

P0006/05A

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil.

Thème

Influence des granulats sur les qualités du béton.

Proposé et dirigé par :

M^{me}. A. CHIKH
Mr. S. LAKEHAL

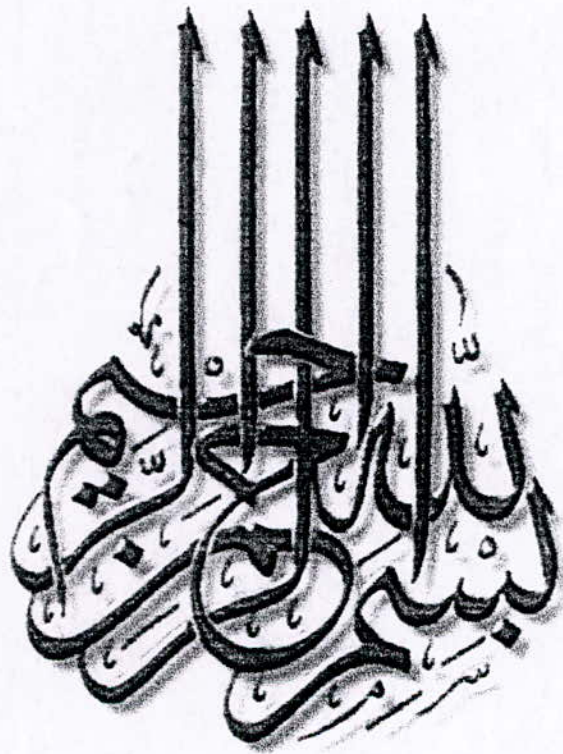
Etudié par :

Mr. Noureddine HADJI
Mr. Ahmed DRIF

E.N.P 10, Avenue Hassen Badi, B.P.182 El Harrach, Alger

Promotion 2005

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique



Dédi :aces

Je dédie ce modeste travail:

- ✓ A mes très chère parents d'être toujours à la hauteur
: "اللهم ارحمهما كما ربياني صغيرا"
- ✓ A mes frères et sœurs de leurs énormes aides et encouragement ;
- ✓ A mes belle sœurs Sabrina et Samia ;
- ✓ Au nouveau né, petit 'ABDU', fils de ma sœur ;
- ✓ Au future né, petite 'SARA', future fille de mon frère ;
- ✓ A toute la famille ;
- ✓ A mes frères de la mosquée de Bouraoui ainsi que celle de Seddouk ;
- ✓ A mes amis d'aventures "ZI MOUHOU and BRAYANE" ;
- ✓ A mon ami du Bled et de la cité "ADEL" ;
- ✓ A mon collègue de ce travail "AHMIDA", et à sa famille ;
- ✓ A mes amis "ZAHIR, AMAR, MOURAD, MUOLUO,...." ;
- ✓ Et à tous mes amis de prés et de loin.

Noureddine

DÉDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chères parents, pour toute l'aide et le soutien qu'ils m'ont offert tout au long de mes études.

- ‡ A mes grand-mères et grand-père ;*
- ‡ A mes frères et ma sœur ;*
- ‡ A toute la famille HADJI ;*

A tous mes amis :

*NOUREDDINE, MOHAMED, NASRO,
FATIHA, TAIB, PANCHO, REDOUANE,
SID-ALI, NADIA, MOURAD, GENDOUI...*

A tous ceux qui, de près ou de loin, par leur soutien m'ont apporté un plus.

DRIJ

Remerciements

Nous tenons à remercier M^{me} CHIKH pour son aide et ses conseils durant l'élaboration de ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos enseignants d'avoir accepté de faire partie de ce jury.

Nous exprimons également nos vifs remerciements à messieurs :

Le directeur du L.N.H.C et son extraordinaire équipe du laboratoire, messieurs SALEH, MUSTAPHA, RABEH, ABDELREZAK, FARES,.... pour l'aide qu'ils ont apportée à la réalisation de ce travail.

Le président directeur générale du CETIM, ADJTOÛTAH ABDELNOUR; pour son autorisation d'utiliser le laboratoire.

Nous exprimons également nos sincères reconnaissances aux personnes du S.N.T.P et E.N.G.O.A pour leur disponibilité.

Ainsi qu'à tous ceux qui ont aidés à la réalisation de ce travail.

Nous remercions du fond du cœur, tous les enseignants au sein de notre département génie civil qui ont contribué à notre formation.

HADJI L DRIF

Sommaire

Introduction générale.....	1
Plan de travail	2

PARTIE THEORIQUE

Chapitre I : Les constituants du béton

Introduction	3
1. Le Ciment.....	3
1.1. Les ciments courants	3
1.1.1. Les constituants des ciments courants	3
1.1.2. Propriétés des ciments courants	4
1.2. Autres ciments	6
2. Les granulats.....	6
2.1. Types de granulats	6
2.2. Caractéristiques des granulats	7
2.2.1. Caractéristiques géométriques	7
2.2.2. Caractéristiques physiques	8
2.2.3. Caractéristiques chimiques	10
2.3. Spécifications des granulats pour bétons	11
3. Eau de gâchage	12
3.1. Rôle de l'eau de gâchage	12
3.2. Qualité de l'eau de gâchage	12
3.3. Caractéristiques de l'eau de gâchage	13
3.3.1. Caractéristiques physiques	13
3.3.2. Caractéristiques chimiques	13
3.4. Aptitude à l'emploi	13
4. Adjuvants.....	16
4.1. Classification	16
4.2. Adjuvants divers	17
Conclusion	18

Chapitre II : Influence des constituants sur la qualité du béton

Introduction	19
1. Influence du ciment.....	19
1.1. Influence de la quantité de ciment	19
1.2. Influence des différentes qualités du ciment	19
2. Influence de l'eau	21
2.1. Influence de la quantité d'eau E	21
2.2. Influence des qualités de l'eau	22
3. Influence des granulats.....	23
3.1. Granularité (G/S).....	23
3.2. Granularité des graviers	24
3.3. Granularité des sables	25
3.4. Effet du volume du granulat	25
3.5. Effet de la taille maximale du granulat	26
3.6. Coefficient d'aplatissement des gravillons	26
3.7. Propreté des granulats	27
3.8. Absorption d'eau	27
3.9. Résistance mécanique Los Angeles	27
3.10. Friabilité des sables.....	27
3.11. Nature minéralogique	28
Conclusion	29

Chapitre III : Les méthodes de formulation

Introduction	30
1. Expression des quantités et des qualités de chaque constituant	30
1.1. Expression des quantités	30
1.2. Expression des qualités de chaque constituant d'une formulation	30
2. Définitions et expressions des cibles à atteindre.....	32
2.1. Cibles spécifiées	32
2.1.1. La résistance caractéristique en compression	32
2.1.2. La consistance normalisée	32
2.1.3. La durabilité	32
2.2. Les exigences	33
2.3. La compacité	33
3. Relation entre quelques paramètres de formulation	35
4. Conduite d'une opération de formulation d'un béton	35
5. Les différents méthodes de formulation	36
5.1. Méthode de CAMPUS	36
5.1.1. Détermination des paramètres de la formulation.....	36
5.1.2. Cibles à atteindre	36
5.1.3. Valeurs à introduire dans les équations	37
5.2. Méthode de FAURY	37
5.2.1. Détermination de D	38

5.2.2. Graphique du béton de référence	39
5.2.3. Détermination de la quantité de ciment et des granulats	39
5.2.4. Détermination de "X" et "Y"	39
5.3. Méthode de DREUX.....	40
5.3.1. Principe de la méthode	40
5.3.2. Détermination du rapport (C/E)	40
5.3.3. Détermination du dosage en ciment (C)	41
5.3.4. Détermination du dosage en eau (E)	41
5.3.5. Optimisation du squelette granulaire	41
5.3.6. Détermination des quantités de granulats..	42
Conclusion	45

Chapitre IV : Contrôle et essais sur le béton

Introduction	43
1. Caractéristiques rhéologiques du béton frais	43
2. Les mortiers et les bétons frais	43
2.1 Microstructure de l'interface entre la pâte et les granulats	44
2.2 Effet purement physique	44
2.3 Effets physico-chimiques	44
3. Vérification de la consistance et de la maniabilité	44
3.1. Mesure de la consistance et de la maniabilité	45
3.2. Relation entre divers essais de consistance et d'ouvrabilité	46
3.3. Etude comparative.....	47
4. Etude mécanique du béton	48
4.1. Définition de la résistance mécanique du béton	48
4.1.1. Résistance à la compression	48
4.1.2. Résistance à la traction	48
Conclusion	50

PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre V : Approche expérimentale

Introduction	51
1. Variables de l'étude	51
2. Tests d'identification des matériaux	52
2.1. Caractéristiques intrinsèques	52
2.2. Caractéristiques de fabrication	53
3. Analyses granulométriques	55
3.1. Analyse granulométrique des sables.....	55
3.2. Analyse granulométrique des graviers.....	59
4. Formulation des bétons	63
5. Préparation du béton.....	70

6. Mesures sur béton frais.....	70
7. Mise en œuvre des éprouvettes	71
8. Ecrasement des éprouvettes	72
9. Essai de traction par flexion « σ_t »	72
10. Etude de la variation Contrainte - Déformation	73

Chapitre VI : Résultats et interprétations

Introduction.....	75
1. Consistance et maniabilité du béton frais.....	75
2. Qualités du béton durci.....	76
2.1. Résistance à la compression.....	76
2.2. Evolution de la résistance en fonction du temps.....	79
2.3. Résistance à la traction par flexion.....	81
2.4. Etude de la variation Contrainte - Déformation.....	82
2.5. Calcul du coefficient de Poisson.....	85
3. Discussions.....	88
3.1. Influence de la densité des graviers.....	88
3.2. Influence de la granularité des graviers (rapport G/S).....	88
3.3. Influence de l'absorption d'eau.....	89
3.4. Influence de la résistance mécanique Los Angeles.....	89
3.5. Influence du coefficient Micro Deval.....	89
3.6. Influence de la teneur en sulfate SO_3	90
3.7. Influence de la teneur en calcaire CaO	91
3.7. Influence de la teneur en aluminat Al_2O_3	91
Conclusion	92
Conclusion générale	93

Bibliographie

Annexes

- Annexe -A-
- Annexe -B-
- Annexe -C-
- Annexe -D-

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
I.1	Critères sensoriels.	14
I.2	Critères chimiques	15
I.3	Critères mécaniques	15
II.1	Influence du rapport G/S sur les qualités du béton	24
III.1	La consistance en fonction du coefficient de remplissage et L'indice de remplissage	37
IV.1	Correspondance entre différentes valeurs de consistance et de maniabilité.	46
IV.2	Différents procédés de mesure de consistance et de maniabilité	47
V.1	Récapitulatif des valeurs de caractéristiques mesurées des graviers	54
V.2	Récapitulatif des analyses chimique des graviers	54
V.3	Récapitulatif des valeurs de caractéristiques mesurées des sables	54
V.4	Analyse granulométrique des sables	55
V.5	Analyse granulométrique des graviers	59
V.6	Granulométrie du béton 1	63
V.7	Granulométrie du béton 2	65
V.8	Granulométrie du béton 3	67
V.9	Composition du béton 1	69
V.10	Composition du béton 2	69
V.11	Composition du béton 3	69
V.12	Récapitulatif des résultats sur béton frais	71

Listes des figures

N0	Titre	Page
II.1	Influence de la nature du ciment	20
II.2	Influence de la finesse des ciments	21
II.3	Influence du rapport G/S sur la caractéristique du béton	24
II.4	Influence de volume des granulats sur la résistance du béton	26
III.1	paramètre nécessaire pour déterminer D	38
II.2	courbe de référence.	39
III.3	détermination de X et Y.	40
III.4	Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment	41
IV.1	Affaissement au cône d'Abrams	45
IV.2	Etallement à la table à secousse.	46
IV.4	traction par fendage.	49
IV.5	Traction par flexion	49
V.1	courbe granulométrique de sable fin	56
V.2	courbe granulométrique de sables grossiers	57
V.3	courbe granulométrique de sable retenu	58
V.4	courbe granulométrique des graviers de Lakhdaria	60
V.5	courbe granulométrique des graviers de Si Mustapha	61
V.6	courbe granulométrique des graviers de Sétif	62
V.9	formulation du béton 1	64
V.8	formulation du béton 2	66
V.7	formulation du béton 3	68

Liste des photos

N0	Titre	Page
V.1	Réceptient	52
V.2	Pycnomètre	52
V.3	Los Angeles	53
V.4	Micro Deval	53
V.5	Tamis et balance électronique	53
V.6	Equivalent de sable	53
V.7	Malaxeur	70
V.8	Cône d'Abrams	70
V.9	Table à secousses	70
V.10	Maniabilimètre	70
V.11	Bac d'eau	71
V.12	Eprouvette surfacée	72
V.13	Presse électronique	72
V.14	Eprouvette cylindrique avant flexion	72
V.15	Eprouvette cylindrique après flexion	72
V.16	Produits de nettoyage	73
V.18	Post tensiomètre	73
V.17	Etude de contrainte déformation	74



INTRODUCTION GENERALE :

L'amélioration de la résistance du béton et de son ouvrabilité, qui sont les qualités essentielles à obtenir, passe par la connaissance du rôle que joue chaque constituant, sa participation ainsi que son influence.

Les granulats ont toujours joué un rôle prépondérant dans le domaine de la construction (bâtiments, ouvrages d'art, routes, etc....). Ils constituent par ailleurs la partie la plus importante du béton (80% de son poids).

Le choix des granulats destinés à un projet donné, conditionné par leurs caractéristiques mécaniques (Los Angeles; Micro Deval; etc.,...), et leurs caractéristiques de fabrication (forme; propreté; granularité, etc.,...) est déterminant pour les performances du béton obtenu.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre projet, dont les principaux objectifs sont l'appréciation des caractéristiques des granulats et de leur influence.

Buts de l'étude :

Les granulats Algériens font l'objet des spécifications européennes, l'Algérie n'ayant pas encore élaboré ses propres normes. La plupart des carrières produisent des granulats de roches sédimentaires; parmi lesquelles les roches carbonatées qui constituent la fraction la plus importante.

Les différentes carrières exploitées dans le pays font l'objet de contrôles et de tests de plus en plus rigoureux. On peut espérer que les matériaux de construction, et les granulats en particulier soient de qualité garantie à l'avenir.

Mais les qualités des bétons obtenus à partir de granulats donnés ne sont pas toujours faciles à appréhender.

C'est pourquoi l'étude des propriétés des granulats produits localement et de leur influence sur les bétons obtenus est une démarche essentielle.

- Nous envisageons dans ce cadre, en utilisant 3 types de graviers différents :
 - ❖ de faire des essais sur béton frais pour observer l'ouvrabilité,
 - ❖ d'estimer l'influence de ces granulats sur les résistances obtenues
 - ❖ la détermination du module d'élasticité longitudinale, la mesure de la résistance à la traction et le calcul du coefficient de Poisson.

Plan de travail:

Pour que l'influence des granulats soit objective nous avons :

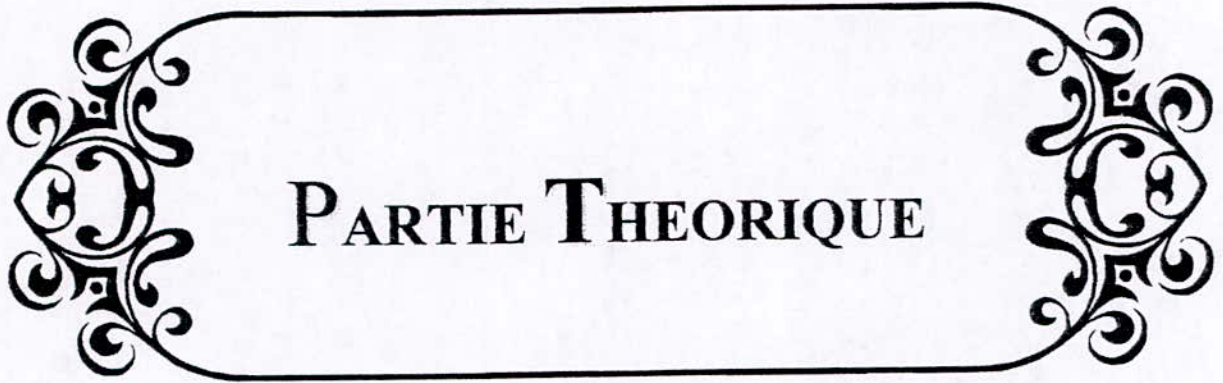
- ❖ Utilisé différents graviers (trois carrières).
 - ❖ Imposé un même sable pour tous les bétons confectionnés; ce sable est un mélange de sable grossier et de sable fin.
 - ❖ Conservé un même dosage en ciment et en eau.
- Pour atteindre le but visé dans ce projet, la méthodologie retenue est la suivante :

Après une introduction qui présente le sujet étudié, l'étude comporte deux parties: une partie théorique, et une partie expérimentale.

Dans la partie théorique, les notions de base sur les constituants du béton et leur influence, une synthèse des méthodes de formulation existantes; (avec lesquelles on peut calculer une composition d'un béton) ainsi qu'une récapitulation des méthodes de contrôle et d'essais sur les bétons à l'état frais et durci sont présentés.

Dans la deuxième partie ,qui est la partie expérimentale, les essais retenus ainsi que les variables de l'étude sont présentés avant le rapport des résultats d'essai, leur discussion et l'interprétation.

Notre travail s'achève par une conclusion générale qui permet de faire une synthèse des résultats obtenus tout en proposant des pistes pour des perspectives futures.



PARTIE THEORIQUE



CHAPITRE I

Les constituants du béton

Introduction :

Le béton est destiné à réaliser des éléments structuraux dans le domaine du bâtiment et du génie civil. Il est composé de plusieurs constituants élémentaire tels que : le ciment, les granulats, l'eau. Pour répondre aux besoins de certains usages, certains ajouts peuvent être envisagés tels que : les adjuvants, les fines, les additions... etc.

1. Le ciment :

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages.

Parmi les nombreux ciments fabriqués, une première distinction doit être faite entre les « ciments courants » régis par la norme NF P 15-301, et les « autres ciments » généralement réservés à des emplois spécifiques et dont les caractéristiques font l'objet de normes particulières.

Dans la catégorie des ciments courants qui, comme leur nom l'indique, comprend ceux que l'on utilise le plus couramment, existent différents types.

Les autres ciments comprennent ceux plus particulièrement réservés à l'exécution de travaux spéciaux dans des conditions d'environnement ou de mise en œuvre que ne pourraient permettre les ciments courants.

