] - CILF - Comité I de la langue Française "Vocabulaire du béton " EYROLLES PARIS 1976
- [10] - Séminaire sur la qualité granulats organisé par C.T.T.P (centre technique des travaux  
publics) avec la collaboration de ENPC (école nationale des ponts et chaussées)  
à Alger le 24/25 février 1990
- [11] - Norme AFNOR NFP 18 103 - Décembre 1989 ADJUVANT POUR BETON  
DEFINITION CLASSIFICATION ET MARQUAGE
- [12] - Symposium International sur : les adjuvants du béton et amélioration des propriétés.  
Barcelone (ESPAGNE) mai 14/17 1990 Organisé par comité technique RILEM TC 84  
HAC
- [13] - Annale de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics JUIN 1953 N° 66  
Séance du 17/02/1953 par M. DURIEZ
- [14] - IVANOV F. Adjuvant des bétons et perspectives d'utilisation des superplastifiants  
MOSCOU 1975 (RUSSE).

- [15] - A. C. I. Fall convention REVIEW Journal Américain concrete Institut 1974
- [16] - DEPKE F. ZIR KUNGSWEISE UND ANWZENDUNG von béton VERFLUSSIGERN  
Béton ZORK + Fer Teil technike 1975 (en ALLEMAND)
- [17] - Norme AFNOR (NFP18103) définition, classification et marquage
- [18] - Dossier Technique de la société Algérienne (GRANITEX)  
BP N°85 OUED SMAR 16.270
- [19] - MICHEL - VENUAT La pratique des ciments et des bétons Ed. Moniteur 1976
- [20] - ALBERT Joisel - Les retraits du béton Ed. STAR 1965
- [21] - P.C KREIJGER - Plasticizers and dispersing admixtures, concrete International 1980  
The construction press - LONDRES.
- [22] - R.C MIELENZ - USE of surface active agent in concret - 1968
- [23] - M. PEINADO - Mécanisme d'action des additifs pour ciments Collogue de l'association de  
recherche sur les techniques de forage et de production JUIN 1965
- [24] - F.M - ERNSBERGER, W. G. FRANCE Portland cement dispersion by adsorption of  
calcium lignosulfonate Industrial and Engeneering chimistry 1945
- [25] - V. M - MOSKVIN ; V. G. BARKOV INCREASE IN CONCRETE DURABILITY BY  
ADDITION OF SILICONES
- [26] - ALBERT Joisel - Les adjuvants du ciment - Edité par l'Auteur année 1973 pages 53 - 56
- [27] - M. KHEGHOROVITCH V. BAYNER - Les adjuvants plastifiants hydrophobe pour  
ciments, mortiers et bétons Année 1979 (RUSSE). Pages 181 - 188
- [28] - V. RATINOV, B. ROZENBERG -Adjuvants des bétons MOSCOU 1973
- [29] - F.V SHESTOPEROV, FM - IVANOV, ZASACHETIN AN, T. yu LYUBINOVA " Les  
bétons de ciment avec plastifiants" MOSCOU 1952
- [30] - V. N. YUNG, TRINKER B.D "Les adhuants tensio-actifs et les électrolyts dans les  
bétons" MOSCOU 1960
- [31] - Y. MALLIER Les bétons à hautes performances du matériau à l'ouvrage  
Edite par presse - Ecole National des ponts et chaussés 1990
- [32] - I.A PERAL The CHEMISTRY of lignin - MARCEL DEKKER  
INC NEW - YORK 1967

- [33] - G. DREUX - Nouveau guide du béton Ed. EYROLLES 1985. Pages 100 - 150
- [34] - T.C POZERS, The properties of fresh concrete John Wiley 1968
- [35] - V. VOROBIEV - Matériaux de construction. Ed. MIR - MOSCOU 1967. Pages 5 - 30
- [36] - D. NECTOUX - Support de conférence physico-chimie des ciments et des structures durcies. Ed. Ecole des mines d'ALES (FRANCE) 1993
- [37] - Réunion d'ingénieurs - Matériaux de construction  
Ed. EYROLLES PARIS 1972. Pages 144 - 162 ; 213 - 323
- [38] - F. GORISSE - G. DREUX - Construction à l'étude du fluage et de retour de fluage  
Annales de l'ITBTP N°377 PARIS 1979
- [39] - Revue Technique "construction sur la qualité et la durabilité du béton"  
Revue Scientifique : ciments et chaux N° 771 octobre 1986
- [40] - Annales de l'ITBTP (institut technique de bâtiment et travaux publics).  
N°413 -mars - avril 1983 serie Matériaux
- [41] - KISSELEV Aide mémoire liant hydraulique MOSCOU 1980
- [42] - H. KUHL Intern. Verb. Mater Kougr. LONDON 1937 SEITE 269
- [43] - LITVAN G. Phase transition Of adsorbates, mécanism of frost action in hardered cement  
Past J. Amer ceram. soc 1972
- [44] - V. KAMKOV. Cours théorique : mécanique des matériaux.  
Professeur INMC BOUMERDES
- [45] - G.J. VERBECK, R.H HELMUTH. Structure and physical properties of cement  
Past - TOKYO 1968
- [46] - Annales de l'ITBTP (institut technique bâtiment et travaux publics)  
N° 370 mars 1979 serie bétons
- [47]- VANDERIZANDEN - Fluide concrete (superplasticized concrete) J. P. A. J
- [48] - V. M MOLHOTRA Superplasticizers in concrete Poy mineral sciences laboratories  
CANADA 1978.
- [49] - R. C. MIELENZ - Use of surface active agents in concrete (1968)

- [50] - Annales de l'ITBTP (Institut technique du bâtiment et travaux publics)  
N° 66 serie Béton . France
- [51] - M. DURIEZ . J. ARAMBIDE, "Nouveau traite des matériaux de construction"  
Ed. DUNOD 1962. France
- [52] - VAN WALLENDael - Etude des fluidifiants et entraîneur d'air  
CRIC, RR -9-F 1965
- [53] - RILEM - ABEM " Colloque international sur les adjuvants des mortiers et bétons"  
BRUXELLES (30 août, 1er septembre 1967).
- [54] - J. CALLEJA - Influencia de los aditivos aceleradores para hormigon en distintos aspectos  
del fragado del cemento cemento - Hormigon, MAR. 1968
- [55] - A. JOISEL - Les fissures du ciments ; causes et remèdes. Ed. STAR 1961
- [56] - B.B HOPE - A.M. NEVILLE - A. GURUSAMI  
Influence of admixtures on creep of concret containing normal weight aggregate 1967
- [57] - Revue technique construire - Revue du bâtiment, travaux publics et hydrauliques  
Ed. CNAT N° 46 - 1993
- [58] - DE LARRARD F. - ACKER P. - ATTOLLOU A. - MALIER Y. fluage des bétons à très  
haute performance congrés AIPC HELSINKI Juin 1988.
- [59] - D. DUGAVE - M. GIVault. Analyse de variance et plans d'expérience.  
Ed. DUNOD 1969 - France.
- [60] - M. DEBIANE. Valorisation de la lignine dans le broyage du clinker, Etude de son influence  
sur les propriétés des pâtes de ciment. Thèse Magister INMC 1996.

**EN ANNEXE**

## METHODES DE CALCUL DE COMPOSITION DU BETON

Depuis ces dernières années, deux (02) nouvelles méthodes de composition de bétons hydrauliques sont apparues. Ces deux méthodes élaborées en 1967 / 68, font en quelques sortes la synthèse des recherches établies.

- La première, dûe à G. DREUX, est une synthèse des méthodes basées sur la connaissance préalable d'une courbe granulométrique de référence telle que les méthodes d'ABRAMS, de BOLOMEY, de CAQUOT (1936) de JOISEL (1952) et FAURY (1958).

- La seconde, dûe à J. BARON et R. LESAGE est une méthode expérimentale. Elle fait suite aux travaux de FERET (1892-96), DURIEZ, BUISSON, VALLETTE (1963), etc....

Le But recherché pourrait être le même mais sous des formulations diverses. Selon CAQUOT (en 1936), il est souhaitable de trouver une composition de matériaux inerte telle que pour un dosage donné en ciment, la quantité des vides sont minimale.

### I- Méthode de calcul selon G. DREUX :

#### 1- Données de base :

##### 1.1- Nature de l'ouvrage :

La connaissance de la nature de l'ouvrage est nécessaire : ouvrage massif ou au contraire élancé et de faible épaisseur : faiblement ou très ferrillé. Il sera nécessaire de connaître l'épaisseur minimale et les dispositions des armatures dans les zones les plus ferrillées : distance minimale entre elles et couvertures par rapport au coffrage.

##### 1.2- Résistance souhaitée :

On demandera, en général, une résistance nominale  $\sigma'_{n}$  compression à 28 jours et compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique, il faudra viser une résistance moyenne à 28 jours :

$$\sigma'_{28} = \sigma'_{n} + 15 \%$$

### 1.3- Ouvrabilité désirée :

Elle est en fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massif ou plus ou moins ferrillé), de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc..., elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par affaissement au cône comme indiqué suivant le tableau.

Plasticité	Serrage	Affaissement A. en cm	Nombre de chocs test C.E.S
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	> 60
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	30 à 50
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	15 à 25
Béton mou	Piquage	10 à 13	10 à 15
Béton liquide	leger piquage	≥ 14	< 10

### 1.4)- Dimension maximale des granulats :

La dimension maximale ( $D_{max}$ ) est choisie suivant les spécificités de l'ouvrage à bâtir.

Le tableau suivant montre les règles à suivre, en général ces valeurs sont valables pour une granularité continue, tandisque pour une granularité discontinue, ces valeurs devront être diminuer de 20 % environ.

Caractéristiques de la pièce à béton	Dimension (D) des granulats	
	Roulés	Concassés
e - espacement entre armatures horizontales	$D \leq e$	$D \leq 0.9 e$
c - couverture entre armatures et coffrages	$D \leq 0.8 c$	$D \leq 0.7 c$
r - Rayon moyen des mailles de ferrailage	$D \leq 1.85 r$	$D \leq 1.65 r$
r' - Rayon moyen de moule (volume à remplir de béton par rapport à la surface totale des parois et armatures)	$D \leq 1.2 r'$	$D \leq r'$
hm = épaisseur minimale	$D \leq 0,25 hm$	

## 2- Dosage en ciment :

On commencera par évaluer approximativement le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée  $\sigma'_{28}$ .

$$\sigma'_{28} = G \cdot \sigma'c \ (C/E - 0.5) \Rightarrow C/E = \frac{\sigma'_{28}}{G \cdot \sigma'c} + 0.5$$

Avec  $\sigma'_{28}$  = Résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en bars

$\sigma'c$  = Classe vraie du ciment (à 28 jours) en bars

C = Dosage en ciment (e, kg/m<sup>3</sup>)

E = Dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour 1 ml)

G = Coefficient granulaire.

Valeurs du coefficient granulaire (G) :

Qualité des granulats	Dimension (D) des granulats		
	Fins (D ≤ 16 mm)	Moyens (25 ≤ D ≤ 40 mm)	Gros (D ≥ 63 mm)
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Tableau n°1 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.

Ces valeurs supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).

Il ne suffit pas alors, connaissant C/E, de fixer arbitrairement le dosage en ciment et d'en déduire le dosage en eau E; en effet en choisissant par exemple un faible dosage en ciment, on trouvera un dosage en eau faible ; on risquera alors d'obtenir un béton trop sec (et vice-versa).

Le dosage en ciment est donc fonction de C/E mais également du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. L'abaque de la figure n°1 permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée au problème.