1.1. Ciment courant :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium. La proportion de chaux et de silice réactive devant être au moins de 50 % de la masse du ciment. [1]

1.1.1. Les constituants des ciments courants :

Tous les ciments courants contiennent du clinker Portland car c'est lui qui assure la fonction liante.

Le clinker est accompagné de sulfate de calcium nécessaire pour régulariser la prise, c'est-à-dire faire en sorte que le béton reste coulable pendant une période suffisamment longue (de l'ordre de 1 h 30) sans gêner, ensuite, le passage à l'état solide. Le sulfate de calcium peut être du gypse, du plâtre ou de l'anhydrite.

Suivant leur type, les ciments courants peuvent contenir les autres constituants suivants : laitier granulé de haut fourneau, pouzzolanes naturelles, cendres volantes siliceuses ou calcaïques, schistes calcinés, calcaires, fumées de silice. Tous ces constituants sont définis et spécifiés par la norme NF P 15-301.

Tous les ciments, quel que soit leur type, peuvent contenir des constituants secondaires dont la proportion est inférieure à 5 % du total [2].

1.1.2. Propriétés des ciments courants : [1]

a. Comportement physico-chimique de la pâte :

La réaction chimique d'hydratation s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon les ciments et la rapidité de prise.

Il faut noter que la quantité d'eau qu'il est nécessaire d'ajouter pour le gâchage correct du ciment est supérieure à celle strictement nécessaire aux seules réactions chimiques, car il faut distinguer :

- L'eau de cristallisation ou d'hydratation fixée chimiquement dans les nouveaux constituants hydratés et qui est nécessaire à leur structure cristalline, son pourcentage étant en général de l'ordre de 20 à 25 % du poids du ciment;
- L'eau absorbée;
- L'eau libre qui s'élimine plus ou moins par séchage et qui est nécessaire pour obtenir la plasticité et l'onctuosité indispensables au gâchage et à la mise en place des bétons.

b. Indice d'hydraulicité (indice de Vicat) :

C'est le rapport de la fraction acide du ciment à la fraction basique :

$$I = \text{fraction acide} / \text{fraction basique}$$

$$I = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{Ca O} + \text{Mg O})$$

La résistance chimique des ciments est d'autant meilleure que leur indice d'hydraulicité est plus élevé :

- Quand $I > 0.5$, le ciment est dit basique (Portland);
- Quand $I < 0.5$, le ciment est dit neutre (riche en laitier);
- Quand $I \approx 1$, le ciment est dit acide (ciment alumineux).

c. Prise :

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié à de nombreux paramètres :

- Le type de ciment ;
- La finesse de mouture ;
- La température ambiante ;
- La présence de matières organiques dans l'eau;
- L'excès d'eau de gâchage qui agit alors comme retardateur.

Les temps de prise sont supérieurs à des valeurs minimales (2 h 30 à 3 h 30). Pour une grande majorité de ciments, ces valeurs s'entendent pour une température ambiante de 20 °C.

d. Durcissement :

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement qui se poursuit pendant des mois ou des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent de croître.

e. Fausse prise :

Quand les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise. C'est la « fausse prise ». Dans ce cas, il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage.

f. Chaleur d'hydratation :

La dissolution des différents constituants est exothermique et, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important.

g. Finesse de mouture (finesse Blaine) cm^2/g :

Elle représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1kg de ciment. Elle est comprise entre 2000 et 7000 cm^2 .

Plus la finesse est grande, plus les résistances sont élevées, mais plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration du ciment sont accrus.

h. Retrait :

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4x4cm, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

- La nature du ciment
- La finesse de mouture;
- Le dosage en ciment, dans le béton;
- Le dosage en eau ;
- La propreté et la nature des granulats;
- La protection après coulage.

i. Expansion :

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie libres.

Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

1.2. Autres ciments : [3]

1.2.1. Ciment sursulfaté NF P 15-313 :

Ce ciment résulte de la mouture d'un mélange de laitier granulé de haut-fourneau, de sulfate de calcium, et d'une petite quantité d'un catalyseur qui peut être de la chaux ou du clinker.

1.2.2. Ciment pouzzolanique :

Ce ciment résulte du mélange de deux constituants moulus ensemble ou séparément : (100 — N) parties de clinker Portland et N parties de pouzzolane ou de cendres volantes de houille, N étant compris entre 30 et 40.

1.2.3. Ciment au laitier et à la pouzzolane :

Ce ciment résulte du mélange de deux constituants moulus ensemble ou séparément : (100 — N) parties de clinker Portland et N parties de laitier granulé et de pouzzolane, N étant supérieur à 35.

2. Les granulats :

Les granulats sont définis par la norme P 18-101 comme un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, destinés à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation, de base et de roulement des chaussées et des assises et des ballasts de voies ferrées.

2.1. Types des granulats : [4]

On distingue :

- **les granulats naturels**, issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique;
- **les granulats artificiels**, qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais, de sous-produits industriels (laitiers, scories, etc.) ou encore de la démolition d'ouvrages ou de bâtiments divers en béton, souvent appelés granulats recyclés.

- **Les granulats pour bétons hydrauliques** concernés par la norme P 18-541 ont des masses volumiques réelles supérieures ou égales à 2 t/m^3 .
- **Les granulats très légers** : Ils sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m^3 .

2.2. Caractéristiques des granulats :

2.2.1. Caractéristiques géométriques :

A. Classe granulaire : [2]

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à mailles carrées dans la série normalisée NF ISO 565.

Ils sont désignés par d et D qui représentent respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions de l'appellation commerciale des produits. Ils sont appelés d/D ou $0/D$ lorsque d est inférieure à un millimètre. Les intervalles d/D et $0/D$ sont également appelés classes granulaires.

Le projet de révision de la norme P 18-101 retient pour les dimensions d et D , exprimées en millimètres, des classes granulaires désignant les produits commerciaux, la série suivante : 0 - 1 - 2 - 4 - 6,3 - 8 - 10 - 12,5 - 14 - 16 - 20 - 25 - 31,5 - 40 - 63 - 125 mm.

Si nécessaire, les coupures à 2,5 - 3,15 - 5 - 25 - 50 et 90 mm peuvent être utilisées.

Les principales familles de granulats sont :

- Fillers $0/D$ où $D < 2 \text{ mm}$ et contenant au moins 70 % de passant à 0,063 mm ;
- Sables $0/D$ où $D < 6,3 \text{ mm}$ (ramené à 4 mm pour le sable à béton) ;
- Sablons $0/D$ où $D < 1 \text{ mm}$ et contenant moins de 10 % de passant à 0,063 mm ;
- Gravillons d/D où $d > 1 \text{ mm}$ et $D < 31,5 \text{ mm}$;
- Cailloux d/D où $d > 20 \text{ mm}$ et $D < 125 \text{ mm}$;
- Graves $0/D$ où $D > 6,3 \text{ mm}$.

B. Courbes granulométriques : [1]

La courbe granulométrique exprime les pourcentages cumulés, en poids, des grains passant dans les tamis successifs.

La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un granulat.

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisats sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

La forme des courbes granulométriques apporte les renseignements suivants :

- Les limites d et D du granulat en question ;
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins
- La continuité ou la discontinuité de la granularité

C. Forme des granulats : [1]

La forme des granulats a une incidence sur la maniabilité du béton, la forme la plus souhaitable se rapprochant de la sphère. Une mauvaise forme (aiguilles, plats) nécessite une quantité d'eau plus élevée et peut provoquer des défauts d'aspect.

La forme d'un granulat est définie par :

- Sa longueur L,
- Son épaisseur E qui est le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles,
- Sa grosseur G.
- Son volume v.
- Son diamètre d.

a. Coefficient volumétrique :(norme NFP 18-301) :

Pour un granulat constitué d'un ensemble de grains on a :

$$C = \frac{\sum v}{\sum \frac{\pi \times d^3}{6}} = \frac{v}{\frac{\pi}{6} \sum d^3}$$

Un coefficient faible correspond à un granulat présentant un certain nombre de plats, éclats et aiguilles [5].

Un coefficient élevé correspond à un granulat « cubique » ou « arrondi » le coefficient volumétrique d'un cube est 0,37 ; celui d'une bille est évidemment 1.

b. Coefficient d'aplatissement (Norme NF P 18-561) :

Le coefficient d'aplatissement A d'un lot de granulats est, par définition, le pourcentage des éléments tels que $G/E > 1,58$.

2.2.2. Caractéristiques physiques :

a. La densité absolue :

La densité absolue est le rapport de la masse sèche de l'échantillon au volume de sa matière (tout vide déduit). La densité absolue est donc égale au millièmes de la masse spécifique, c'est un simple rapport sans dimension [2].

b. La densité apparente :

La densité apparente est à la masse volumique ce que la densité absolue est à la masse spécifique. C'est donc un rapport sans dimension dont la valeur est égale au millième de la masse volumique.

c. Compacité :

Pour un corps poreux (ou un mélange de granulats) de volume V et dont les pores (ou vides internes) représentent un volume v la compacité est le rapport du volume de matière pleine au volume total :

$$C = \frac{V - v}{V} = 1 - \frac{v}{V}$$

Pour les granulats courants, on peut admettre que la compacité en vrac est de l'ordre :

- de 0,70 à 0,60 pour les sables et
- de 0,65 à 0,55 pour les graviers selon qu'ils sont tassés ou non.

d. Porosité :

La porosité est le rapport :

$$P = \frac{v}{V}$$

e. L'indice des vides :

L'indice des vides est le rapport :

$$I = \frac{v}{V - v} = \frac{P}{C}$$

f. Module de finesse d'un sable :

Le module de finesse d'un sable est égal au $1/100^{\text{ème}}$ de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante : 0,16 - 0,31 - 0,63 - 1,25 - 2,5 et 5 mm.

C'est une caractéristique intéressante. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8. Au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. Au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

g. Foisonnement des sables :

Le volume occupé par un poids donné de sable sec augmente en même temps que son humidité. Ce phénomène peut donc avoir une influence importante lorsque le dosage du béton est réalisé, non pas en poids, mais en volume. Nous appellerons donc coefficient de foisonnement (en %) l'augmentation de volume correspondant à une humidité donnée, par rapport au volume occupé par la même quantité de sable à l'état sec :

$$f = \frac{V_h - V_s}{V_s} \%$$

Ce coefficient de foisonnement est d'autant plus important que le sable est plus fin.

2.2.3. Caractéristiques chimiques :

A. Les principales familles de minéraux rencontrés : [2]

Les granulats naturels, qu'ils proviennent de roches massives ou de roches meubles, sont essentiellement constitués de silice, de silicates (ces deux familles de minéraux constituent 90 % de l'écorce terrestre) et de carbonates.

a. La silice :

La silice, lorsqu'elle est microcristalline, crypto cristalline, fibreuse ou amorphe, peut donner lieu, dans certaines conditions, à des réactions alcalines au sein du béton.

b. Les silicates :

On distingue essentiellement :

- Les feldspaths (silicates d'alumine cristallisés) : se présentant sous forme de tablettes que l'on rencontre dans les roches magmatiques et métamorphiques ;
- Les silicates en feuillets comme les micas et les argiles ;
- Les autres silicates, pour l'essentiel ferromagnésiens, tels que amphiboles, pyroxènes, olivines, etc. que l'on rencontre dans les roches magmatiques ou métamorphiques pauvres en silice telles que diorites, gabbros, bazaltes.

c. Les carbonates :

Ce sont essentiellement :

- La calcite CaCO_3 ;
- La dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ que l'on trouve dans certaines roches sédimentaires et métamorphiques.

B. Propreté des granulats :

Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, qui contient des impuretés telles que le charbon, les scories, le mâchefer, les déchets de bois, brindilles, feuilles mortes, débris végétaux, les débris de plastique, algues, etc. et la valeur limite acceptable est comprise entre 2 et 5 % selon le type de béton [1].

2.3. Spécifications des granulats pour bétons :

La norme P 18-541 donne les spécifications auxquelles doivent satisfaire les granulats courants pour bétons hydrauliques et utilise, à cet effet, les règles de conformité de la révision de la norme P 18-101. Elle définit pour chaque caractère une ou deux valeurs spécifiées, inférieure (V_{si}) ou supérieure (V_{ss}) :

Dans le cas d'une seule limite inférieure ou supérieure :

$$m < V_{ss} - 1,25s \quad \text{ou} \quad m > V_{si} + 1,25s$$

Dans le cas de deux limites, une inférieure et une supérieure :

$$m < V_{ss} - 1,25s \quad \text{et} \quad m > V_{si} + 1,25s$$

(m étant la valeur moyenne de la propriété contrôlée et s l'écart type)

Une ou deux valeurs limites absolues ou bornes ($V_{ss} + U$) et/ou ($V - U$) qui ne doit être dépassées pour aucun essai (U étant une constante, appelée limite d'incertitude l'essai, qui dépend de sa répétabilité et de sa reproductibilité). Les valeurs de U ; données dans le projet de révision de la norme P 18-101 et dans le règlement de la marque NF-Granulats.

La norme P 18-541 définit les spécifications de base auxquelles doivent satisfaire tous les granulats destinés à la préparation de bétons hydrauliques (voir annexe A-tableau1).

Elle spécifie dans des annexes normatives des exigences particulières (ou compléments); pour certaines caractéristiques des granulats lorsqu'ils sont les constituants de :

- bétons d'ouvrages d'art de résistance caractéristique $f_{ck} > 36$ MPa et bétons de bâtiments de résistance caractéristique $f_{ck} > 60$ MPa ;
- bétons soumis à des environnements agressifs de classe 3 (action des sels fondants de classe 4 (environnement maritime), de classe 5 (milieux sulfatés, etc.) ;
- bétons routiers, suivant la classe de référence de la chaussée telle que définie dans la norme NF P 98-170 en fonction des trafics et des modes d'exécution ;
- bétons apparents ou devant subir une mise en peinture à l'état brut de décoffrage.

Pour les bétons non armés, les petits éléments fabriqués en usine, de résistance caractéristique $f_{ck} < 16$ MPa, utilisés à l'intérieur (environnement de classe 1) ou à l'extérieur (classe 2), mais avec une protection par enduit traditionnel conforme aux normes ou par bardage, les critères de conformité requis se limitent à la granularité, à la propreté, aux teneurs en éléments prohibés (en soufre total, en sulfates, en chlorures) [2].

3. Eau de gâchage :

L'eau, considérée comme matériau, n'est guère utilisée en construction que pour la confection des mortiers et bétons : elle porte alors le nom d'eau de gâchage.

3.1. Rôle de l'eau de gâchage : [3]

Le mélange sec des granulats et du liant ne peut se transformer en béton ou mortier que par addition d'eau. La quantité d'eau que l'on ajoute au mélange sec s'appelle l'eau de gâchage. A ce sujet, il faut bien faire la distinction entre :

- l'eau de gâchage, qui est l'eau totale ajoutée au mélange sec, et
- l'eau de prise, qui est l'eau absorbée par le ciment lors de sa prise, c'est-à-dire l'eau d'hydratation du ciment.

La formation des hydrates absorbe environ :

- 20 % du poids du liant pour le ciment Portland,
- 40 % du poids du liant pour le ciment alumineux.

Il est bien évident que l'eau de gâchage doit toujours être supérieure à l'eau de prise, car une partie de l'eau ajoutée se perd au cours des différentes opérations de mise en oeuvre du béton (dans la bétonnière, pendant le transport, par évaporation, etc. . .)

Outre le rôle d'hydratation du liant, l'eau de gâchage joue deux autres rôles :

- mouiller les granulats.
- faciliter la mise en place du béton (ouvrabilité).

3.2. Qualité de l'eau de gâchage :

Il est bien évident que les impuretés nocives, interdites pour les granulats, ne doivent pas être apportées par l'eau.

Les tolérances réglementaires sont les suivantes :

- matières en suspension 2 à 5g par litre
- matières dissoutes 15 à 30g par litre.

D'une manière générale, il ne faut pas utiliser :

- les eaux sucrières,
- les eaux acides,
- les eaux contenant plus de 5 à 6 % de sel marin,
- les eaux contenant plus de 3 % de sulfate de magnésium ou de gypse,
- les eaux trop riches en gaz carbonique,
- les eaux contenant des matières organiques.

3.3. Caractéristiques de l'eau de gâchage :

3.3.1. Caractéristiques physiques :

Les eaux employées pour le gâchage des bétons ne doivent pas contenir de matières en suspension au-delà des proportions suivantes :

- 2g par litre pour les bétons type A.
- 2g par litre pour les bétons type B.
- 5g par litre pour les bétons type C.

La normalisation prévoit, en effet, trois types de béton, suivant leur utilisation :

- **Béton type A** : béton à résistance mécanique élevée (ouvrages en béton armé) ;
- **Béton type B** : béton à faible perméabilité (barrages, réservoirs, radiers, tuyaux, ouvrage à la mer, etc. . .) ;
- **Béton type G** : béton à résistance mécanique faible (béton peu ou non armé, massifs de fondation, etc.).

3.3.2. Caractéristiques chimiques :

Les eaux employées pour le gâchage des bétons ne doivent pas contenir de sels dissous au-delà des proportions suivantes :

- 15g par litre pour béton type A.
- 15g par litre pour béton type B.
- 30g par litre pour béton type C.

Par ailleurs, il faudra veiller à ce que la proportion de certaines matières dissoutes (acides, sulfate de magnésie, etc. . .) ne puisse nuire à la conservation des bétons et mortiers.

3.4. Aptitude à l'emploi :

Toutes ces eaux ne présentent pas les mêmes risques vis-à-vis du béton et, si l'eau potable est toujours utilisable, il peut ne pas en être de même pour les autres eaux [2].

Déjà, en 1941, la norme française NF P 18-303 sur l'eau de gâchage caractérisait l'aptitude à l'emploi selon deux critères :

- la teneur en matières en suspension (2 ou 5 g/l).
- la teneur en sels dissous (15 ou 30 g/l).

Les critères qui permettent d'évaluer l'aptitude à l'emploi d'une eau de gâchage ne doivent pas être confondus avec les critères qui permettent de juger de l'agressivité d'une eau vis-à-vis d'un béton durci. Ils peuvent parfois être voisins, mais ils sont souvent différents.

3.4.1. Les critères sensoriels :

- L'odeur : une eau malodorante doit être suspectée de contenir des matières organiques en décomposition.
- L'aspect : une eau qui, après décantation, garde une couleur foncée, doit être considérée comme douteuse.