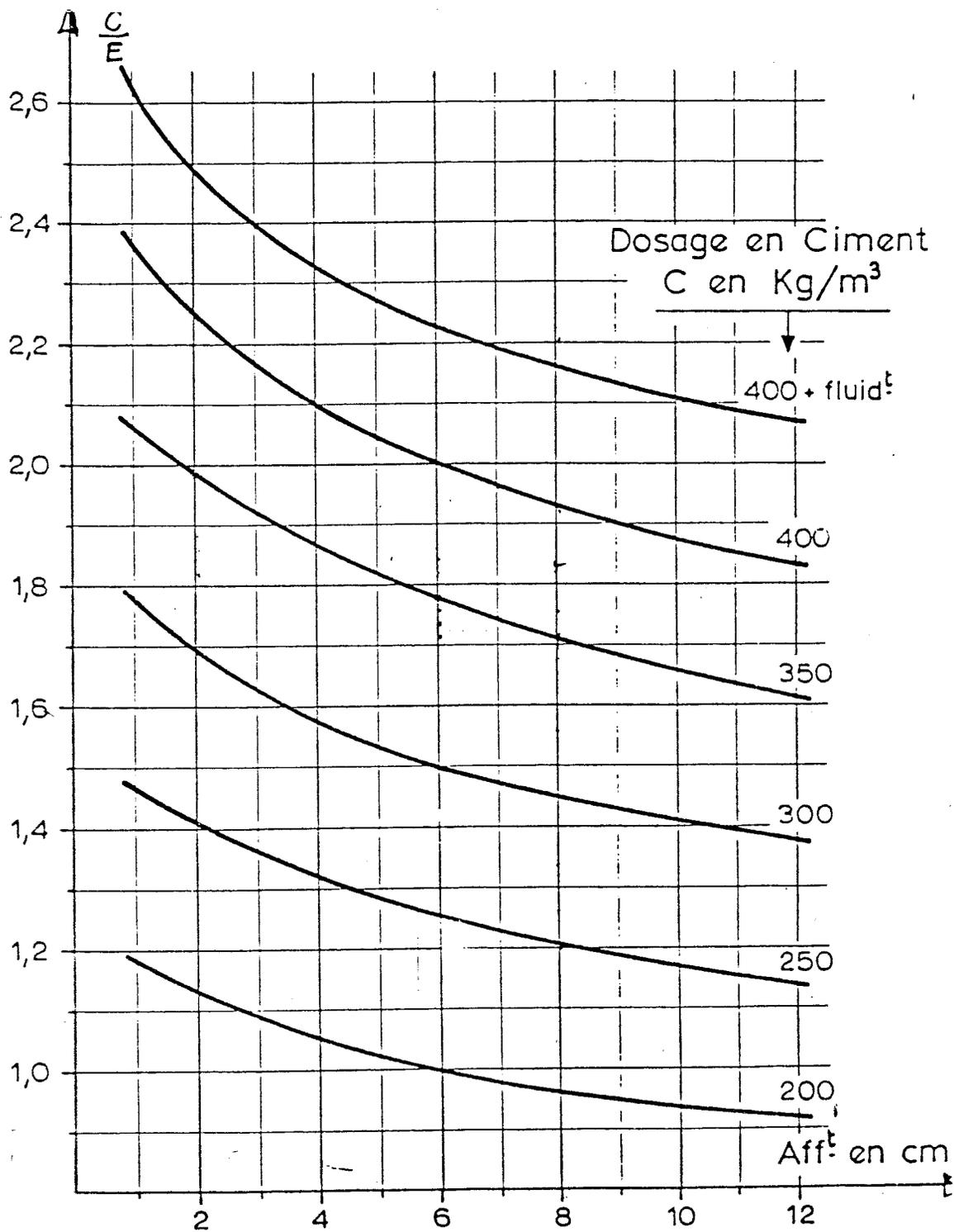


Figure n°01 : un abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).

### 3)- Dosage en Eau :

Ayant fait choix du dosage en ciment  $C$ , on déduit alors le dosage approximatif en eau totale à prévoir (provisoirement) et qu'il conviendra bien entendu d'ajuster ultérieurement par quelques essais de plasticité et d'ouvrabilité.

L'abaque de la figure n°02 donne l'allure générale de la variation du dosage en eau en fonction de l'affaissement au cône et du test d'ouvrabilité C.E.S. Il ne s'agit bien entendu que d'ordre de grandeur pour des bétons courants et permettant de dégrossir rapidement une formule de composition mais comme pour tous les facteurs de cette composition c'est à notre avis par des essais sur éprouvettes que les divers éléments constitutifs, et l'eau tout particulièrement, peuvent être définitivement dosés.

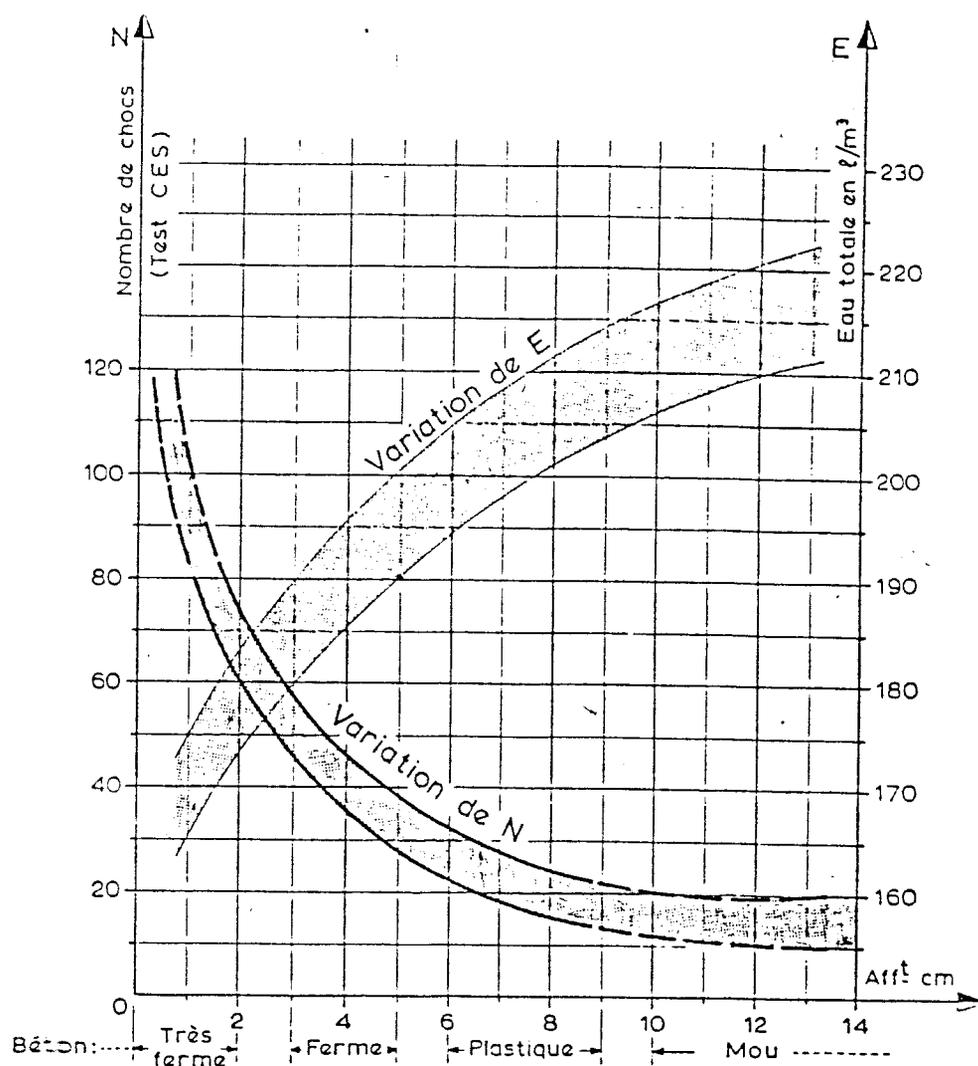


Figure n°02 : Variations relatives moyennes du dosage en eau  $E$  et du nombre de chocs du test d'ouvrabilité C.E.S. en fonction de l'affaissement, dans le cas des bétons composés suivant la présente méthode (le dosage en sable augmente quand le dosage en ciment diminue).

### Correction du dosage en eau totale en fonction de D :

Les données précédentes sont plus particulièrement applicables aux bétons pour lesquelles la dimension maximale des granulats est d'environ  $D = 25$  mm (dimension la plus courante). Si l'on a  $D < 25$  mm la surface spécifique des granulats augmente et, à plasticité équivalente, il faudra légèrement majorer le dosage en eau, et vice-versa.