Type d'essai	Méthode d'essai	Utilisable	Renvoi au tableau I.3
Couleur	Inspection visuelle dans un cylindre de mesure placée devant un arrière-plan blanc (laisser se décanter les matières en suspension)	Incolore, voire légèrement jaunâtre	Foncé ou coloré (rouge, vert, bleu)
Huiles ou graisses	Inspection visuelle	Traces uniquement d'émulsion d'huile	Pellicule d'huile
Détergents	Agiter vigoureusement l'échantillon d'eau dans un cylindre	Légère formation de mousse, stabilité de la mousse < 2 min	Formation importante de mousse, stabilité de la mousse < 2 min
Matières en suspension	Cylindre de mesure de 80cm ³	< 4 cm ³	> 4cm ³
Odeur	Ajouter HCl	Aucune odeur, voire pas plus d'une légère odeur	Fort odeur (par exemple, sulfure d'hydrogène)
Valeur du pH	Papier indicateur/indicateur liquide	> 4	< 4
Substances humiques	Dans une éprouvette, verser 5 cm ³ de l'échantillon d'eau et ajouter 5 cm ³ de soude caustique à 3 ou 4 %. Agiter. Procéder à l'inspection visuelle au bout de 3 min.	Plus pâle que brun jaunâtre	Plus foncé que brun jaunâtre

Tableau I.1 : Critères sensoriels

3.4.2. Les critères chimiques :

Chacun de ces critères fait l'objet d'une double spécification, suivant que l'on est en dessous ou au-dessus d'une certaine valeur limite.

Ions à considérer	Utilisable si :	Renvoi aux conditions du tableau I.3 si :	Non utilisable si :
Chlorures (Cl ⁻) :			
Béton précontraint	≤ 600 mg/l		> 600 mg/l
Béton armé	≤ 2000 mg/l		> 2 000 mg/l
Béton non armé	≤ 4500 mg/l	> 4 500 mg/l	
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	≤ 2 000 mg/l	> 2 000 mg/l	-
Sucre :			
Glucose	≤ 100 mg/l	> 100 mg/l	-
Saccharose	≤ 100 mg/l	> 100 mg/l	-
Phosphates (P ₂ O ₅)	≤ 100 mg/l	> 100 mg/l	-
Nitrates (NO ₃ ⁻)	≤ 500 mg/l	> 500 mg/l	-
Zinc (Zn ²⁺)	≤ 100 mg/l	> 100 mg/l	-
Sulfures (S ²⁻)	≤ 1 00 mg/l	> 100 mg/l	-
Sodium (Na ⁺) Potassium (K ⁺)	au total ≤ 1 000 g/l	-	> 1 000 mg/l

Tableau I.2 : Critères chimiques

3.4.3. Les critères mécaniques :

L'aptitude d'une eau considérée comme douteuse se vérifie sur deux types d'essais : un essai de prise sur mortier et un essai de résistance mécanique à sept jours sur mortier ou béton.

Une eau douteuse peut être utilisée comme eau de gâchage si elle n'altère pas la prise et la résistance au-delà de certaines valeurs limites précisées dans la norme (Tableau I.3).

Type d'essais		Béton ou mortier testé	Par rapport au témoin
Temps de prise	Début	≥ 1 h	± 25 %
	Fin	≤ 12h	± 25 %
Résistance à la compression à 7 jours		-	≥ 90 %

Tableau I.3 : Critères mécaniques

4. Adjuvants : [6]

On appelle adjuvant, tout ingrédient autre que le ciment, les granulats et l'eau, que l'on ajoute au mélange.

Les adjuvants de béton sont des produits chimiques solubles dans l'eau qui modifient principalement :

- les solubilités,
- les vitesses de dissolution,
- l'hydratation des divers constituants d'un liant hydraulique.

4.1. Classification :

La classification des adjuvants repose essentiellement sur les propriétés qu'ils confèrent au béton frais ou durci. On propose en pratique la classification suivante :

4.1.1. Plastifiants :

Ce sont des produits d'addition poudreux extrêmement fins qui, ajoutés au béton lui confèrent une meilleure plasticité, améliorant ainsi ses qualités de maniabilité et d'ouvrabilité.

4.1.2. Fluidifiants ou réducteurs d'eau :

Ce sont des produits très différents, chimiquement, des précédents. Ils produisent une défloculation de la pâte de ciment et les bulles d'air, comprises dans les grumeaux qui se dispersent, sont libérées du même coup.

Leur deuxième rôle, le plus important, est un rôle de lubrification par adsorption, sur la paroi des grains, des molécules longues qui jouent un rôle de lubrifiant onctueux.

4.1.3. Entraîneurs d'air :

Ce sont des composés d'addition généralement résineux ou à base d'huiles végétales ou minérales qu'il ne faut pas confondre avec des produits moussants.

Les entraîneurs d'air se présentent sous forme de liquides, de sels solubles ou de poudres insolubles à ajouter au moment du malaxage. Ils améliorent essentiellement :

- La plasticité et l'ouvrabilité du béton,
- La résistance au gel du béton durci (antigélif).

4.1.4. Accélérateurs:

Ce sont des produits solubles dans l'eau et qui agissent chimiquement en augmentant la vitesse d'hydratation du ciment; cela entraîne un déclenchement plus rapide du phénomène de prise et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important.

Les accélérateurs seront donc tout particulièrement employés pour les bétonnages par temps froids ou pour les travaux urgents.

On distingue :

- les accélérateurs de prise : alcalis, carbonates et sulfates de soude ou de potasse,
- les accélérateurs de durcissement : chlorures et carbonates.

4.1.5. Retardateurs :

Ils agissent chimiquement comme les accélérateurs en retardant plus ou moins longtemps l'hydratation et le début de prise du ciment.

Parmi les produits retardateurs de prise on peut citer : les sucres et gluconates, les acides citriques et tartriques, l'oxyde de zinc, les phosphates alcalins.

Ces produits sont employés en particulier :

- pour les bétonnages par temps très chaud,
- pour les transports de béton sur grande distance,
- pour des reprises de bétonnage.

4.1.6. Hydrofuges :

Ce sont des produits qui améliorent l'étanchéité des bétons et protègent de l'humidité en arrêtant l'absorption capillaire.

On distingue essentiellement :

- les hydrofuges de masse.
- les hydrofuges de surface.

4.1.7. Antigels et antigélifs :

Il ne faut pas confondre antigels et antigélifs :

- les premiers évitent le gel du béton frais ; par gonflement le gel détruit la compacité et stoppe la prise du ciment que l'on a intérêt par suite à accélérer en même temps qu'il convient de réduire le dosage en eau;
- les seconds, les antigélifs évitent que le béton, une fois durci, se désagrège progressivement dans le temps par suite de gels successifs:

4.2. Adjuvants divers :

On peut citer :

- Les produits de cure (ou curing-compounds).
- les anti-poussières et durcisseurs de surface.
- les adjuvants pour injection.

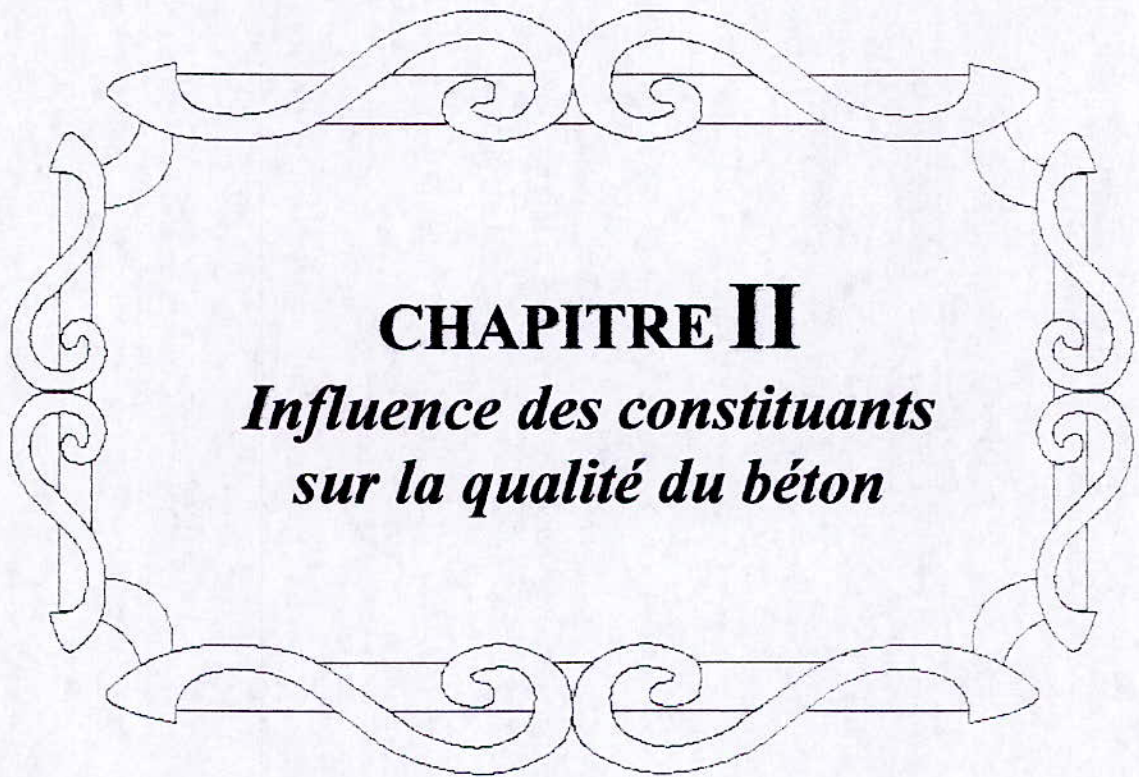
Conclusion :

La gamme des ciments courants permet de choisir le ciment en fonction de la résistance caractéristique garantie du béton, de la résistance nécessaire au moment du décoffrage ou de la mise en précontrainte, de l'environnement de l'ouvrage.

L'emploi de granulats présentant de bonnes caractéristiques permettra l'obtention de béton de qualité, satisfaisant les critères de maniabilité, d'aspect des parements, de résistances et de durabilité et présentant une bonne constance des caractéristiques.

Les adjuvants sont devenus le quatrième ingrédient du béton, qui viennent de s'ajouter aux trois constituants fondamentaux: le ciment portland, l'eau, les granulats. La liste complète de leurs avantages est impressionnante, tant pour le producteur que pour l'utilisateur de béton. Toutefois, ces avantages sont subordonnés à la bonne utilisation, à la connaissance des effets secondaires et d'autres risques. Un adjuvant ne peut pas compenser un matériau de qualité inférieure, ou un travail mal exécuté.

Aujourd'hui, les normes sur le béton régissent l'emploi et le rôle de ces agents, qui sont devenus partie intégrante de la technologie et de la pratique du béton.



CHAPITRE II

*Influence des constituants
sur la qualité du béton*

Introduction :

Les caractéristiques des différents constituants du béton ont des influences plus ou moins importantes sur les propriétés des bétons. C'est pour cela qu'il faut les connaître pour les prendre en considération dans le calcul de la composition des bétons.

1. Influence du ciment :

L'importance des propriétés normalisées des ciments courants tient à leurs relations, plus ou moins directes, avec les propriétés du béton. Ces dernières dépendent évidemment aussi de nombreux autres paramètres, ce qui oblige à fixer les autres constituants et leurs proportions.

Le ciment est l'élément qui a la plus grande influence sur la qualité du béton.

On peut étudier l'influence des ciments selon leur quantité (dosage) et leur qualité.

1.1. Influence de la quantité du ciment : [4]

La résistance du béton et son ouvrabilité sont proportionnels à la quantité de ciment (dosage).

Ce qu'exprime la formule de DREUX :

$$R_C = G.F_{CE} \cdot \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

Avec :

F_{CE} : classe vraie du ciment choisi à 28 jours.

R_C : résistance moyenne en compression du béton. On a généralement : $R_c = 1,15.f_{c28}$

G : coefficient granulaire qui dépend des granulats choisis. Il est donné dans le tableau II.1

1.2. Influence des différentes qualités du ciment :

1.2.1. Nature ou type du ciment :

Selon sa composition, le ciment appartient à un type ou à un autre. La régularité de la composition assure la régularité de la performance du béton vis-à-vis de la durabilité, toutes les autres caractéristiques du béton étant égales par ailleurs. [7]

Une étude expérimentale de VENUAT (figure II-1) montre l'évolution des résistances en compression d'un béton gâché avec trois ciments de natures différentes.

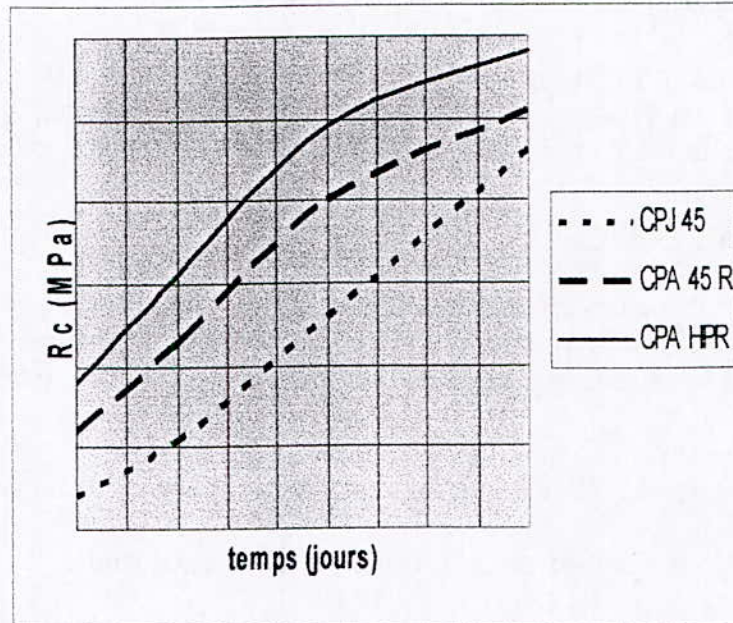


Figure II.1 : Influence de la nature du ciment

D'après VENUAT, plus la teneur en aluminat tricalcique (alite) est élevée, plus le ciment est résistant surtout au jeune âge.

1.2.2. Classe de résistance :

La résistance à la compression d'un béton conservé à 20°C est proportionnelle à la résistance normale du ciment.

Et encore d'après la relation de DREUX, cité précédemment, on confirme cette proportionnalité entre la classe de résistance du ciment et la résistance caractéristique du béton [2].

1.2.3. Temps de début de prise :

Temps de prise, mesuré à 20°C, est en relation directe avec la durée pendant laquelle un béton, à la même température, pourrait être transporté et mis en place [2].

1.2.4. Finesse des ciments :

L'influence des grains fins du ciment est importante aux premiers jours. Ces grains fins (<10 μm) sont plus riches en aluminat tricalcique (ce qui accentue la résistance) et s'hydratent plus vite. Pratiquement les résistances croissent linéairement en fonction de la finesse de mouture aux premiers âges et jusqu'à 7 jours. Au-delà, l'influence de la finesse devient relativement moins importante. La figure II.2 représente l'évolution de la résistance en compression d'un béton en fonction de la finesse du ciment [7].

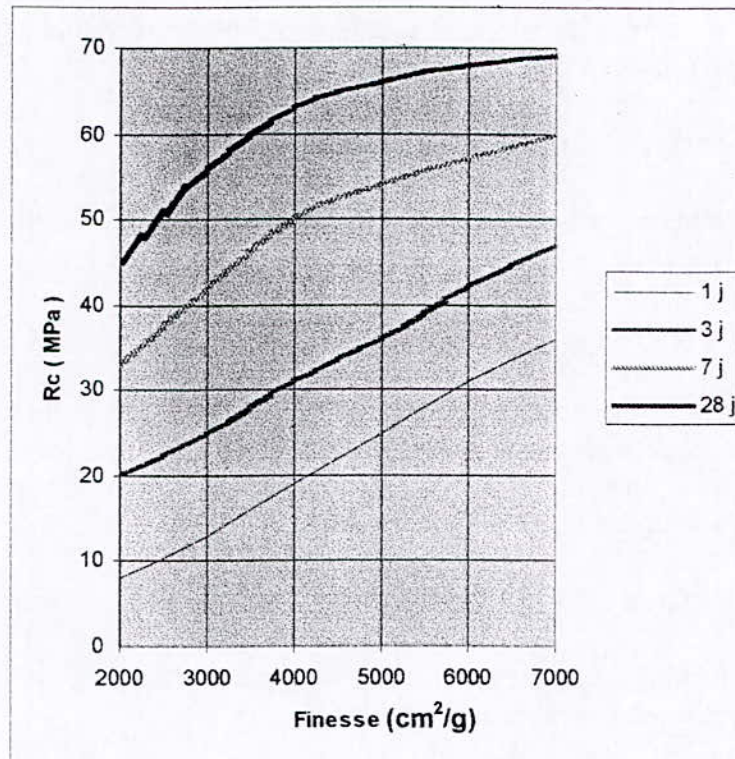


Figure II. 2 : Influence de la finesse des ciments.

1.2.5. Teneur limite en sulfates :

Un excès d'ions sulfates peut provoquer des gonflements par réactions tardives (après prise) avec l'aluminat tricalcique [2].

1.2.6. Indice d'hydraulicité :

La résistance chimique des ciments est d'autant meilleure que leur indice d'hydraulicité est plus élevé, d'où une résistance en compression du béton plus importante [1].

2. Influence des eaux :

L'eau influe principalement sur l'ouvrabilité du béton surtout en terme de quantité. En terme de qualité, on s'intéresse surtout aux influences des impuretés que l'on peut rencontrer dans les eaux.

2.1. Influence de la quantité d'eau E :

C'est tout à fait clair que l'augmentation de l'eau fait augmenter les différents paramètres de la consistance et de l'ouvrabilité (affaissement au cône d'Abrams, étalement à la table à secousse, temps d'écoulement au maniabilimètre,...) [4].

La quantité d'eau n'influence pas seulement le béton frais, mais encore le béton durci. Ce qui a été démontré par DREUX par la formule vue précédemment dans

l'influence du ciment cette formule indique la proportionnalité inverse entre la quantité d'eau E et la résistance caractéristique R_c .