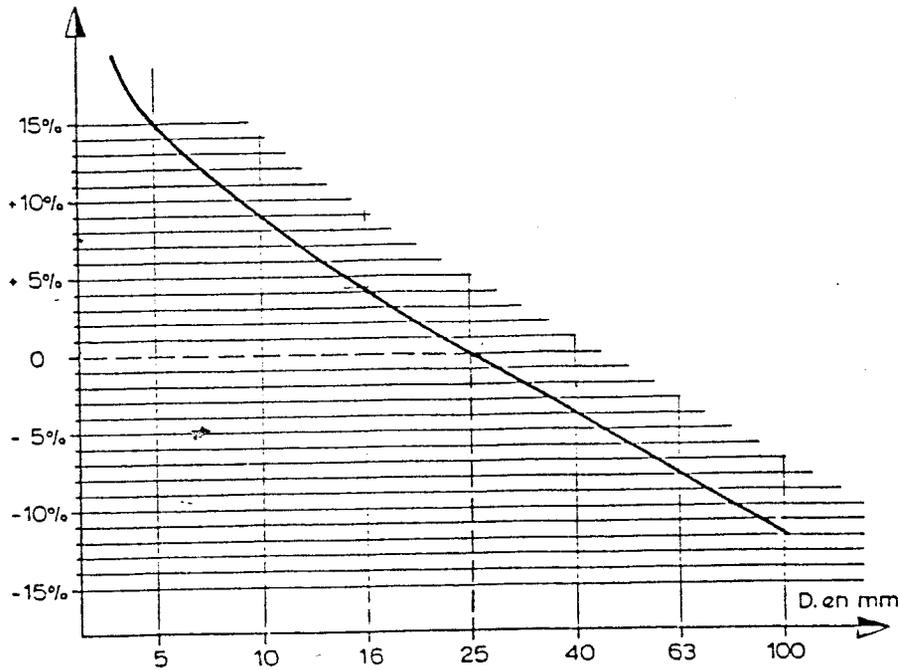


Figure n°03 : variation de la correction à apporter au dosage en eau.

La correction sur le dosage en eau correspondant à  $D = 25$  mm peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du tableau n°02 en fonction de D.

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

Tableau n°02 : correction en % sur le dosage en eau (figure 02 ) en fonction de la dimension maximale D des granulats ( si  $D \neq 25$  mm).

Le graphique de la figure 03 donne l'allure générale de cette correction.

### Dosage en eau réel :

La quantité d'eau totale (sur matériaux supposés secs) étant ainsi approximativement déterminée, la quantité d'eau à ajouter réellement dans la bétonnière s'obtient, déduction faite de l'eau d'apport contenue éventuellement dans les granulats.

Le tableau suivant donne à défaut des mesures réelles précises des indications approximatives de cette teneur en eau.

Tableau n°03 : teneur approximative en eau des granulats courants (litres/m<sup>3</sup> du volume apparent).

Apparences	Eau d'apport (litres/m <sup>3</sup> )			
	Sable (0/5)	Gravillon (6.3 - 16)	Gravier (6.3 - 25)	gravier (20 - 40)
Sèche	0 à 20	négligeable	négligeable	négligeable
Humide	40 à 60	20 à 40	10 à 30	10 à 20
Très humide	80 + 100	40 à 60	30 à 50	20 à 40
saturée et égouttée	120 + 140	60 à 80	50 à 70	40 à 60

On constate ainsi des énormes variations de l'eau d'apport des granulats. Il ne s'agit pas ici d'une simple correction plus ou moins négligeable, c'est là, une des difficultés principales du chantier. Il faut y apporter les soins que la qualité recherchée demande.

#### 4)- Qualité des granulats :

Les granulats doivent être de bonne qualité minéralogique, suffisamment durs et propres. Mais leur granularité a une influence relativement moins importante que celle du sable.

Le sable a une influence prépondérante, la propriété sera vérifiée par l'essai d'équivalent de sable (E.S).

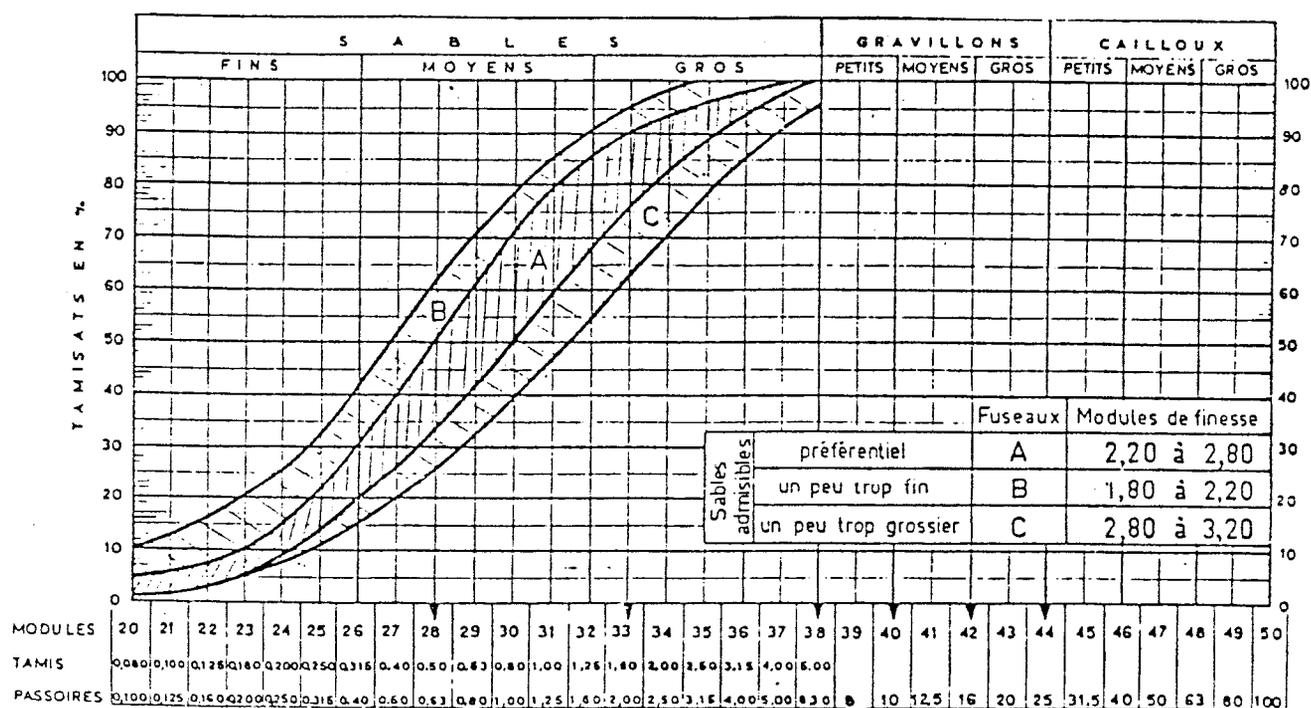
Tableau n°04 : valeurs préconisées par l'E.S

ES à vue	ES piston	Nature et qualité du sable
ES < 65	ES < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65 ≤ ES < 75	60 ≤ ES < 70	Sable légèrement argileux : de propreté admissible pour bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
75 ≤ ES < 85	70 ≤ ES < 80	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuse convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité valeur optimale ES à piston = 75, ES à vue = 80.
ES ≥ 85	ES ≥ 80	Le sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.
Le C.P.C. (fascicule 65) du Ministère de l'Équipement préconise les valeurs suivantes :		
Qualité du béton		ES à vue minimum
Béton courant		70
Béton courant de résistance relativement élevée, béton de qualité		75
Béton de qualité à haute résistance béton exceptionnel.		80

Le module de finesse  $M_f$  sera calculé comme la somme des refus sur le tamis 23, 26, 29, 35 et 38, les valeurs souhaitables doivent être comprises entre 2,2 et 2,8.

La courbe granulométrique du sable sera comparée au fuseau optimale donné à la figure suivante. On apportera, si nécessaire une correction par l'ajout (soit sable fin ou gros selon le besoin).

Figure n°04 : Fuseaux proposés pour la granularité des sables à béton 0/5 mm.



**Correction éventuelle du module de finesse du sable :**

On pourra utiliser la règle d'ABRAMS : supposons par exemple que l'on dispose d'un sable S<sub>1</sub> de module de finesse trop fort Mf<sub>1</sub> et que l'on désire y ajouter un sable fin S<sub>2</sub> de module de finesse Mf<sub>2</sub> afin d'obtenir un mélange dont le module de finesse serait Mf, les proportions des 2 sables composant devront être les suivantes :

$$\text{Proportion du sable } S_1 = \frac{Mf - Mf_2}{Mf_1 - Mf_2}$$

$$\text{Proportion du sable } S_2 = \frac{Mf_1 - Mf}{Mf_1 - Mf_2}$$

### Tracé de la courbe granulaire de référence :

Sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR (linéaire en module et logarithmique en dimension des granulats) on trace une composition granulaire de référence O A B (Figure 4) : le point B ( l'ordonnée 100%) correspond à la dimension D du plus gros granulat et le point de brisure A a des coordonnées ainsi définies :

En abscisse :

Si  $D \leq 25$  mm l'abscisse est  $D/2$

Si  $D > 25$  mm l'abscisse est située au milieu du segment limité par le module 38 (5 mm tamis) et le module correspondant à D.

En ordonnée :

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

K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (et c'est surtout le sable dont l'influence est ici prépondérante) et également du module de finesse du sable.

Tableau n°05 : Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats, et permettant de calculer Y ordonnée du point de brisure de la courbe de référence ( $Y = 50 - \sqrt{D} + K$ ).

Vibration		Faible		normale		puissante		
		roulé	concassé	roulé	concassé	roulé	concassé	
Forme des granulats (du sable en particulier)	Dosage en ciment	400 + Fluidi.	-2	0	-4	-2	-6	-4
		400	0	+2	-2	0	-4	-2
		350	+2	+4	0	+2	-2	0
		300	+4	+6	+2	+4	0	+2
		250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
		200	+8	+10	+6	+8	+4	+6
<p><b>Nota 1 :</b> Correction supplémentaire Ks ; Si le module de finesse du sable est fort (sable grossier) une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice-versa . La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur <math>K_s = 6 M_f - 15</math> (<math>M_f</math> étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2.5 pour laquelle la correction préconisée est alors nulle).</p> <p><b>Nota 2 :</b> Correction supplémentaire Kp : Si la qualité du béton est précisée "pompable" il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité "courante". On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur <math>K_p = +5</math> à <math>+10</math> environ, selon le degré de plasticité désiré.</p>								

Coefficient de compacité :

Le coefficient  $\gamma$  a été défini :

C'est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un mètre cube de béton frais en oeuvre. On choisira une valeur approximative de  $\gamma$  dans le tableau correspondant ci-après. Les valeurs de  $\gamma$  varient de 0,750 pour des micros bétons de consistance molle mis en place par simple piquage à 0,855 pour des bétons de cailloux de consistance ferme et bien vibrés ;  $\gamma = 0,820$  est une valeur moyenne approximative qui peut être prise en générale pour des bétons courants (D de 16 à 40 mm) et sous réserve d'une vérification par mesure de densité du béton frais.

Figure n°05 : variation du coefficient de compacité  $\gamma$  en fonction de la grosseur maximale des granulats, de la consistance et de l'efficacité des moyens de serrage et pour des granulats roulés.

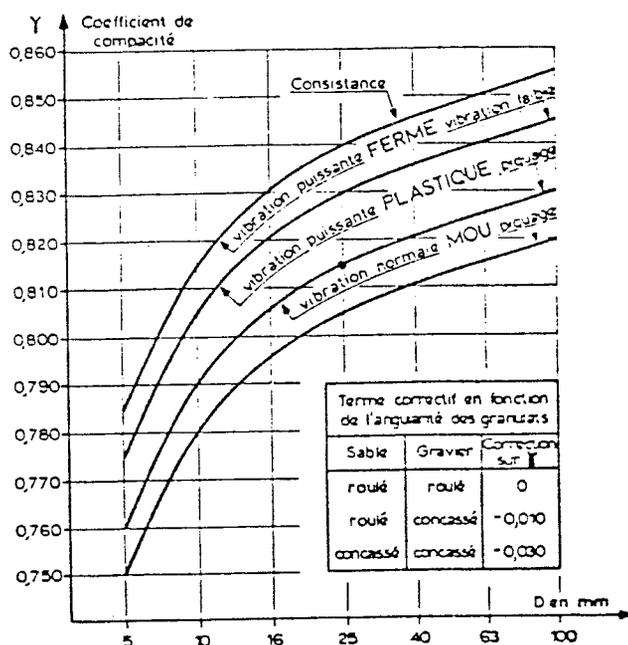


Tableau n°05 : Valeurs du coefficient de compacité  $\gamma$  :

Consistance	Serrage	$\gamma$ coefficient de compacité						
		D = 5	D = 10	D = 16	D = 25	D = 40	D = 63	D = 100
Molle	piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
5 - 9 plast-	piquage	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	vibration normale	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
-	vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
0 - 5 ferme	vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	vibration normale	0.780	0.810	0.825	0.815	0.840	0.845	0.850
	vibration puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855
très ferme								

Nota - Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- Sable roulé et gravier concassé = - 0.01
- Sable et gravier concassé = - 0.03

- Pour les granulats légers, on pourra diminuer de 0.03 les valeurs de  $\gamma$  qui correspondent ici à des granulats denses ordinaires.

### 5)- Dosage des granulats :

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun en joignant le point à 95 % de la courbe granulaire du premier, au point à 5 % de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite.

On lira 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  $g_1, g_2, g_3$  par exemple. Si  $C$  est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :

$$C_1 = \frac{C}{3.1}$$

(En admettant une masse spécifique de 3.1 pour les grains de ciment, valeur moyenne habituellement admise).

On choisira dans le tableau n°5 une valeur convenable du coefficient de compacité  $\gamma$  en fonction de D, de la consistance et de l'efficacité du serrage.

$$V = 1000 \gamma - C_1$$

Si  $g_1, g_2, g_3$  sont les pourcentages en volume absolu des granulats.