2.2. Influence des qualités de l'eau :

On étudie les principales impuretés rencontrées et leurs actions sur le béton, que se soit frais ou durci [2].

a. Les sulfates :

- En faible proportion : peuvent modifier la prise et le durcissement du ciment et donc modifier les résistances au jeune âge.
- En forte proportion : il y a réaction avec le ciment accompagnée de gonflement préjudiciable à la durabilité du béton.

b. Les chlorures :

Ils peuvent agir comme accélérateur de prise et donc gêner l'ouvrabilité du béton. Il y aura encore une réaction avec le ciment.

c. Les sels :

On peut trouver plusieurs sels dans l'eau. Ils peuvent jouer plusieurs rôles. On distingue :

- Le zinc, le cuivre, le plomb, l'étain et le magnésium : jouent le rôle de retardateurs de prise. A savoir que les chlorures de zinc et de cuivre sont très puissants ; et le nitrate est un puissant inhibiteur de durcissement (arrête le durcissement).
- Les iodates, phosphates, arsénates, borates, nitrates : sont des puissants réducteurs de résistance.
- Les sels de sodium (NaOH) ou de potassium (KOH) : sont des accélérateurs, mais ils réduisent les résistances à 28 jours. Ils peuvent être, en forte proportion, à l'origine de réactions alcalines avec les granulats ou d'efflorescences inesthétiques.

d. Les huiles :

On distingue des huiles organiques ou minérales. Leur effet peut varier selon la proportion trouvée dans l'eau :

- En très faible proportion : leur effet lubrifiant est plutôt favorable à la réduction de l'eau de gâchage et donc à l'augmentation des résistances.
- En plus forte proportion : elles réduisent la liaison entre la pâte et les granulats et font chuter les résistances.

e. Les sucres :

Ils réagissent avec le ciment pour donner des sels de calcium (saccharate de calcium) :

- En faible quantité : ce sont des puissants retardateurs.
- En plus forte proportion : ce sont des inhibiteurs de durcissements.

f. Les détergents :

Ils sont par nature de puissants agents moussants. Même en faible quantité, l'air qu'ils entraînent au malaxage réduit la compacité du béton et donc ses résistances.

g. Les algues en suspension :

Ce sont des produits organiques ayant une puissante action d'entraînement d'air. Ils ont les mêmes influences que les détergents.

h. Les argiles en suspension :

- En raison de leur structure minéralogique, les argiles augmentent la demande en eau des bétons et, en augmentant le rapport E/C, contribuent à réduire les résistances mécaniques.
- En enrobant les granulats, les argiles peuvent également réduire la qualité de la liaison entre la pâte et les granulats et donc réduire les résistances mécaniques.

3. Influence des granulats :

Les caractéristiques des granulats ont une grande influence sur celles des bétons : soit il y a une influence directe sur une propriété particulière du béton, soit il y a une influence sur le rapport E/C nécessaire pour obtenir la maniabilité voulue, avec toutes les conséquences qui en résultent sur la résistance et la durabilité. Pour réduire les coûts on cherche, autant que possible, à utiliser les granulats disponibles localement; dans quelques cas, cependant, le choix peut être orienté par le ou les objectifs techniques comme la maniabilité, l'aspect des parements, les résistances, la durabilité,

3.1. Granularité (G/S) : [4]

Les appréciations concernant cette influence sur les différentes qualités des bétons sont résumées dans le tableau II-1 récapitulant les principales qualités des bétons en fonction de leur G/S dont les indications sont tirées en partie des courbes expérimentales de la figure II.3.

Caractéristique	à G/S élevé par rapport à faible G/S
Ouvrabilité	Moins bonne surtout si $G/S > 2,2$
Résistance en compression	Meilleure surtout si $G/S > 2,2$
Résistance en traction	Sans corrélation apparente
Module d'élasticité	Sans corrélation nette sauf pour le module un plus élevé
Vitesse du son	Sans corrélation très nette
Retrait	Sans corrélation très nette
Compacité, Densité	Légèrement supérieure si $G/S > 2,2$

Tableau II.1 : Influence du rapport G/S sur les qualités du béton.

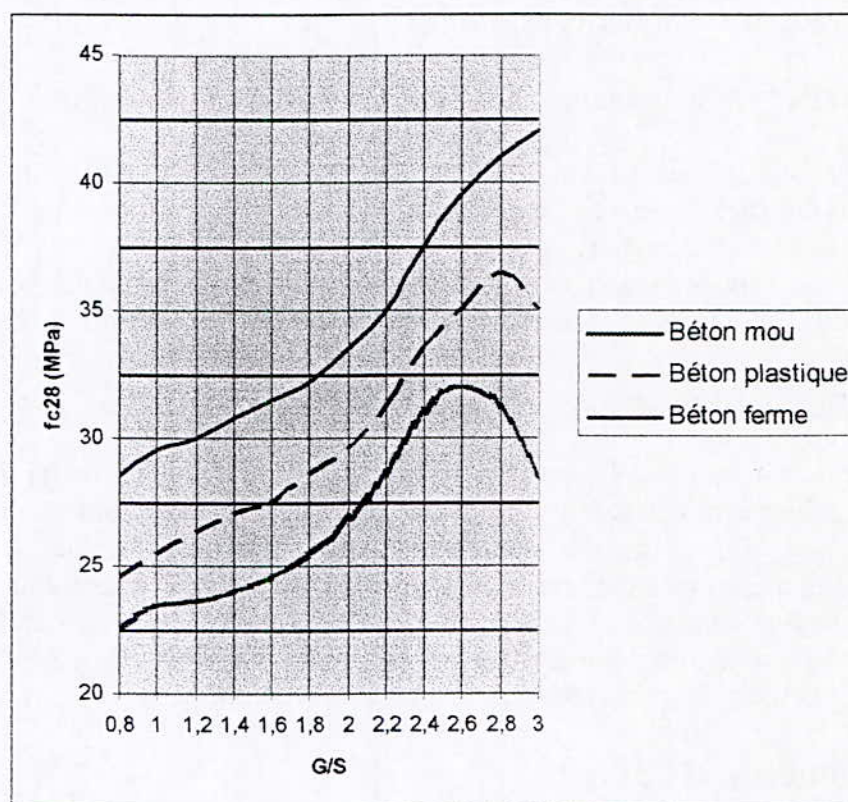


Figure II.3 : Influence du rapport G/S sur la caractéristique du béton.

3.2. Granularité des graviers :

Elle est fixée par le D prescrit ou admissible pour le béton à préparer en fonction de critères liés à la mise en oeuvre (notamment la densité de ferrailage dans les coffrages). Les spécifications fixent les limites pour le passant au tamis intermédiaire $(d+D)/2$ garantissant une continuité suffisante ne nuisant pas à la maniabilité [2].

3.3. Granularité des sables :

C'est l'un des termes les plus importants à considérer dans l'établissement d'une formulation de béton, notamment pour les paramètres suivants :

A. La teneur en fines (Passant à 0,08 mm < 12%) :

Les fines confèrent au béton frais un pouvoir de rétention d'eau qui permet de s'opposer au ressuage et une cohésion qui assure le maintien de l'homogénéité (absence de ségrégation). Leur excès devient défavorable car il accroît la demande d'eau, donc le rapport E/C. Leur absence ne permet pas d'obtenir un béton suffisamment compact et réduit les résistances mécaniques. En ce qui concerne les granulats, seules les fines interviennent sur la couleur du béton [2].

B. Teneur en éléments fins jugés par le module de finesse ($1,8 < M_f < 3,2$) :

Le module de finesse (MF) permet de juger globalement de la granularité d'un sable : un module de finesse élevé indique un sable grossier et un module faible caractérise un sable fin.

Sa valeur dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. La norme, tenant compte des caractéristiques des gisements, fixe les limites à 1,8 et 3,2, mais l'optimum qui donnera le meilleur compromis résistance – maniabilité - maintien de l'homogénéité se situe à $2,5 \pm 0,35$ environ.

C. Continuité et régularité de la granularité :

Une bonne continuité de la courbe granulométrique est nécessaire pour obtenir un béton maniable (norme P 18-541).

3.4. Effet de volume du granulat :

Stock & al ont publié une étude concernant l'effet du volume des granulats sur la résistance à la compression. Cette étude montre que l'assertion selon laquelle la résistance diminue quand le volume de pâte augmente (à nature de pâte constante) est vraie. Ces auteurs ont aussi publié quelques expériences originales dans lesquelles ils ont réalisé une série de bétons avec différents volumes de granulats de même granulométrie, liés par la même matrice [4].

Notons que l'effet du granulat, qui n'est pas monotone, peut être modifié par une augmentation de l'air occlus quand la maniabilité diminue (figure II-4).

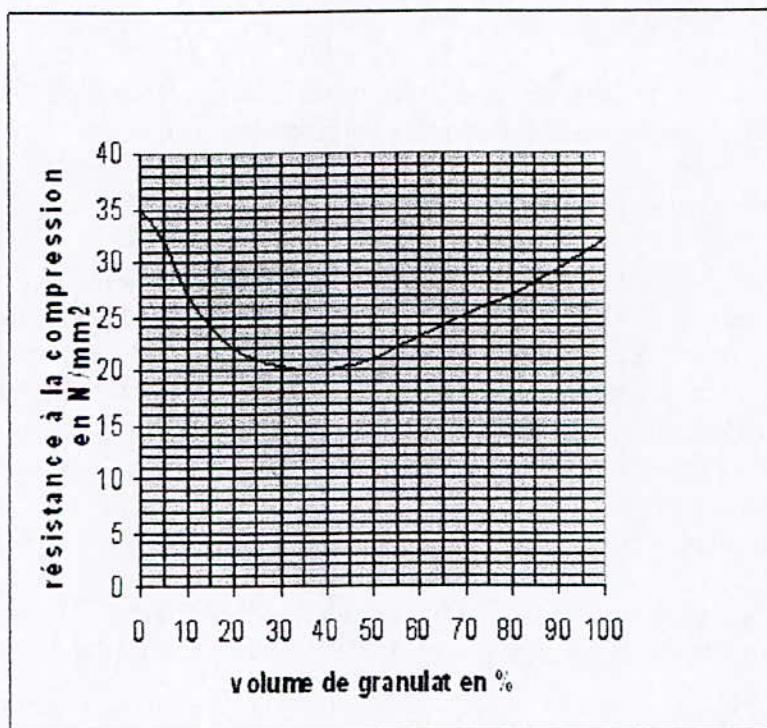


Figure II.4 : Influence de volume des granulats sur la résistance du béton.

3.5. Effet de la taille maximale du granulat :

Dans les années 1960, Walker et Bloem ont publié un article qui suscita à l'époque beaucoup de discussion : la majorité des résultats présentés montraient un effet négatif de la dimension maximale du granulat (D) sur la résistance à la compression, à rapport E/C constant.

Deux causes exercent des effets contradictoires : pour une quantité donnée de ciment, en augmentant D , on tend vers une réduction de la demande en eau, tandis que la résistance obtenue à rapport E/C donné diminue.

Par conséquent, quand le volume du ciment et la maniabilité restent constants, on a un effet du D sur la résistance à la compression qui n'est pas monotone.

Une valeur optimale de la dimension du granulat existe, qui décroît quand la quantité de ciment augmente.

3.6. Coefficient d'aplatissement des gravillons :

C'est une mesure de la quantité d'éléments plats et allongés qui permet de juger de la forme des grains [2].

Une mauvaise forme nuit à la maniabilité, ce qui risque d'être compensé par un accroissement du dosage en eau, et favorise la ségrégation et l'apparition de défauts d'aspect.

3.7. Propreté des granulats :

La pollution des granulats accroît la demande en eau, fait chuter les résistances et plus particulièrement la résistance au jeune âge, augmente les retraits et nuit à la durabilité des bétons. Une variation de la propreté des granulats, par interruption momentanée de lavage par exemple, peut s'accompagner d'une diminution de la résistance de l'ordre de 10 à 15%.

Pour les fillers (correcteurs granulométriques), le critère retenu est la valeur de bleu à la tache V_{Bta} qui est la quantité, en grammes, de bleu de méthylène adsorbé par cent grammes de fillers. C'est une mesure indirecte de la surface spécifique des fillers qui permet de détecter et de qualifier la pollution par les argiles dont la nocivité dépend de la dimension (toujours très fine) des particules (on obtient des valeurs de V_{Bta} de l'ordre de 30 pour une montmorillonite, de 5 pour une illite et de 2 pour une kaolinite).

Pour les sables, le dispositif de contrôle est à double détente. On pratique une mesure d'équivalent de sable (essais de floculation des argiles) et, si le résultat n'est pas conforme, un essai de bleu à la tache (V_{Bta}).

3.8. Absorption d'eau :

C'est une mesure des pores accessibles à l'eau. Une valeur élevée est défavorable pour la durabilité des bétons car elle facilite la carbonatation, la pénétration de l'eau et des chlorures, la dégradation par le gel. Elle nuit aussi au maintien de la maniabilité du béton frais, ce qui peut se compenser par un pré mouillage des granulats.

Une absorption d'eau (porosité) élevée diminue le module d'élasticité et accroît le fluage. Par contre, une très faible absorption d'eau favorise le ressuage.

3.9. Résistance mécanique Los Angeles :

On la mesure, pour les gravillons, par un essai de fragmentation (essai Los Angeles) dont le résultat intervient peu sur les caractéristiques des bétons (sauf pour les bétons à hautes performances). On limite sa valeur pour ne pas risquer d'avoir un mélange dont la granularité pourrait évoluer pendant le malaxage ou le transport, ce qui modifierait les propriétés des bétons.

3.10. Friabilité des sables (alluvionnaires et recyclage) :

La friabilité des sables est une mesure globale d'homogénéité appliquée aux sables alluvionnaires et aux produits de démolition. Une valeur élevée indique de fortes proportions d'éléments tendres ou friables nuisibles à l'aspect des parements et à la durabilité des bétons [8].

3.11. Nature minéralogique :

A. Alkali-réaction :

Il doit être possible de connaître leur teneur en alcalins actifs afin de pouvoir, éventuellement, établir le bilan des alcalins d'une formulation de béton si l'on se trouve en présence de granulats potentiellement réactifs PR ou non qualifiés. Les granulats doivent être qualifiés vis-à-vis de l'alcali-réaction lorsqu'il y a un risque identifié pour l'ouvrage ou l'élément d'ouvrage en béton (tableau II-1, annexe B). À ce titre, on peut préférer à la caractérisation du risque alcali-réaction sur les granulats une mesure sur un béton de composition connue. L'essai de « performance sur bétons », en cours de normalisation au niveau européen, répond à cette préoccupation

B. Impuretés prohibées :

Il s'agit de débris végétaux, charbons, grains légers, etc. déterminés par triage manuel sur tamis. Ces éléments nuisent à la durabilité du béton et à l'aspect des parements.[2].

C. Teneur en soufre total :

Les sulfures (pyrites) présents dans certains granulats (calcaires primaires) peuvent s'oxyder et se transformer en sulfates pouvant donner lieu à des réactions expansives (formation d'ettringite) avec le ciment [2].

Cette oxydation s'accompagne souvent de la production de taches de rouille sur les parements et, lorsque les grains de pyrites sont assez grossiers (millimétriques), de pustules et d'éclatements.

D. Teneur en sulfates :

Les sulfates solubles (gypse, plâtre) en faibles proportions peuvent perturber la prise et modifier les effets des adjuvants (réducteurs d'eau, etc.). Cette action dépend, en fait, de la quantité de SO_3 présente dans le béton, d'où la possibilité offerte par la norme d'accepter une valeur plus élevée que celle qui est spécifiée, sous réserve d'essais performateurs satisfaisants.

La présence de ces sulfates peut également réduire significativement la résistance à l'eau de mer et aux eaux séléniteuses des bétons.

E. Matières organiques dans les sables (test calorimétrique) :

Leur présence peut perturber la prise, faire chuter les résistances, surtout au jeune âge, et donner lieu à des taches sur les parements.

On soumet les sables à un test colorimétrique donnant une réponse par oui ou par non, mais on peut utiliser un sable non conforme (pour des raisons d'approvisionnement) en vérifiant son innocuité par des essais performantiels sur mortier.

F. Chlorures :

Ils modifient la cinétique d'hydratation du liant et favorisent la corrosion des armatures ou des câbles de précontrainte. Les normes fixent donc les limites de la teneur en chlorures des bétons en différenciant les bétons non armés, armés ou précontraints.

Cependant, on admet que le risque est nul pour le béton armé si les granulats renferment moins de 0,06 % d'ions Cl^- . Dans le cas contraire, la teneur en chlorures doit être communiquée par le producteur pour permettre l'établissement du bilan des chlorures dans la formulation des bétons [2].

G. Teneur en éléments coquilliers :

On les rencontre dans les granulats marins. S'ils sont présents en quantité notable, ils nuiront à la maniabilité et causeront un accroissement du dosage en eau.

Dans les sables, le critère d'acceptation est un essai de friabilité.

Conclusion :

En général, les influences des ciments sur la qualité du béton prouvent que les bonnes qualités de ce dernier sont obtenues par augmentation des quantités du ciment. Or, le ciment est le matériau le plus cher parmi les constituants du béton ; et les gens cherchent toujours à construire d'une façon plus économique. Là, pour avoir ce qu'on veut ou un peu de ce qu'on veut, on doit se concentrer de plus sur quelques qualités du ciment en tenant compte de leurs influences de façon à pouvoir diminuer la quantité du ciment.

Ces actions peuvent s'analyser selon trois types :

- des interactions chimiques avec l'hydratation du ciment qui conduisent soit à une modification de la prise (très court terme), soit à une réduction des résistances (moyen terme, signifiant vingt-huit jours), soit à des réactions de destruction (long terme, signifiant quelques années) ;
- des actions de corrosion des armatures ou des câbles de précontrainte du béton ;
- des actions négatives sur la compacité ou la liaison pâte-granat.

L'emploi de granulats présentant de bonnes caractéristiques permettra l'obtention de bétons de qualité, satisfaisant les critères de maniabilité, d'aspect des parements, de résistances et de durabilité et présentant une bonne constance des caractéristiques.



CHAPITRE III
Les méthodes de formulation

Introduction :

La composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités sont elles recherchées pour la construction d'un ouvrage ou d'une partie d'ouvrage. Toute méthode de composition de béton doit être guidée par trois critères essentiels :

- la résistance.
- l'ouvrabilité (facilité de mise en oeuvre).
- La durabilité.

La qualité de béton est liée à l'existence de nombreux paramètres difficilement appréciables. Avant de passer en revue les principales méthodes utilisées, il y a lieu d'examiner les principaux facteurs agissant sur la résistance et l'ouvrabilité des bétons.

1. Expression des quantités et des qualités de chaque constituant :

1.1. Expression des quantités : [9]

Il existe plusieurs méthodes pour exprimer une recette de béton. On peut doser les éléments en volume ou en poids. On peut également exprimer les volumes absolus occupés par chaque constituant pour obtenir 1 m³ de béton frais compacté.

A. Dosage en volume (volume apparent des constituants) :

Le béton sera composé de V_G m³ de gravier + V_S m³ de sable + E litres d'eau + v litre de vide.

Cette façon est peu précise car le volume apparent d'un matériau granulaire dépend de son compactage. Cette méthode de dosage n'est pratiquement plus utilisée vu la précision demandée pour les formulations actuelles.

B. Dosages en poids :

Ce dosage est le plus utilisé actuellement. Les poids des composants sont représentés par : G = poids des graviers sec ; S = poids du sable sec ; C = poids du ciment ; E = poids de l'eau).

1.2. Expression des qualités de chaque constituant d'une formulation :

1.2.1. Gravier et sables : [10]

a. Caractéristiques générales :

- Origine de la roche : qui site la matière première.
- Nature de la roche : le gisement et la composition chimique.
- Mode de préparation : concassage, broyage, criblage...

b. Caractéristiques intrinsèques:

- Masse volumique absolu.
- Masse volumique réelle.
- Los Angeles : pour les graviers et les gravillons.
- Micro Deval Humide.
- Absorption d'eau.
- Porosité.

c. Caractéristiques de fabrication :

- Coefficient d'aplatissement (A).
- Propreté superficielle (P).
- Granularité (courbe granulométrique).

1.2.2. Les ciments : [2]

La qualité du ciment peut être connue par :

- Son nom (CPA, CPJ, CEM, CHF, CLK, CPZ, CLC....).
- Ses résistances mécaniques.
- Son type (portland, portland composé, de haut fourneau, pouzolanique, au laitier et aux cendres...).
- La teneur en clinker.
- Sa composition chimique.
- Temps de prise (début et fin).
- Densité.
- Chaleur d'hydratation.

1.2.3. Les adjuvants :

Les adjuvants sont généralement définies par :

Leurs classes :

- plastifiants,
- fluidifiants,
- entraîneurs d'air,
- accélérateurs,
- retardateurs,
- hydrofuges,
- antigels et antigélifs,

Leur période d'actions principales :

- à l'état frais (fluide).
- Durant la prise.
- Durant le durcissement.
- Après durcissement.

2. Définitions et expressions des cibles à atteindre :

Les normes prévoient 3 cibles (la résistance, la consistance et la durabilité) ; et deux autres exigences intervenant au processus de mise au point de la formulation. Il s'agit de la dimension D max et de la classe d'environnement qui fixe des valeurs maximales pour le rapport pondéral eau/ciment (E/C) et des valeurs minimales pour la teneur en ciment (C) (kg/m³ de béton frais).

2.1. Cibles spécifiées : [9]

2.1.1. La résistance caractéristique en compression :

La première cible spécifiée concerne la "classe de résistance", qui est très importante pour avoir un bon béton, et qui va donner de construction résistante aux différentes sollicitations.

2.1.2. La consistance normalisée :

L'ouvrabilité désigne les caractéristiques du béton frais en relation avec sa fabrication, son transport, sa mise en place, son serrage, son traitement.

Un béton "ouvrable" signifie un béton facile à malaxer, qui ne présente pas de ségrégation pendant le transport, qui se met en place facilement dans le moule ou le coffrage et autour des armatures, qui se compacte facilement, qui ne présente pas de ségrégation ni de ressuage après mise en place, qui fait prise et durcit selon un planning compatible avec la mise en œuvre et la durée prévue de décoffrage, etc.

Les deux essais normalisés les plus courants sont l'essai au cône d'Abrams (Slump test) où on mesure la hauteur d'affaissement d'un cône en béton et l'essai à la table à secousses où l'on exprime l'accroissement de diamètre dû à l'étalement du béton suite à 15 chocs normalisés.

Il existe de nombreux autres essais : essais Vébé, essais au maniabilimètre L.C.P.C. (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris).

2.1.3. La durabilité :

La durabilité des bétons est en relation, d'une part avec la susceptibilité physique et chimique des constituants inertes, hydrauliques et hydratés, et d'autre part avec les possibilités de transport des éléments agressifs à l'intérieur du béton.

La susceptibilité des éléments dépend de leur composition chimique, de leur solubilité et de la forme sous lesquelles ils se présentent.

2.2. Les exigences :

A. Dimension max des granulats « D » :

C'est le diamètre maximum des granulats utilisés dans le mélange à étudier.

B. Classe d'environnement (d'exposition) :

C'est représenté dans la norme NBN B 15-001 par le tableau 1 (annexe C).

2.3. La compacité :

La compacité du béton frais est considéré comme une cible indirecte mais reliée entre autres à la résistance, à l'ouvrabilité, à la durabilité, etc.

Cette compacité est elle-même liée au procédé de mise en œuvre. La cible est la compacité du béton en place et non en laboratoire. Cette compacité est différente de la simple addition (G + S + C) tirée de considération géométrique.

A. La compacité et la résistance :

Si l'on désire une compacité maximum, il s'agit en principe de maximiser (G+S+C). Maximiser le composite revient à ce que les éléments solides occupent le plus grand volume possible dans 1 m³ de béton frais.

Si l'on a un bloc de roche de 1 x 1 x 1m, on a une compacité de 1, un élément à haute résistance mécanique (calcaire : 90 à 120 MPa, ...) et de porosité quasi nulle.

B. La compacité et l'ouvrabilité:

Malheureusement, il s'avère que ce n'est pas la courbe granulométrique du mélange le plus compact qui est le plus "ouvrable". En effet, le mélange le plus compact est tel que chaque grain s'imbrique entre des grains plus gros et que la colle occupe le volume le plus faible. Dans ce système, les grains sont coincés dans l'assemblage et le mélange n'est pas très déformable donc peu "ouvrable".

Il y a donc lieu d'ajouter de la "colle" ou du mélange ("colle" + sable) (mortier) pour rendre aux graviers suffisamment de mobilité.

C. La compacité idéale :

Vu les deux inverses influences précédentes, il faut rechercher un compromis entre la compacité maximale et la compacité donnant une ouvrabilité qui permette au béton de satisfaire à l'exigence "classe de consistance".

Différentes granularités ont été proposées par divers chercheurs pour atteindre cette compacité idéale. Il s'agit de courbes granulométriques qui englobent gravier + sable. Certaines courbes "idéales" reprennent l'ensemble des éléments solides d'une formulation (gravier + sable + ciment).

Il existe encore deux autres possibilités, à savoir l'utilisation de granulométrie discontinue et de granulométrie continue. La granulométrie discontinue donne généralement des bétons plus compacts, plus résistants et moins ouvrables et sont plus sensibles à la ségrégation et au ressuage. La granulométrie continue consomme plus de ciment mais est plus ouvrable.

Equations de quelques courbes granulométriques continues :

a. Courbes granulométriques du gravier et du sable :

➤ Courbes de FULLER :

$$X = 100 \times \sqrt{\frac{d}{D}} \quad \text{Avec : } x = \text{le passant (en \%)} \text{ du mélange pour une dimension (d)}$$

➤ Diagramme de DREUX (inspiré de celui de FAURY)

Cette courbe théorique représente le squelette granulaire le plus compact compte tenu de la dimension D_{\max} , du type de granulat, du dosage en ciment, du type de compactage et d'autres aspects plus particuliers. La courbe théorique (OAB) est composée de 2 segments de droite se coupant au point A sur un diagramme granulométrique ($\sqrt[3]{D}$; passant), les coordonnées des points OAB sont : O = (y = 0; x = 0,08mm); B = (y = 100; x = Dmax); A = (D/2 ; y=50- \sqrt{D} +K). Les valeurs de K sont données au Tableau 2 (annexe C)

b. Courbes granulométriques du gravier + sable + ciment :

➤ Courbes de BOLOMEY :

$$X = A \times (100 - A) \times \sqrt{\frac{d}{D}}$$

x = le pourcentage en poids des grains d'agrégats et de ciment passant au travers de la passoire (d)

$8 < A < 16$ qui dépend de la nature des granulats (roulés ou concassés) et de la classe de consistance choisie. A est choisi en fonction du dosage en ciment.

➤ Courbes de FAURY :

Il s'agit de courbes expérimentales qui tiennent compte de certaines conditions de mise en œuvre (dimension du coffrage, consistance; type de granulat).

La courbe est formée de 2 segments de droites se coupant à A (D/2; Y); l'axe des abscisses est exprimé en $\sqrt[3]{D}$ et l'axe des ordonnées = le passant au tamis (0 à 100 %).

$$Y = A + 17\sqrt[3]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75}$$

$B = 1$ pour une vibration puissante; $B = 1,5$ pour des conditions usuelles de serrage.
 R = "rayon" du moule. Les points extrêmes sont $(O (6,5\mu ; 0)$ et $B (D ; 100))$.
 A est dans le tableau 3 (annexe C).

3. Le paramètre E/C et la résistance en compression :

A. FERET :

En 1896, FERET a établi une relation entre la résistance en compression du béton et la compacité de la pâte de ciment à l'état frais.

$$R_b = K_0 \left[\frac{1}{1 + 3.15 \frac{E}{C}} \right]^2$$

B. BOLOMEY :

$$R_b = K \left[\frac{C}{E} - h_1 \right]$$

K et h_1 dépendent de : la qualité du ciment, l'âge du béton, la forme et la dimension de l'éprouvettes, des conditions de durcissement, de la granulométrie des composants...

C. DREUX :

$$R_b = K_g \times R_c \left[\frac{C}{E} - 0,5 \right]$$

Avec : $0,35 < K_g < 0,65$.

4. Conduite d'une opération de formulation d'un béton : [9]

Il n'y a pas une formulation précise mais un ensemble de formules qui satisfont plus ou moins parfaitement à l'ensemble des exigences de l'utilisateur.

Il y a lieu d'abord de mesurer les caractéristiques des constituants disponibles (granulométrie, propreté, type de grains, teneur en eau des graviers, sables et additions...).

Ensuite, il y a lieu de procéder à des premières formulations au moyen de méthodes décrites ci-après. Finalement, il y a lieu d'évaluer les formulations par des gâchées d'essais.

Il y aura donc lieu de rechercher des relations complémentaires entre les termes de la formulation.

5. Les différents méthodes de formulation :

On distingue des méthodes complètes qui déterminent tous les facteurs au point de vue quantité et qualité ; et des méthodes incomplètes qui ne définissent tous ces facteurs.

5.1. Méthode de CAMPUS :

C'est une méthode incomplète car elle ne détermine pas la qualité des granulats. Mais malgré sa, elle a l'avantage de présenter graphiquement les proportions des constituants et leur significations physiques [9].

5.1.1. Détermination des paramètres de la formulation :

Pour un m^3 de granulat, de porosité P , pris isolément, on a un vide de V_p (m^3) et un volume absolu de granulat de $(1 - V_p) m^3$. Pour $(p) m^3$ de granulat, on a un vide (volume absolu du volume des vides du gravier) :

$$\frac{V_p \times p}{1 - V_p}$$

Il y a lieu de remplir ce vide par un certain volume de mortier ($s + c + e$). On peut utiliser un volume de mortier inférieur (bétons caverneux), égal (béton compact) ou supérieur (béton doté d'une meilleure ouvrabilité). Un excès de mortier permet un déplacement plus aisé des éléments du gravier et augmente l'ouvrabilité.

5.1.2. Cibles à atteindre :

A. Cible résistance :

➤ Selon FERET :

$$R'_b = K \left[\frac{\gamma}{1 + \gamma} \right]^2$$

$$\text{D'où si l'on impose } R'_b, \text{ on aura : } \gamma = \frac{\sqrt{R'_b / K}}{1 - \sqrt{R'_b / K}}$$

➤ Selon BOLOMEY :

$$R'_b = K \left[\frac{C}{E} - 0,5 \right] = K \left[\frac{c \cdot \rho_c}{e \rho_e} - 0,5 \right] = K \left[\gamma \frac{\rho_c}{\rho_e} - 0,5 \right]$$

$$\text{D'où si l'on impose } R'_b \Rightarrow \gamma = \left[\frac{R'_b}{K} + 0,5 \right] \cdot \frac{\rho_e}{\rho_c}$$

B. Cible consistance :

La consistance est fonction du coefficient de remplissage et l'indice de remplissage r . On trouve expérimentalement que, selon le type de béton, ces valeurs se situent dans les gammes suivantes :

Béton	ψ	r
coulant, très	1,8-2,0	1,4..... 1,8
mou ordinaire	1,5	1,0-1,5
sec	1,3-1,4	0,9..... 1,3

Tableau III.1 : la consistance en fonction du coefficient de remplissage et l'indice de remplissage

C. Cible supplémentaire compacité β :

$$\beta = \frac{1 + \mu \cdot r}{1 + r}$$

Si l'on se fixe β , connaissant r , on obtient μ .

5.1.3. Valeurs à introduire dans les équations :

a. Détermination de V_p :

On trouve généralement :

- gravier concassé de calibre assez uniforme : $V_p = 0,5$
- gravier roulé de calibre assez uniforme : $V_p = 0,40$

b. Valeurs généralement trouvées expérimentalement :

- Variation de μ : $0,60 < \mu < 0,75$ (compacité du mortier)
- Variation de β : « 0,82 0,83 »
- Variation de v : 0,02 à 0,01 (sauf si entraîneur d'air).
- Le béton contient environ 10 - 15 % (eau + air).

5.2. Méthode de FAURY :

FAURY signale deux constatations importantes :

A. Pour un béton dont la granulométrie est optimale, on observe que :

$I = \frac{K}{\sqrt[3]{D}}$ Dans le cas où il n'y a pas d'effet de parois. Et dans le cas contraire :

$$I = \frac{K}{\sqrt[3]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

R : le "rayon" du coffrage (rapport du volume de béton et la surface du coffrage+armature).

K' : 0,004 pour un béton mou.

K' : 0,003 pour un béton plastique.

K' : 0,002 pour un béton ferme.

K : fonction de la nature des granulats et des moyennes de serrage de béton. K est donné par le tableau 4 (annexe C).

B. La composition optimale de la fraction solide du béton :

Dans un diagramme granulométrique ($\sqrt[3]{D}$) (pourcentage du constituant solide passant au tamis (d)), la composition optimale de la fraction solide du béton est représentée citée précédemment sur le titre « courbe de FAURY ».

5.2.1. Détermination de D : [2]

- Pour les granulat roulés: $D = \text{Min} (0,9.e ; 0,8.c ; 1,8.r ; 0,25.hm ; 1,2.R)$.
- Pour les granulat concassés: $D = \text{Min} (0,8.e ; 0,7.c ; 1,6.r ; 0,25.hm ; R)$.

Avec:

e : espacement entre deux armatures horizontales.

c : enrobage d'armatures horizontales.

hm : dimension minimale de la paille.

R : rayon moyen du moule.

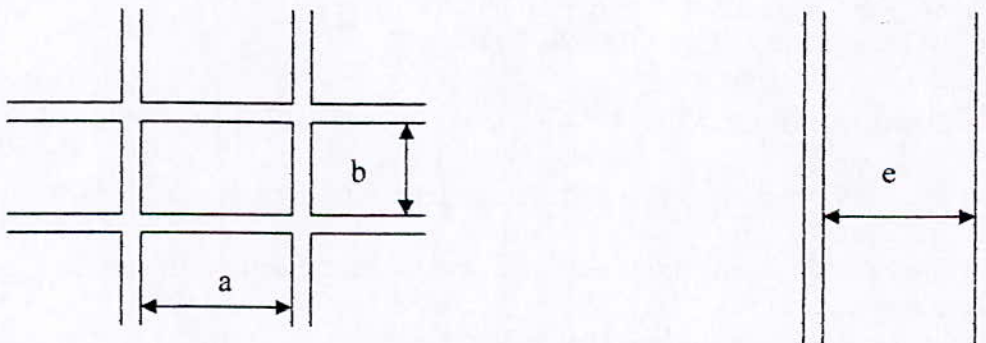


Figure III.1 : paramètre nécessaire pour déterminer D

5.2.2. Graphique du béton de référence :

Comme on a vue les coordonnées de O, A, B, on aura le graphe suivant [3] :

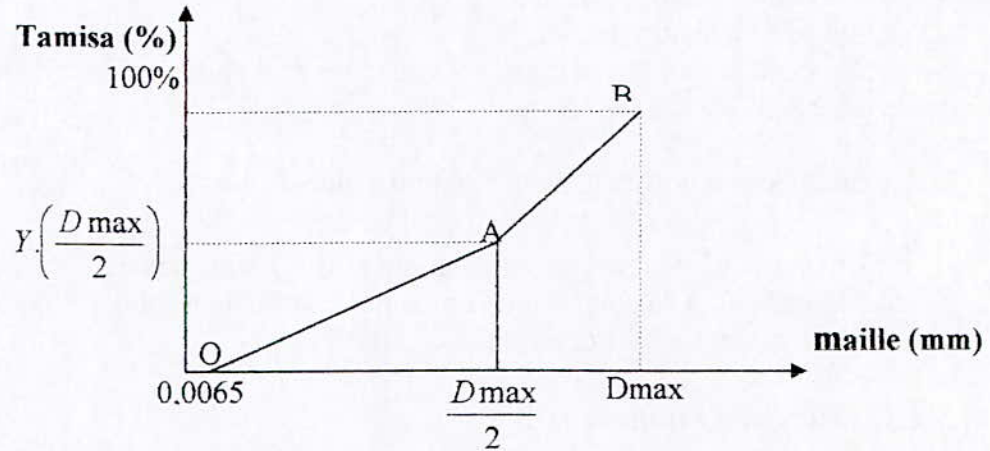


Figure III.2 : courbe de référence.

5.2.3. Détermination de la quantité du ciment et des granulats : [2]

$V_C + V_S + V_g + V_G = 1 - E$ - a (si on ajoute une quantité "a" d'adjuvants, ici a=0).

$V_C + V_S = X/100 \cdot (1-E)$, mais : $V_C = C/\gamma_C$.

D'où :

- $V_S = X/100 \cdot (1-E) - V_C \rightarrow P_S = \rho_s \cdot V_S$
- $V_g = (Y-X)/100 \cdot (1-E) \rightarrow P_g = \rho_g \cdot V_g$
- $V_G = (100-Y)/100 \cdot (1-E) \rightarrow P_G = \rho_G \cdot V_G$

5.2.4. Détermination de "X" et "Y" : [2]

- On trace une première droite verticale de telle sorte à ce que les surface S1 et S2 seront égaux.
- On trace une deuxième droite verticale de telle sorte à ce que les surfaces S3 et S4 seront égaux.
- L'ordonné du point d'intersection de la première droite verticale avec le sagement AB donne la valeur de X.
- L'ordonné du point d'intersection de la deuxième droite verticale avec le sagement BC donne la valeur de Y.

Et on a :

- X% : Pourcentage en volume absolu du sable+ciment.
- (Y-X)% : Pourcentage en volume absolu du gravillon.
- (100-Y)% : Pourcentage en volume absolu du graver.