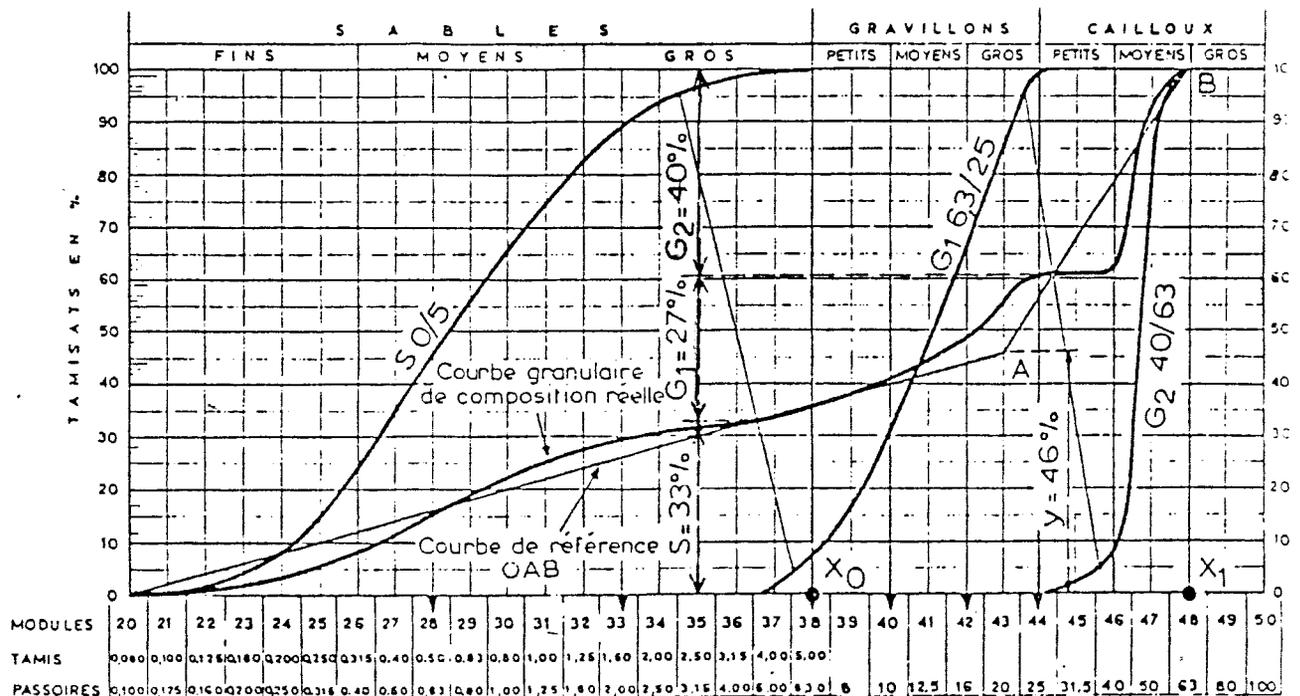
Les volumes absolus de chacun des granulats sont par suite :

$$\begin{aligned} V_1 &= g_1 V \\ V_2 &= g_2 V \\ V_3 &= g_3 V \end{aligned}$$

Si les masses spécifiques de chacun de ces granulats sont  $\varpi_1, \varpi_2$  et  $\varpi_3$  les masses de chacun d'eux seont :

$$\begin{aligned} P_1 &= V_1 \varpi_1 \\ P_2 &= V_2 \varpi_2 \\ P_3 &= V_3 \varpi_3 \end{aligned}$$

Figure n°06 : - Exemple d'étude de la composition granulats d'un béton ternaire discontinu  
 $D = 63 \text{ mm}$ .



Il est bien évident qu'une fois déterminée cette composition, elle devra ainsi qu'il a été souligné, être soumise à l'expérimentation afin d'offrir les dosages indiqués.

#### 6)- Correction et ajustement du dosage :

Si les résistances mécaniques sont insuffisantes on peut :

- Soit augmenter le dosage en ciment, diminuer le dosage en eau, mais il faut généralement faire appel à un fluidifiant.
- Soit diminuer le dosage en éléments fins du sable mais, comme précédemment on diminue l'ouvrabilité,
- Soit augmenter le rapport gravier/sable : il suffit d'abaisser le point A de la courbe de référence.

Si l'ouvrabilité est insuffisante on peut :

- Soit ajouter un sable (ou faire appel à un adjuvant plastifiant),
- Soit augmenter le dosage en eau (mais on risque des chutes de résistance),
- Soit augmenter le dosage des éléments fins au détriment des plus gros ; il suffit de relever le point A de la courbe de référence.

Pour ajuster la formule au  $m^3$ , on pèse plusieurs éprouvettes de béton frais en oeuvre. Soit  $\Delta$  la densité réelle ainsi mesurée. Si  $\Delta_0$  est la densité théorique, la correction  $x$  à apporter sur la masse totale des granulats est :

$$x = \pm 1\,000 (\Delta - \Delta_0) \text{ kg}$$

Suivant que  $\Delta$  est plus grand ou plus petit que  $\Delta_0$

Sur la masse de chacun des granulats, la correction à apporter est :

$$\pm XP_1/G, \quad \pm P_2/G, \quad \text{etc...}$$

Avec  $P_1, P_2, \text{etc.}$  ...Masses déterminées précédemment,  $G$  : masse totale des granulats.

## II)- Méthode de BARON - LESAGE :

Cette méthode est expérimentale. Elle fait suite aux travaux de FERET, DURIEZ, BUISSON, VALETTE....

Elle a pour objet d'obtenir sur chantier, le béton comportant le minimum de vides et d'eau. L'étude peut être faite, soit à partir de mesures de compacité ( par exemple par la méthode VALLETTE ou la méthode LEZY), soit à partir de mesures de temps d'écoulement. base de la présente méthode J. BARON et R. LESAGE.

Celle-ci est fondée sur l'existence d'une fonction qui caractérise le mélange des constituants solides, et sur le repérage pratique de cette fonction. Une propriété de cette dernière est d'avoir la valeur maximale pour le meilleur béton quelles que soient les conditions de mise en oeuvre et la teneur en eau.

La méthode consiste ainsi à déterminer les proportions des constituants pour que la dite fonction soit maximale.

Le meilleur béton possède trois qualités :

- Un minimum de vides
- un minimum d'eau
- un minimum de ségréabilité (ou meilleur homogénéité).

Ces trois qualités ne peuvent être recherchées simultanément. Il est alors nécessaire d'en choisir une à priori pour commencer l'étude.

### II.1- Recherche du minium de vides :

VALLETTE montre par expérience, que la compacité  $C$  d'un béton (volume de matière, eau comprise après mise en place) et son temps d'écoulement  $t$  ( sous l'effet d'une vibration) sont représentés avec une bonne approximation (corrélation  $\rho$  supérieur à 0.90) par l'une ou l'autre des équations suivantes :

$$C = f_c \cdot C_0 + h_c \quad -1-$$

$$C = f_{ct} \cdot \log_{ct} + h_{ct} \quad -2-$$

$f_c$ ,  $h_c$ ,  $f_{ct}$  et  $h_{ct}$  étant des coefficients ne dépendant que dans paramètres de la mise en oeuvre ( $f_c$  et  $f_{ct}$  sont toujours positifs).

Les figures II.1 et II.1 donnent chacune des exemples des résultats obtenus lors de l'application des relations 1 et 2.

Figure n°II.1 : Relation  $C = f_c C_o + h_c$

C et  $C_o$  représentent les compacités du béton mesurées par deux méthodes différentes. Le béton est constitué :

- gravillon 10/25
- sable 0/6.3
- ciment CPA

Il mis en place suivant le processus de Glanville, c'est à dire une chute de 95 cm en abaisse et 80 cm en ordonnées.

Coefficient de corrélation : 0.95.