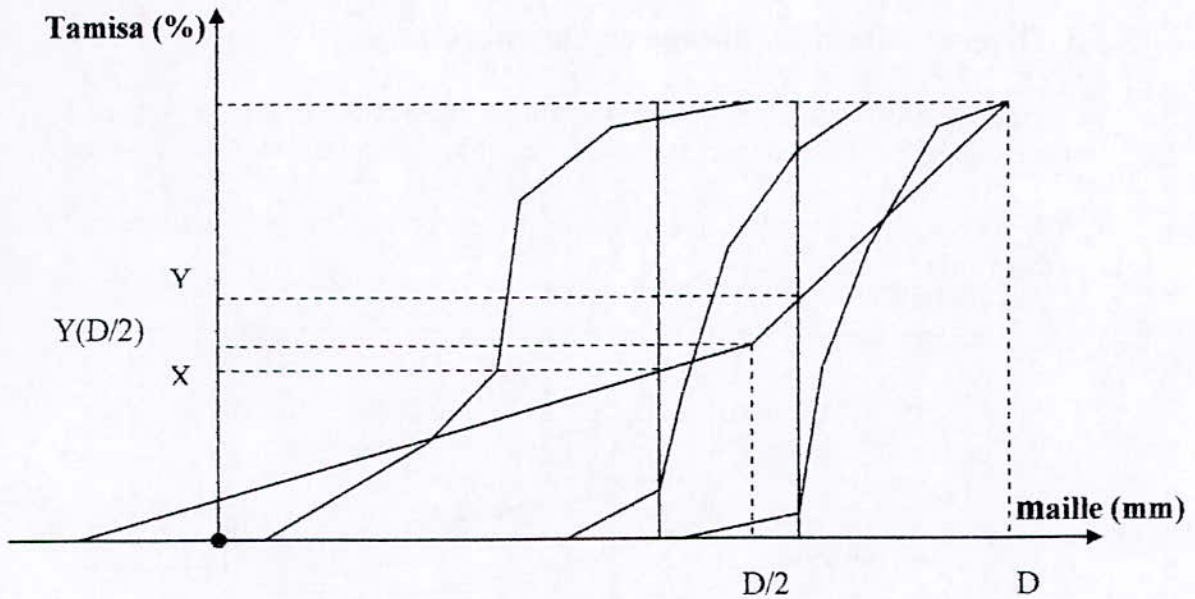


Figure III.3 : détermination de X et Y.

5.3. Méthode de DREUX :

5.3.1. Principe de la méthode :

On décompose l'étude en 2 parties :

- On définit le rapport C/E pour atteindre la cible de résistance.
- On ajuste les paramètres pour avoir une consistance adaptée aux conditions de mise en œuvre choisie.

5.3.2. Détermination du rapport (C/E) :

La résistance est liée à ce rapport par diverses relations, mais ici, on choisit la relation de BOLOMEY :

$$R_e = G.F_{CE} \cdot \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

F_{CE} = la classe vraie du ciment choisi à 28 jours (MPa) ;

R_e = la résistance moyenne en compression du béton ;

On choisit généralement R_c = la résistance caractéristique x 1,15 ;

G = un coefficient granulaire qui dépend des granulats choisis.

G est donné au tableau 4 (annexe C).

5.3.3. Détermination du dosage en ciment (C) :

La quantité de ciment est déterminée via un abaque qui donne le rapport (C/E) en fonction de la valeur de la consistance souhaitée (affaissement sur le cône d'Abrams).

Il y a déjà lieu de vérifier que la valeur (C) est compatible avec les exigences de la classe d'environnement.

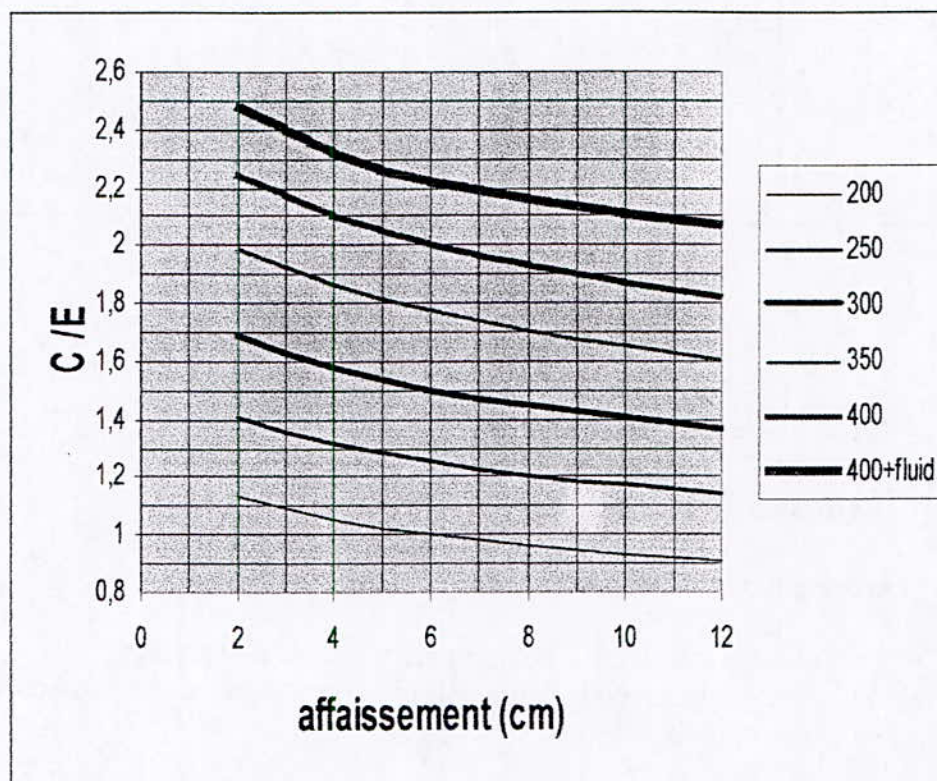


Figure III.4. Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment

5.3.4. Détermination du dosage en eau (E) :

Connaissant C/E et C, on calcule directement E.

5.3.5. Optimisation du squelette granulaire :

Il s'agit de déterminer les proportions relatives du sable et des graviers qui fournissent une courbe granulométrique se rapprochant au mieux d'une courbe théorique.

Cette courbe théorique se ressemble à la courbe de FAURY avec les points O, A, B, définit avant.

5.3.6. Détermination des quantités des granulats :

On peut les déterminer de 2 façons, l'une est graphique et l'autre numérique :

A. Détermination graphique :

- $V_S + V_g + V_G = 1 - E - V_C - a$ (si on ajoute une quantité "a" d'adjuvants, ici $a=0$).
- $V_S = X/100 \cdot (1 - E - V_C) \rightarrow P_S = \rho_S \cdot V_S$.
- $V_g = (Y - X)/100 \cdot (1 - E - V_C) \rightarrow P_g = \rho_g \cdot V_g$.
- $V_G = (100 - Y)/100 \cdot (1 - E - V_C) \rightarrow P_G = \rho_G \cdot V_G$.

Pour déterminer X et Y on procède comme suit :

- On trace une première droite joignant 5 % de passant du gravillon et 95 % du sable. Cette droite coupe OAB en un point dont l'ordonnée représente (X) (le pourcentage volumique du sable (s)).
- On trace une deuxième droite joignant 5 % de passant du gravier et 95 % du gravillon. Cette droite coupe OAB en un point dont l'ordonnée représente (Y).

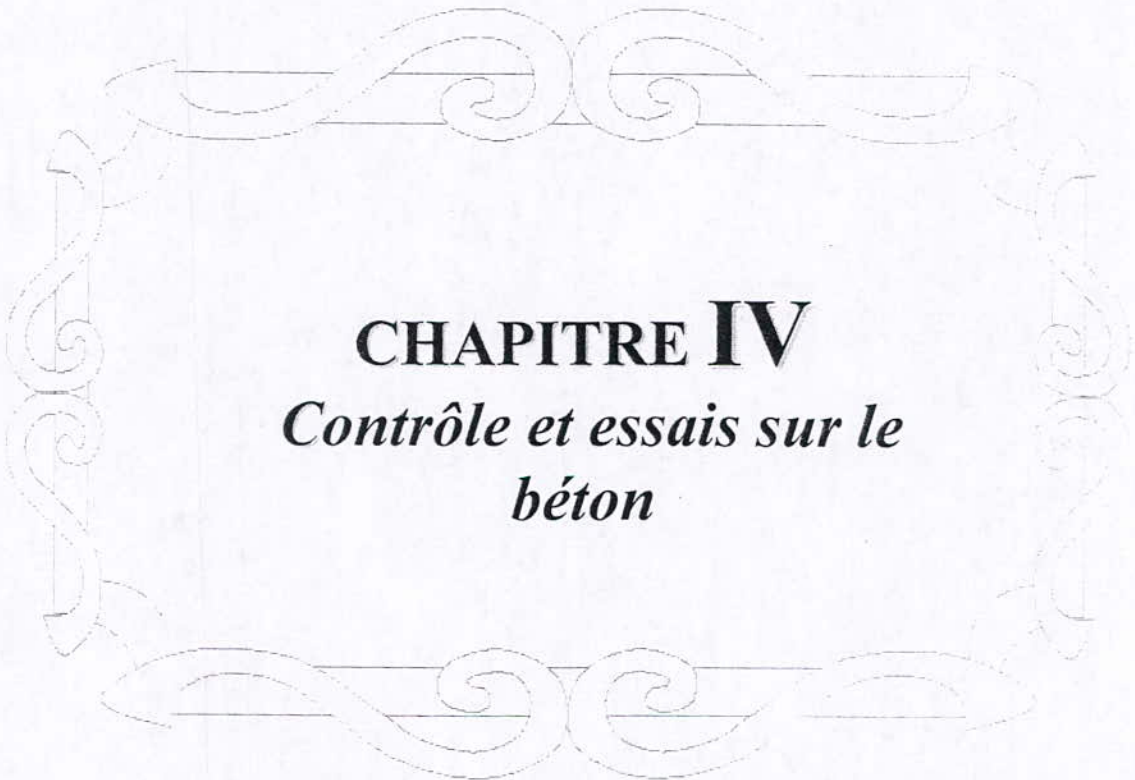
B. Détermination numérique :

Connaissant C, E, et G/S, il est possible de déterminer les autres quantités.

Il est possible d'utiliser le tableau 5 (annexe C) donnant la compacité généralement obtenue pour des bétons normaux en fonction de D_{max} , de la consistance, du mode de serrage, etc. Comme $\gamma = G + S + C$, on peut déduire les quantités des granulats.

Conclusion :

Il y a lieu de souligner que quelque soit la méthode utilisée, celle-ci ne relève pas d'une science exacte et ne peut, à ce titre déterminer à elle, seule les différents dosages de manière absolue c'est pourquoi une étude théorique ne conduit qu'à une approche des problèmes. La solution définitive n'est obtenue qu'après avoir réalisé quelques essais.



CHAPITRE IV
*Contrôle et essais sur le
béton*

Introduction :

Un béton frais au moment du malaxage des constituants est une dispersion de matériaux solides dans un liquide (l'eau).

Comme certains matériaux sont réactifs directement ou indirectement avec l'eau, cette dispersion va évoluer plus ou moins rapidement au cours du temps.

Outre les nombreuses réactions qui se produisent, il faudra aussi tenir compte de réactions physiques entre, d'une part les matériaux de la formulation (par exemple la décantation des granulats), et d'autre part entre les matériaux de la formulation et l'environnement (par exemple évaporation d'une partie de l'eau introduite au malaxage).

Il y a donc lieu de maîtriser l'ensemble des réactions par un choix judicieux de la quantité et de la qualité des constituants du béton et de l'environnement dans lequel les réactions se produisent.

1. Caractéristiques rhéologiques du béton frais :

Le béton frais est une dispersion dans l'eau de particules solides allant de quelques centièmes de microns (fumée de silice) à plusieurs dizaines de millimètres (gros gravier).

Lorsqu'on tente de déformer ce matériau, on constate qu'il ne se comporte pas comme un fluide "parfait" mais qu'il présente des comportements rhéologiques particuliers (seuil de cisaillement,...).

Les mesures classiques de viscosimètre ne sont généralement pas pratiquées sur les bétons mais celles-ci sont remplacées par des mesures "conventionnelles" qui décrivent la facilité avec laquelle un béton peut s'écouler dans un coffrage [9].

Parmi les essais de consistance, on peut citer :

- l'affaissement au cône d'Abrams (Slump test).
- l'étalement à la table à secousses (Flow test).
- Le temps d'écoulement au maniabilimètre.
- l'essai au consistomère Vebé.

2. Les mortiers et bétons frais :

Les mortiers sont des mélanges de pâte de ciment (eau + ciment) et de sable. Les bétons normaux sont des mélanges de pâte de ciment (eau+ciment) +sable + graviers.

Dans un béton à l'état frais, le volume occupé par l'eau, le ciment, le sable et le gravier représente environ 15, 8, 20, 45 %. Comme le sable et le gravier sont en principe inertes, ils n'interviennent pas directement dans les processus chimiques d'hydratation [9].

2.1 Microstructure de l'interface entre la pâte et les granulats :

Même si les éléments du squelette granulaire n'interviennent pas directement dans l'hydratation, leur présence n'est pas neutre vis-à-vis des phénomènes qui se produisent pendant l'hydratation.

2.2 Effet purement physique :

Les éléments pierreux vont influencer la position des grains de ciment dans le mélange. A proximité des granulats et par effets de parois, la "densité volumique"-des grains est plus faible, donc le rapport E/C est plus élevé, donc la structure formée sera différente de celle formée à plus longue distance des granulats. S'il y a plus d'eau à proximité des granulats, il y a plus de place disponible pour la précipitation des espèces les plus mobiles. On constate davantage de cristaux de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à proximité des granulats.

2.3 Effets physico-chimiques :

La présence des graviers peut influencer la micro structure de la pâte de ciment, en agissant sur la précipitation des cristaux via la "présence" de germes qui vont favoriser la création et le développement des espèces cristallines.

D'autre part, vu la composition chimique de la pâte de ciment et son pH élevé, le fluide interstitiel pourrait réagir chimiquement avec des éléments de gravier. Les graviers calcaires sont moins "inertes" que les graviers siliceux à ce genre de sollicitations chimiques.

3. Vérification de la consistance et de la maniabilité :

Il s'agit là, de la partie essentielle dans l'ensemble du contrôle du béton.

En effet, une bonne maniabilité procure à la fois une garantie de mise en œuvre satisfaisante et une garantie de qualité du béton durci par la maîtrise du dosage en eau.

Rappelons tout d'abord, les facteurs principaux influençant la maniabilité :

- granulométrie, surtout pour les éléments fins,
- dosage en ciment,
- dosage en eau...

Nous nous intéressons ici au contrôle du béton frais, à sa sortie du mélangeur et, de ce fait, c'est sur le dernier point concernant le dosage en eau qu'il est encore possible d'agir. On pense d'ailleurs, souvent, que c'est le seul paramètre influençant la maniabilité.

La fluidité augmente avec le dosage en eau, mais pas la maniabilité ; avec une trop grande quantité d'eau, le pouvoir moulant du béton diminue également. A l'opposé, avec un béton trop sec, le remplissage des coffrages et l'enrobage des armatures sont mauvais [11].

En conclusion, il y a une consistance optimale à déterminer et à maintenir constante pendant toute la durée du bétonnage.

3.1. Mesure de la consistance et de la maniabilité :

Nous nous contenterons volontairement d'indiquer quelques types de mesure, les plus couramment employés aujourd'hui.

Il importe surtout d'être décidé à réaliser quelques essais pour s'assurer d'une bonne maniabilité et de sa régularité [11].

3.1.1. Affaissement au cône d'Abrams ou slump-test :

C'est de loin la mesure de consistance la plus employée et la plus connue. C'est un essai essentiellement statique et assez limité dans sa plage de mesure pour les bétons très secs et pour les bétons très fluides.

La valeur de l'affaissement est exprimée en centimètres, k titre indicatif, avec un béton dont la composition doit procurer la meilleure maniabilité, l'affaissement au cône sera de 8 à 12 cm pour du béton vibré destiné au bâtiment courant.

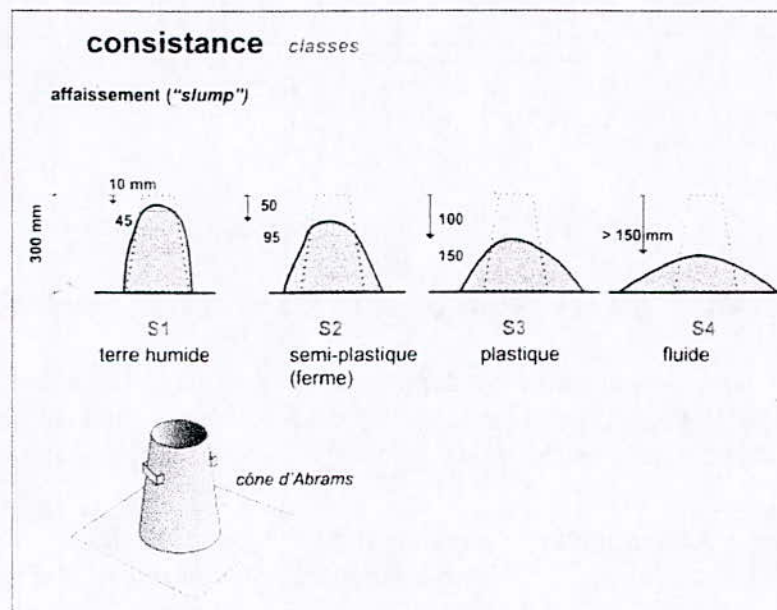


Figure IV.1. Affaissement au cône d'Abrams

3.1.2 Maniabilité au Maniabilimètre L.C.P.C :

Conçu initialement pour optimiser le rapport : $S/(S+G)$

Il est utilisé de nos jours dans le contrôle du béton des ouvrages d'art et du béton de route.

Il se compose d'un bac métallique assez massif sur lequel est fixé un vibreur. Le volume de 30 litres de béton placé dans le bac est mis en vibration et la maniabilité est donnée par le temps d'écoulement nécessaire pour atteindre un certain repère. Plus le temps est court, plus le béton est maniable [11].

3.1.3 Etalement à la table à secousses :

Cet essai (flow-lest) est une mesure testant plus particulièrement l'aptitude du béton à s'étaler par écoulement libre et n'est pas à notre avis un test parfaitement représentatif de l'ouvrabilité, en effet il donne des valeurs faibles pour les bétons présentant une bonne cohésion (ce qui est pourtant une qualité quant à l'ouvrabilité) et donne en revanche des valeurs plus élevées lorsque le béton a tendance à la ségrégation.

L'essai s'exécute sur une table à laquelle on imprimait des secousses verticales (élévation suivie d'une chute de 12 mm) à l'aide d'une came commandée par une manivelle. En utilisant un tronc de cône de béton ($D_0 = 25$ cm; $d_0 = 17$ cm; $h = 12,5$ cm) [1].

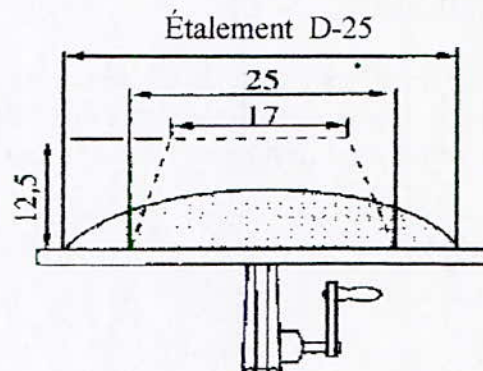


Figure IV.2. Etalement à la table à secousse.

3.2. Relation entre divers essais de consistance et de l'ouvrabilité : [9]

A titre indicatif, le tableau IV-1 donne une relation entre divers essais de consistance et de maniabilité. Il n'est bien entendu qu'indicatif puisque la maniabilité change suivant plusieurs paramètres (angularité, dosage en ciment...) pour un même affaissement au cône.

Consistance	Affaissement (mm)	Etalement à la base à secousse (%)	Nombre de secousses au test C.E.S	Temps d'écoulement au maniabilimètre sec
Ferme	1 à 4	20 à 50	70 à 30	≥ 25
Plastique	5 à 9	50 à 70	30 à 15	5 à 25
Molle	10 à 15	70 à 100	15 à 5	-
Liquide	16	100 à 160	5	≤ 5

Tableau IV.1 : correspondance entre différentes valeurs de consistance et de maniabilité.

3.3. Etude de comparative :

Catégorie d'essai	Désignation de l'essai	La mesure porte sur :	Nature de l'essai	Utilisable sur :
Essai d'affaissement	Affaissement au cône d'Abrams	L'affaissement de S cm après avoir retiré le cône. (NF p 18 451).	Statique	Chantier
Essai de serrage, d'écoulement, et d'étalement	Degré de tassement sous charge à l'appareil de Fritsch.	Le degré de tassement sous charge. les résultats sont en rapport avec l'essai de Walz.	Dynamique	Laboratoire
	Temps d'écoulement au maniabilimètre de Lesage LCPC	Le temps (s) nécessaire au béton pour s'écouler après départ de la trappe pour atteindre un niveau repéré à l'autre extrémité du moule.	Dynamique	Laboratoire et chantier
	Remplissage du béton dans le moule. C.E.S placé sur la table du Flow-Test.	Le nombre de secousses nécessaires pour que le parement derrière la vitre soit bien rempli par le béton placé derrière un ferrailage-type.	Dynamique	Laboratoire et chantier
	Écoulement, (Flow-Test) à la table de Graf.	Le diamètre (cm) de la galette de béton après démoulage et 15 secousses. (DIN 1048.)	Dynamique	Laboratoire et chantier
Essai de cisaillement	Indice de viscosité ou de cisaillement au plasticimètre à palette (Indumat)	La résistance rencontrée par les palettes lorsqu'on fait tourner la tige – support par l'intermédiaire d'un ressort spiral intérieure	Statique	Chantier

Tableau IV.2 : Différents procédés de mesure de consistance et de maniabilité.

4. Etude mécanique du béton :

Le but est de déterminer la résistance mécanique du béton vis à vis de la compression et de la traction. Ces essais de résistance sont nécessaires pour vérifier si la composition du béton utiliser aboutie aux caractéristiques mécaniques recherchées [1].

4.1. Définition de la résistance mécanique du béton :

4.1.1. Résistance à la compression :

La résistance du béton à la compression est obtenue par l'écrasement des éprouvettes cylindriques (compression uniaxiale suivant la génératrice de l'éprouvette) dans des presses mécaniques.

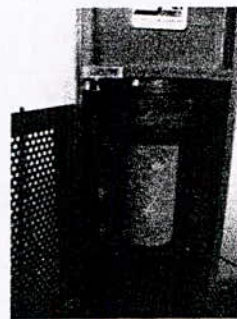


Figure IV.3 : Ecrasement d'éprouvette.

Chaque résistance est relative au jour « j » de l'écrasement. Comme les expériences ont montré que la résistance du béton à la compression à partir de 28 jour se stabilise à la valeur $\approx \sigma_{c28}$, alors on admet que :

$f_{c28} = \sigma_{c28}$: Résistance caractéristique du béton à la compression

$$f_{cj} = \sigma_{cj} = 0.685 * f_{c28} * \text{Log}(j+1) \quad j < 28 \text{ jours}$$

$$f_{cj} = \sigma_{cj} = f_{c28} \quad j > 28 \text{ jours}$$

4.1.2. Résistance à la traction :

La résistance du béton à la traction est obtenue par 3 types d'essais :

A. Essai de traction directe « σ_{tj1} » :

On colle les deux bases de l'éprouvette cylindrique aux deux têtes métallique de l'appareil et la fait tendre. Cet essai est très délicat.

La valeur de la résistance à l'âge « j » est donné par :

$$\sigma_{tj1} = N / (\pi * D^2 / 4)$$

Avec :

N : effort mesuré à la rupture.

D : diamètre de l'éprouvette = 16cm.

B. Essai de traction par fendage (essai brésilien) « σ_{t2} » :

Il consiste à comprimer une éprouvette cylindrique entre deux plateaux d'une presse parallèle à la génératrice de l'éprouvette.

La valeur de la résistance à l'âge « j » est donné par :

$$\sigma_{t2} = 2 \cdot N / (\pi \cdot D \cdot L)$$

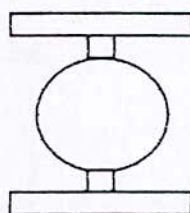


Figure IV.4 : traction par fendage.

Avec :

N : charge mesurée à la rupture.

D : diamètre de l'éprouvette = 16cm.

L : hauteur de l'éprouvette = 32cm.

L'expérience a montré que : $\sigma_{t1} / \sigma_{t2} = 1 \Rightarrow f_{tj} = \sigma_{t1} = \sigma_{t2} = 2 \cdot N / (\pi \cdot D \cdot L)$

C. Essai de traction par flexion « σ_{t3} » :

C'est l'essai le plus utilisé couramment, réalisé sur les éprouvettes prismatiques.

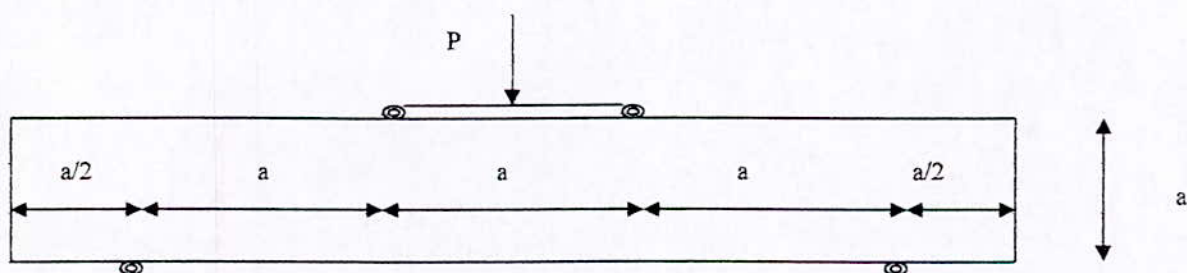


Figure IV.5 : Traction par flexion.

La contrainte de traction par flexion dans la fibre la plus tendue à l'âge « j » est donnée par :

$$\sigma_{tj3} = M \cdot V / I$$

M : moment de flexion.

$$V = a/2$$

I : moment d'inertie de la section droite de l'éprouvette = $a^4/12$

$$\Rightarrow \sigma_{tj3} = 6 \cdot M / a^3$$

Les expériences ont montré que :

$$\sigma_{tj1} / \sigma_{tj3} = (0,55 \text{ à } 0,65) \rightarrow \text{le régallement retient : } \sigma_{j1} / \sigma_{tj3} = 0,6 \Rightarrow \sigma_{tj1} = 0,6 \cdot \sigma_{tj3} = 3,6 \cdot M / a^3$$

On prend la valeur moyenne entre les deux essais :

$$\Rightarrow \sigma_j = (\sigma_{tj2} + 0,6 \cdot \sigma_{tj3}) / 2 = [2 \cdot N / (\pi \cdot D \cdot L) + 3,6 \cdot M / a^3] / 2$$

La résistance caractéristique du béton à la traction à 28 jours sera :

$$f_{t28} = \sigma_{t28} = [2 \cdot N / (\pi \cdot D \cdot L) + 3,6 \cdot M / a^3] / 2$$

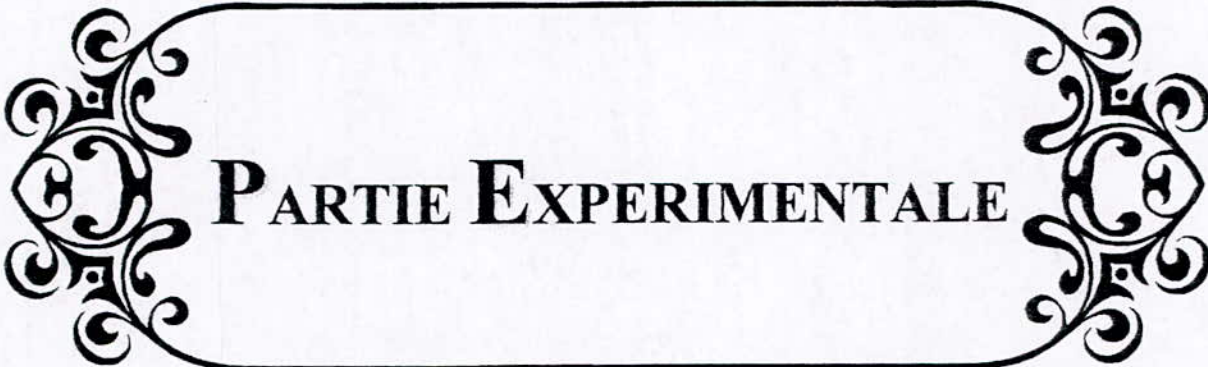
La résistance à la traction du béton est liée à la résistance à la compression par la relation :

$$f_{t28} = 0,6 + 0,06 \cdot f_{c28}$$

Conclusion :

Un bon béton est celui qui est bon à l'état frais et à l'état durci. Ce qui veut dire que le bon béton a une bonne ouvrabilité et de bonnes résistances mécaniques.

Mais ces deux qualités sont influencées par le rapport E/C et de deux façons différentes qui sont inverses. C'est pour cela qu'on a pensé, dans les méthodes de composition des bétons, à trouver E/C convenable qui donne les bonnes qualités du béton.

A decorative horizontal frame with rounded ends, featuring intricate scrollwork and floral patterns on both the left and right sides. The frame encloses the text "PARTIE EXPERIMENTALE".

PARTIE EXPERIMENTALE



CHAPITRE V

Approche expérimentale

Introduction :

L'objectif de ce travail étant d'observer et si possible de quantifier les influences des différents minéraux des granulats sur la qualité du béton, qu'il soit frais ou durci, nous avons choisi de ne faire varier que le type de granulats.

Les autres paramètres comme le ciment et l'eau (le rapport C/E) ont été fixés pour tous les mélanges. Initialement, les bétons testés étaient prévus pour être réalisés en fixant E et C (E/C), et en utilisant des sables et graviers de même provenance et de même nature minéralogique pour chaque mélange. Mais un problème de manque de sables au centre du pays ne nous a pas permis d'utiliser les sables prévus. On a donc utilisé les sables disponibles, qui étaient soit trop gros, soit trop fins, en y apportant des corrections. Le représente la courbe granulométrique du sable utilisé, qui se rapproche du fuseau de référence.

L'étude a porté sur l'influence des granulats sur les deux principales qualités recherchées pour un béton au moment de sa réalisation : l'ouvrabilité et la résistance.

Ce sont donc des mesures d'ouvrabilité qui ont été effectuées au laboratoire de génie civil de l'E.N.P. , les essais d'écrasement et les tests d'identification des matériaux ayant été faits au laboratoire du L.N.H.C. de Oued Smar, et les analyses chimiques au C.E.T.I.M. de Boumerdes.

1. Variables de l'étude :

On a confectionné 3 bétons différents,

- avec 3 types de gravier:
 - Graviers de LAKHDARIA;
 - Graviers de SI MUSTAPHA;
 - Graviers de SETIF.
- 2 sables :
 - l'un provenant de Bou-Saada : sable fin, de couleur jaune;
 - l'autre provenant de Baghliia: sable grossier, de couleur noire.
- Le ciment utilisé était un ciment Portland CPJ-CEM II de classe 42,5.

Dans ce cadre:

- Dix huit éprouvettes cylindriques (16×32) cm ont été confectionnées, soit 6 pour chaque type de béton, pour la mesure de la résistance à la compression simple R_c et le tracé de la courbe contrainte- déformation,
- Et neuf éprouvettes prismatiques (7×7×28) cm pour l'essai de traction par flexion.

Le chargement a été effectué progressivement jusqu'à la rupture.

2. Tests d'identification des matériaux :

Chacun des constituants du béton influence sur ses qualités d'une façon ou d'une autre. Et pour chacun, plusieurs paramètres rentrent dans ces influences.

Parmi ces constituants, les granulats ont une grande influence sur les qualités du béton, qu'il soit frais ou durci.

Donc pour connaître ces influences, on doit déterminer, comme une première démarche, les propriétés et les caractéristiques (intrinsèques et de fabrication) des granulats en effectuant quelques essais d'identification.

2.1. Caractéristiques intrinsèques :

Les caractéristiques dites « intrinsèques » des granulats sont les caractéristiques indépendantes de leur mode de fabrication. Nous avons mesuré les caractéristiques les plus influentes.

Ce sont :

- La masse volumique apparente ou densité apparente mesurée avec un récipient pour les graviers et les sables (voir photo V.1) ;
- La masse volumique absolue ou densité absolue mesurée à l'aide d'un pycnomètre pour les graviers et les sables (voir photo V.2) ;
- Le coefficient d'absorption d'eau pour les graviers et les sables ;
- Le coefficient Los Angeles mesuré avec la machine Los Angeles pour les graviers seulement (voir photo V.3) ;
- Le coefficient microDeval mesuré sur la machine Micro Deval pour les graviers seulement (voir photo V.4).



Photo V.1 : Récipient

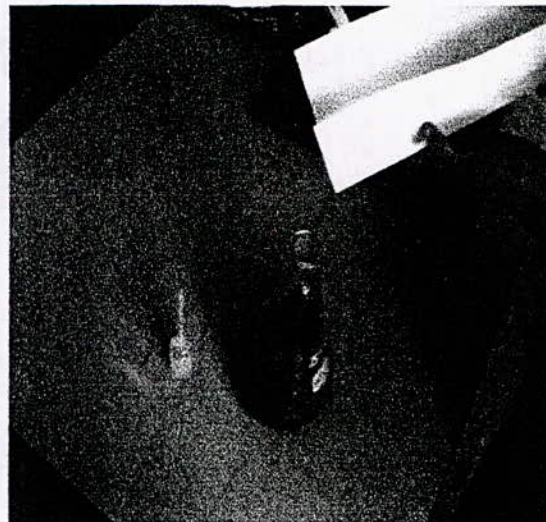


Photo V.2 : Pycnomètre

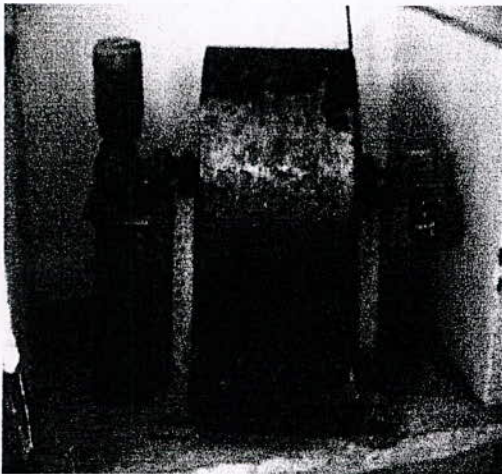


Photo V.3 : Los Angeles

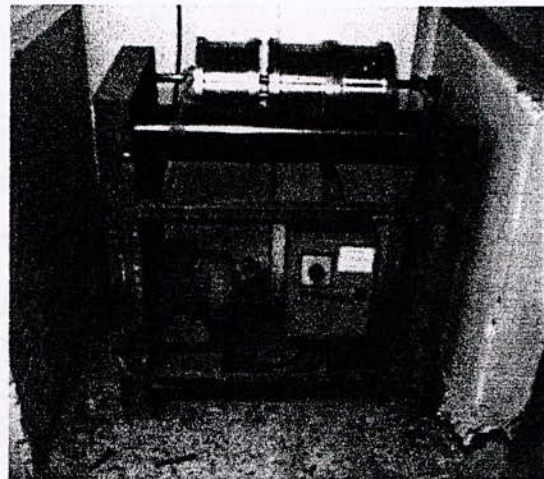


Photo V.4 : Micro Deval

L'analyse chimique des graviers de Lakhdaria et de Sétif a été effectuée. Pour les graviers de Si Mustapha, les valeurs données par la fiche technique de l'entreprise (E.N.G.) ont été admises.

2.2. Caractéristiques de fabrication :

Ces caractéristiques sont :

- Analyse granulométrique avec des tamis et la balance (voir photo V.5).
- Module de finesse des sables.
- Equivalent de sable (voir photo V.6).
- Valeur au bleu méthylène.

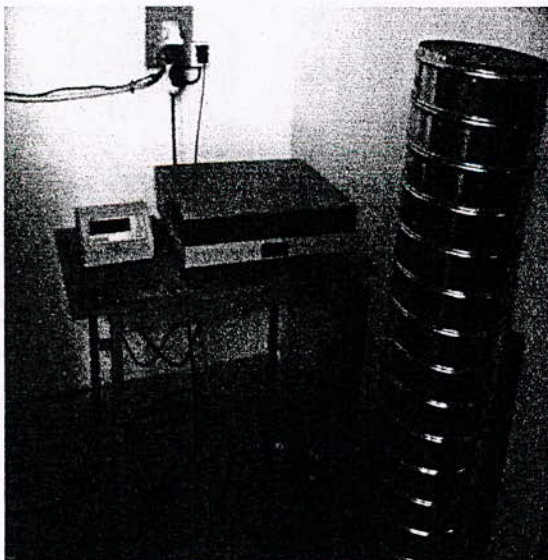


Photo V.5 : Tamis et balance électronique



Photo V.6 : Equivalent de sable

L'ensemble des valeurs mesurées pour les graviers est présenté dans les 2 tableaux suivants.