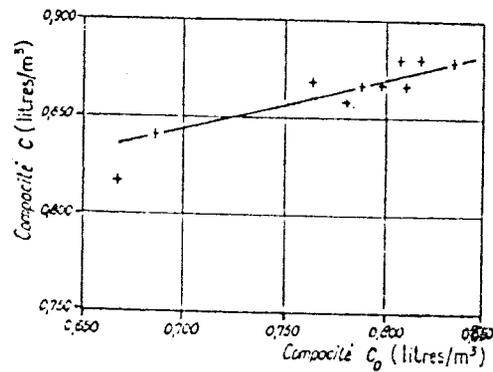
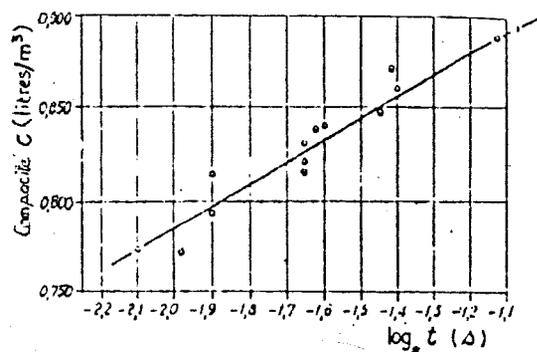


Figure n° II.2 : compacité en fonction du temps d'écoulement ( $C = f_{ct} \log_e t + h_{ct}$ )

Le béton est constitué de :

- cailloux 20 / 40
- sable 0 / 6.3
- ciment CPA

Coefficient de corrélation : 0.95



La compacité de référence et le logarithme du temps de référence sont donc deux repérages de la maniabilité  $M$  définie comme fonction qui regroupe, dans l'expression de la compacité, les paramètres intrinsèques relatifs au mélange des constituants du béton.

$$C = f. M + h$$

$f$  et  $h$  étant fonction des paramètres de mise en oeuvre ( $f$  est toujours positif).

A partir des équations précédentes il est possible d'écrire par symétrie :

$$-\log_e t = f. M' + h$$

$t$  représentant le temps d'écoulement du béton mesuré au mantabilimètre jusqu'à un repère donné, dans des conditions d'écoulement définies par les fonctions  $f$  et  $h$ . Plus la maniabilité est grande plus le temps nécessaire à la mise en place est court et plus l'énergie nécessaire est faible.

Il en résulte qu'entre deux bétons, le plus maniable est celui qui :

- Se mettra le plus facilement en place.
- Sera le plus compact après mise en place.

Pour qu'un béton soit mis en place sans vides, il est nécessaire que sa maniabilité  $M_m$  soit supérieure à :

$$M_m > (1 - h)/f$$

## II.2- Recherche du minimum d'eau :

Pour un mélange de constituants donnés, les auteurs ont montré par expérience que la maniabilité est une fonction de fonctions :

- L'une prenant en compte uniquement les paramètres du mélange des constituants solides.
- Les autres, prenant en compte la teneur en eau,

Si  $M_0$  est la maniabilité d'un béton dont la teneur en eau a été fixée arbitrairement à une valeur de référence, les expériences des auteurs montrent que la maniabilité, pour une teneur en eau quelconque, peut s'exprimer, quelles que soient les proportions des constituants, par la relation :

$$M = f_e M_0 + h_e$$

Dans laquelle  $f_e$  et  $h_e$  sont des coefficients fonction uniquement de la teneur en eau du béton ( $f_e$  est toujours positif).

Ces résultats indiquent que les paramètres relatifs au mélange des constituants solides n'interviennent qu'à l'intérieur d'une seule fonction  $M_0$  dont la forme ne dépend pas de la teneur en eau. Elle peut donc être étudiée séparément à partir d'une teneur en eau de référence.

La maniabilité d'un béton, pour une teneur en eau de référence, est ainsi un repérage de ce que les auteurs appellent la maniabilité granulaire  $N$  pouvant se définir comme la fonction qui regroupe, dans l'expression de la maniabilité, les paramètres relatifs au mélange des constituants solides.

$$M = f_e N + h_e$$

$F_e$  et  $h_e$  étant des fonctions de la teneur en eau ( $f_e$  est toujours positif).

### II.3- Minimum de ségrégabilité :

- Dans le phénomène de ségrégation, il faut distinguer deux aspects :

- Ségrégation des constituants solides
- ségrégation de l'eau

En ce qui concerne le premier aspect et pour des bétons composés de constituants de même nature, l'aptitude à la ségrégation dépend des proportions du mélange. Il paraît ainsi logique de supposer que ségrégabilité et maniabilité étant des fonctions de même paramètre, peuvent ne pas être des fonctions indépendantes.

En ce qui concerne la ségrégation de l'eau, une quantité minimale d'eau est nécessaire à la mise en place correcte pour des conditions de mise en oeuvre et de maniabilité granulaire fixées. Lorsque cette quantité d'eau minimale ne peut être retenue au cours du transport ou de la mise en place du béton, il ne paraît pas réaliste de prendre en compte le seul critère de maniabilité. Le plus souvent, les auteurs estiment que l'on sera conduit, dans ce cas, à adopter une composition différente de celle qui conférerait une maniabilité granulaire maximale, et même à envisager l'apport de constituants nouveaux.

### II.4- Fondement pratique de la méthode :

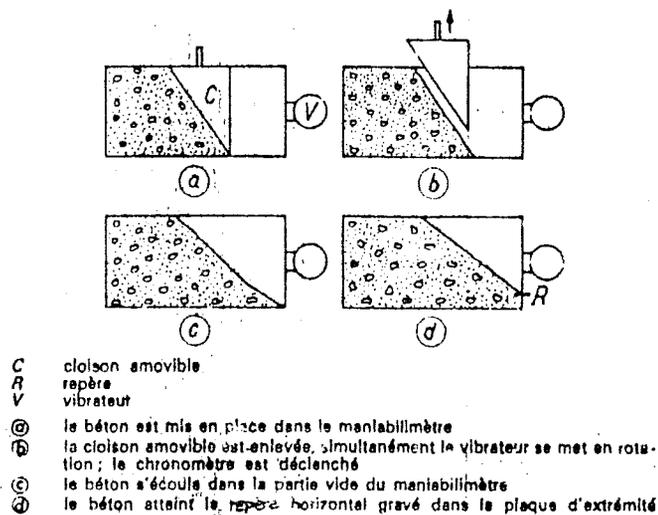
- L'aptitude d'un mélange à être mis en place pour former un béton compact peut donc être exprimée par une seule fonction : la maniabilité. A teneur en eau donnée, cette aptitude dépend du mélange des constituants solides caractérisé par une seule fonction ; la maniabilité granulaire.

Il est donc nécessaire de disposer d'un processus opératoire de repérage de la maniabilité pour étudier les variations de la maniabilité et de la maniabilité granulaire.

Pour repérer la maniabilité, il convient de mesurer, par application, des équations (1), (2) et (3) précédentes, soit une compacité comme il a été dit, soit un temps d'écoulement.

Les auteurs utilisent pour ce dernier repérage, l'appareil mis au point par l'un d'eux, le maniabilimètre Lesage est fabriqué par un établissement PERIER à MONTROUGE, qui permet la mesure précise du temps d'écoulement du béton entre deux états.

La figure II.3 rappelle le fonctionnement de l'appareil.



Un mode opératoire (L. C. P.C de Paris ) précise les conditions de malaxage, la durée entre la fin de malaxage et le début de mise en place dans l'état 1 (figure II.3).

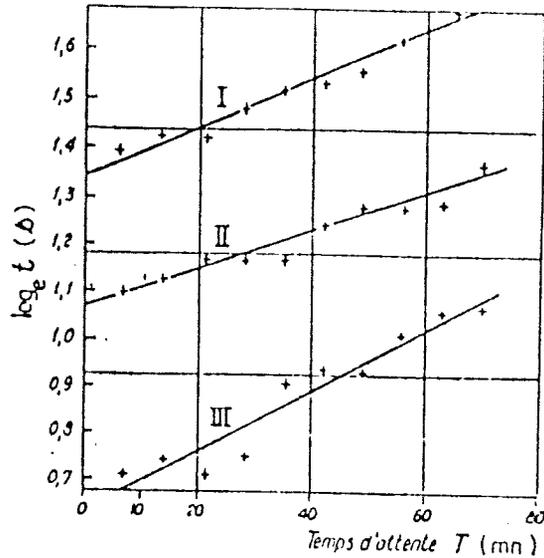
La mise en place dans cet état, la durée entre la fin de celle-ci et le début de l'écoulement.

Les auteurs ont vérifié expérimentalement qu'en respectant le mode opératoire, la compacité et le temps d'écoulement étaient reliés par la relation :

$$C = f_{ct} \log_e t + h_{ct}$$

Avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,90.

Figure II.4 : Maniabilité en fonction du temps d'attente T entre la fin de malaxage et la mise en place



#### II.5- Recherche de maniabilité nécessaire pour des conditions de mise en oeuvre données.

Lorsque la maniabilité granulaire est fixée, la maniabilité augmente linéairement avec la teneur en eau (fig.II.5). Pour des conditions données de mise en oeuvre, il existe une teneur en eau strictement nécessaire, en dessous de laquelle le béton contiendrait des vides. Les auteurs appellent cette teneur en eau teneur en eau critique.

Pour les mêmes conditions de mise en oeuvre, la teneur en eau critique est minimale lorsque la maniabilité granulaire est maximale.

A partir de la relation (1) (compacité du béton sur chantier et son temps d'écoulement au maniabilimètre. Lesage), on déduit que la mise en place correcte du béton exige un temps d'écoulement inférieur à :

$$t_m = \frac{1 - h_t}{f_t}$$

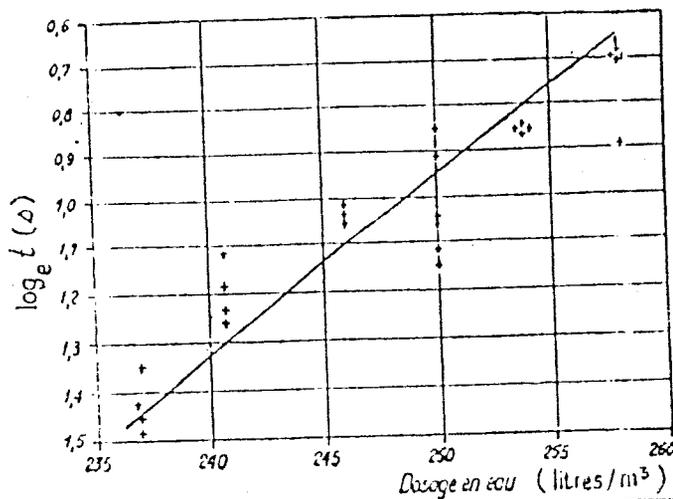
La valeur de  $t_m$  dépend des conditions de mise en oeuvre sur chantier et également du maniabilimètre et de son mode opératoire.

Actuellement, à partir du maniabilimètre Lesage, on estime les valeurs de  $t_m$  à :

- \* 8 à 10 s pour les bétons armés à assez forte densité d'armatures,
- \* 12 à 15 s pour les bétons du type routier mis en place par machine à coffrages glissants.

Une remarque importante est à signaler : il faut prendre en compte le temps d'attente éventuel sur chantier, entre la fin du malaxage et le début de la mise en place. La maniabilité diminue, en effet linéairement en fonction du temps d'attente et de ce fait, la teneur eau critique augmente linéairement. La figure II.5 donne les exemples de ces variations dont il y a lieu de tenir compte.

Figure II.5 - Relation entre la maniabilité et la teneur en eau d'un béton.



## II.6 - Méthode pratique de composition par BARON - LESAGE :

Le but souhaité est uniquement la recherche des meilleures proportions de constituants donnés. Depuis les travaux de FERET et connaissant la nature du ciment les résistances mécaniques en flexion et compression d'un béton compact sont des fonctions décroissantes du rapport  $e/l$  (eau/liant ; en volume). Pour obtenir des résistances suffisantes ; en poids,  $e/l < 0,5$  et en volume  $e/l < 1,5$ .

Pour satisfaire aux seules conditions de résistances mécaniques satisfaisantes  $e_1 \leq (e_1)_{\max}$  de résistances chimique et de durabilité correcte (compacité unite avec le minimum d'eau), il faut avoir :

$$e + l + g = 1$$

$e$  : proportion d'eau en volume  
 $l$  : proportion du liant en volume  
 $g$  : proportion granulats (sable + gravillons) en volume

Il est fréquent que les règlements prescrivent une teneur par mètre cube. Connaissant cette dernière on peut fixer à priori la teneur en eau d'après  $e_1 = 1.5$ . Puisque la valeur de  $l$  est imposée on déduit les valeurs de  $e$  et  $g$ .

En pratique, les compositions les plus courantes sont celles d'un béton binaire (gravillon + sable) ou d'un béton ternaire (cailloux + gravillon + sable).

Considérant un béton binaire - ( $g_1$  : proportion de sable,  $g_2$  : proportion du gravillon)

$$g_1 + g_2 = g$$

$M_0$  : (fonction maniabilité du béton pour une teneur en eau de référence) ne dépend que d'un seul paramètre, par exemple,  $g_1/g_2$ . Expérimentalement pour chaque valeur  $g_1/g_2$  on ne mesure pas  $M_0$  mais une valeur dépendante linéairement de  $M_0$ .

Ainsi au maniabilimètre - LCPC - LESAGE, le maximum de  $M_0$  correspondra au minimum de temps d'écoulement. Il suffira en pratique de composer cinq (05) bétons correspondants à cinq valeurs du rapport  $g_1/g_2$ , pour déterminer le minimum du temps d'écoulement et la valeur du rapport  $g_1/g_2$  correspondant à ce minimum ce qui donne les proportions en sable et en gravillons.

Cette méthode commence à être utilisée avec succès dans la composition de béton destinés à certaines applications particulières.

A titre d'exemple, citons les travaux de : AM. PAILLÈRE et Co ; P. ROSSI et Co ; BONNET et PAILLÈRE.