Caract. mesurée	Gravier de Lakhdaria	Gravier de Si Mustapha	Gravier de Sétif
Densité apparente	1.35	1.30	1.45
Densité absolue	2.59	2.60	2.59
Coef. d'absorption	1.75	2.09	2.17
Coef. Los Angeles	20.30	38.70	25.96
Coef. microDeval	31.80	29.40	21.60

Tableau V.1 : Récapitulatif des valeurs de caractéristiques mesurées des graviers

Analyse chimique:

Composantes	Gravier de Lakhdaria	Gravier de Si Mustapha	Gravier de Sétif
SiO ₂	62.89	60.70	1.42
Al ₂ O ₃	16.64	15.93	0.30
Fe ₂ O ₃	3.58	5.89	0.16
CaO	4.95	6.10	54
MgO	1.815	-	0.67
SO ₃	0.119	0.23	0.10
K ₂ O	3.169	3.96	0.1
Na ₂ O	3.136	2.74	0.05

Tableau V.2 : Récapitulatif des analyses chimique des graviers

L'ensemble des valeurs mesurées pour les sables est présenté dans le tableau suivant.

Caract. mesurée	Sable de Bousaada	Sable de Baghlia
Densité apparente	1.52	1.47
Densité absolue	2.62	2.62
Module de finesse	0.74	3.92
Equivalent de sable(%)	61.44	75.45
Valeur au bleu	0.22	-

Tableau V.3 : Récapitulatif des valeurs de caractéristiques mesurées des sables

3. Analyses granulométriques :

L'analyse granulométrie étudie la taille des particules d'un granulat et a pour but de déterminer le pourcentage de ces différentes tailles de particules constituant l'échantillon de granulat, afin de pouvoir établir la courbe granulométrique qui nous donne pour chaque diamètre d , le pourcentage des particules de dimension inférieur ou égale à d .

3.1. Analyse granulométrique des sables

Après avoir joué sur les pourcentages des deux sables, on a trouvé qu'il faut 55% de sable gros et 45% de sable fin pour avoir le meilleur sable de module de finesse de 2,49.

Mailles de tamis en (mm)	Analyse granulométrique		
	Sable fin	Sable gros	Sable retenu
10	-	98	98.9
8	-	95.5	97.5
6,3	-	90.1	94.5
5	-	83.5	90.9
4	-	74.4	86.47
2.5	-	60	78
1.25	100	40	67
0.63	99.65	19.35	55.48
0.315	91.25	4	43.26
0.16	35	2.75	17.26
0.08	2	1	1.45

Tableau V.4 : Analyse granulométrique des sables

Fig. V.1 : courbe granulométrique de sable fin

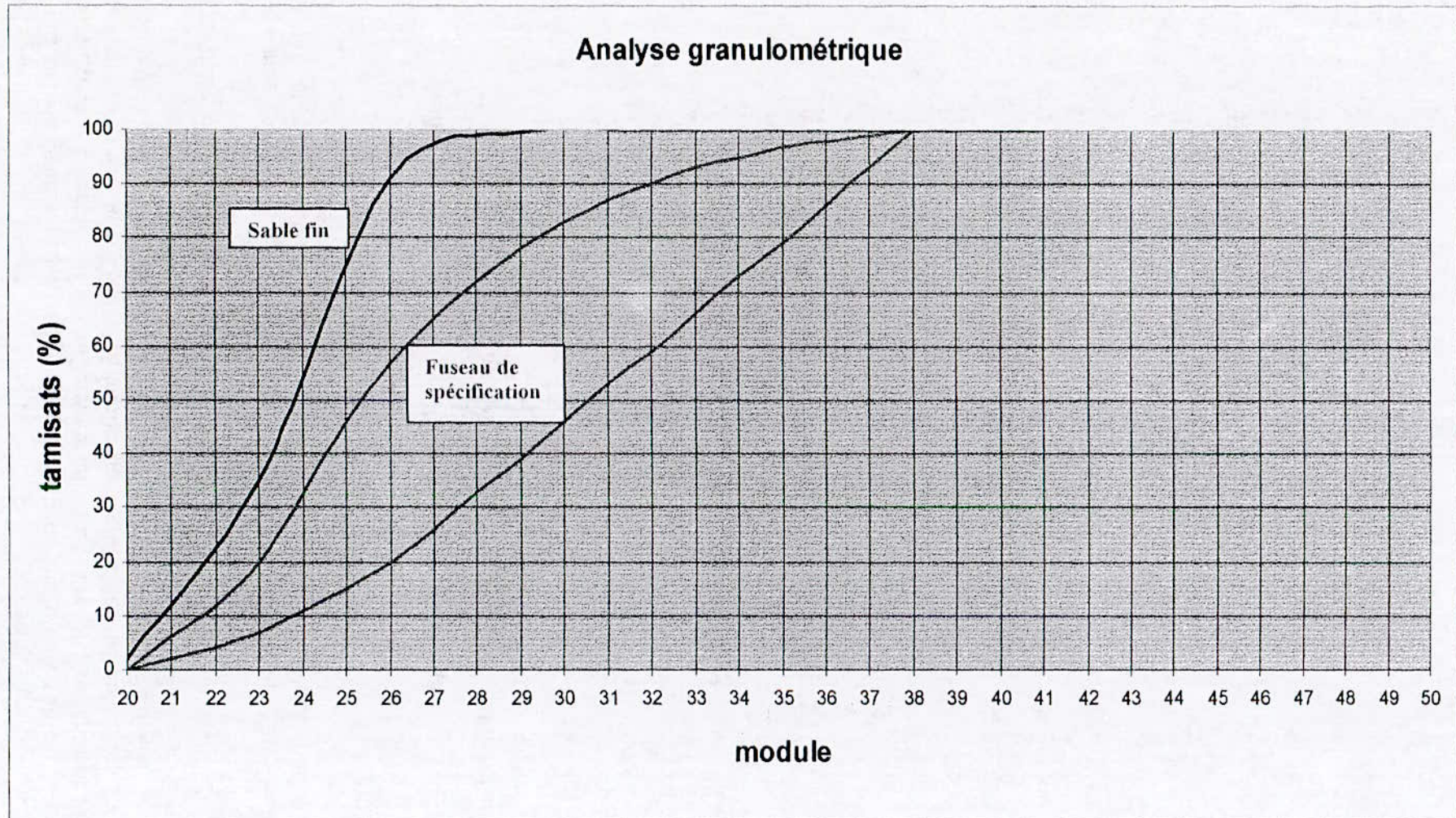


Fig. V.2 : courbe granulométrique de sable grossiers

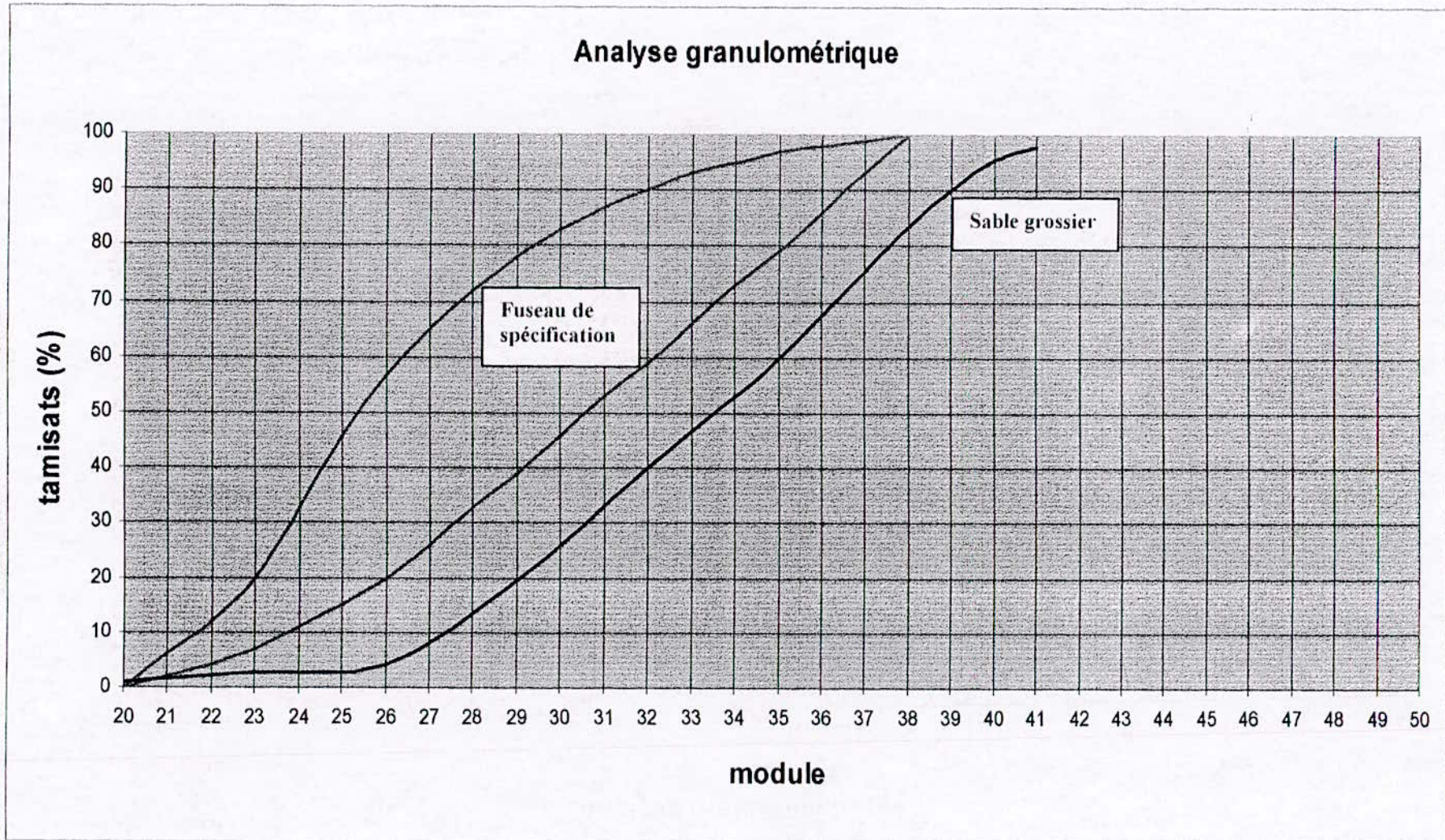
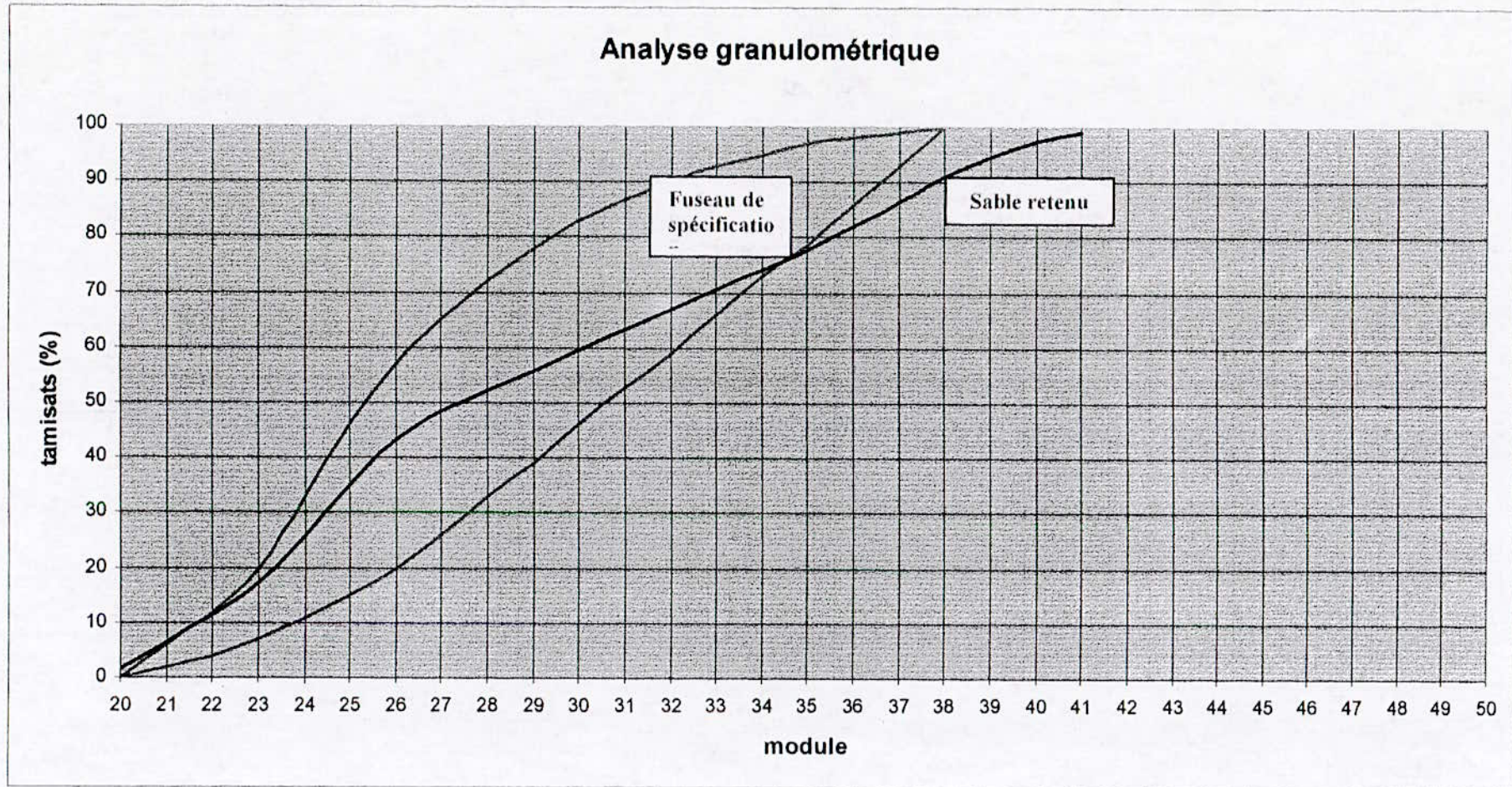


Fig. V.3 : courbe granulométrique de sable retenu



3.2. Analyse granulométrique des graviers

Mailles de tamis en (mm)	LAKHDARIA		SI-MUSTAPHA		SETIF	
	8/15	15/25	8/15	15/25	8/15	15/25
25	-	100	-	100	100	100
20	100	86.6	100	79.32	99.57	93.64
16	96.16	36.26	99.47	25	94.63	44.1
14	83.03	10.72	95.55	10	83.87	12.38
12.5	65.73	3.68	89.83	2.5	65.83	4.26
10	36.53	1.02	72.45	0.9	37.57	0.9
8	14.56	0.6	49.03	0.38	15	0.54
6,3	4.36	0.56	24.6	0.3	3.97	0.46
5	1.53	-	9.12	-	0.8	-
4	0.83	-	4	-	0.34	-
2.5	-	-	2	-	-	-

Tableau V.5 : Analyse granulométrique des graviers

Fig. V.4 : courbe granulométrique des graviers de Lakhdaria

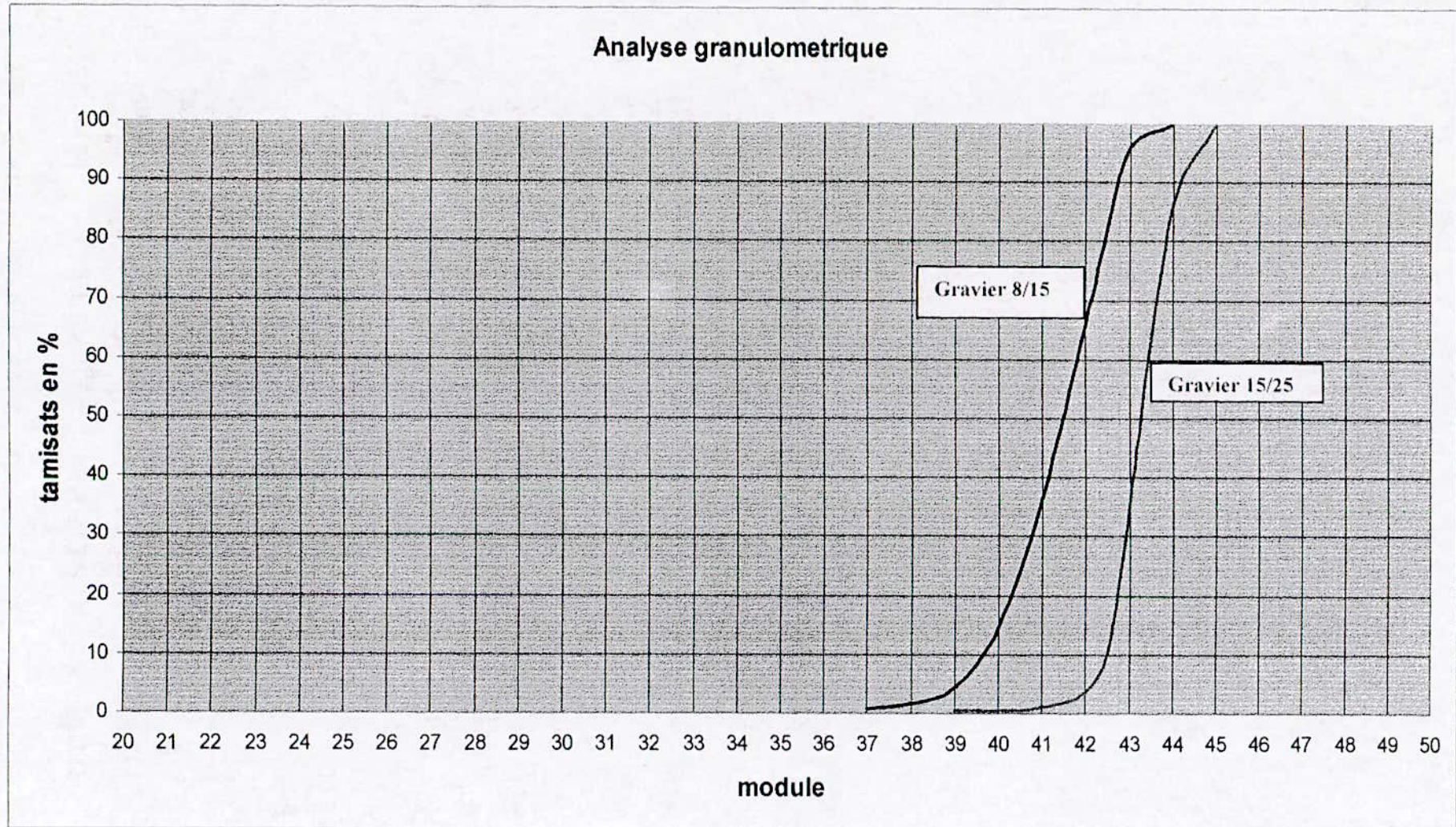


Fig. V.5 : courbe granulométrique des graviers de Si Mustapha

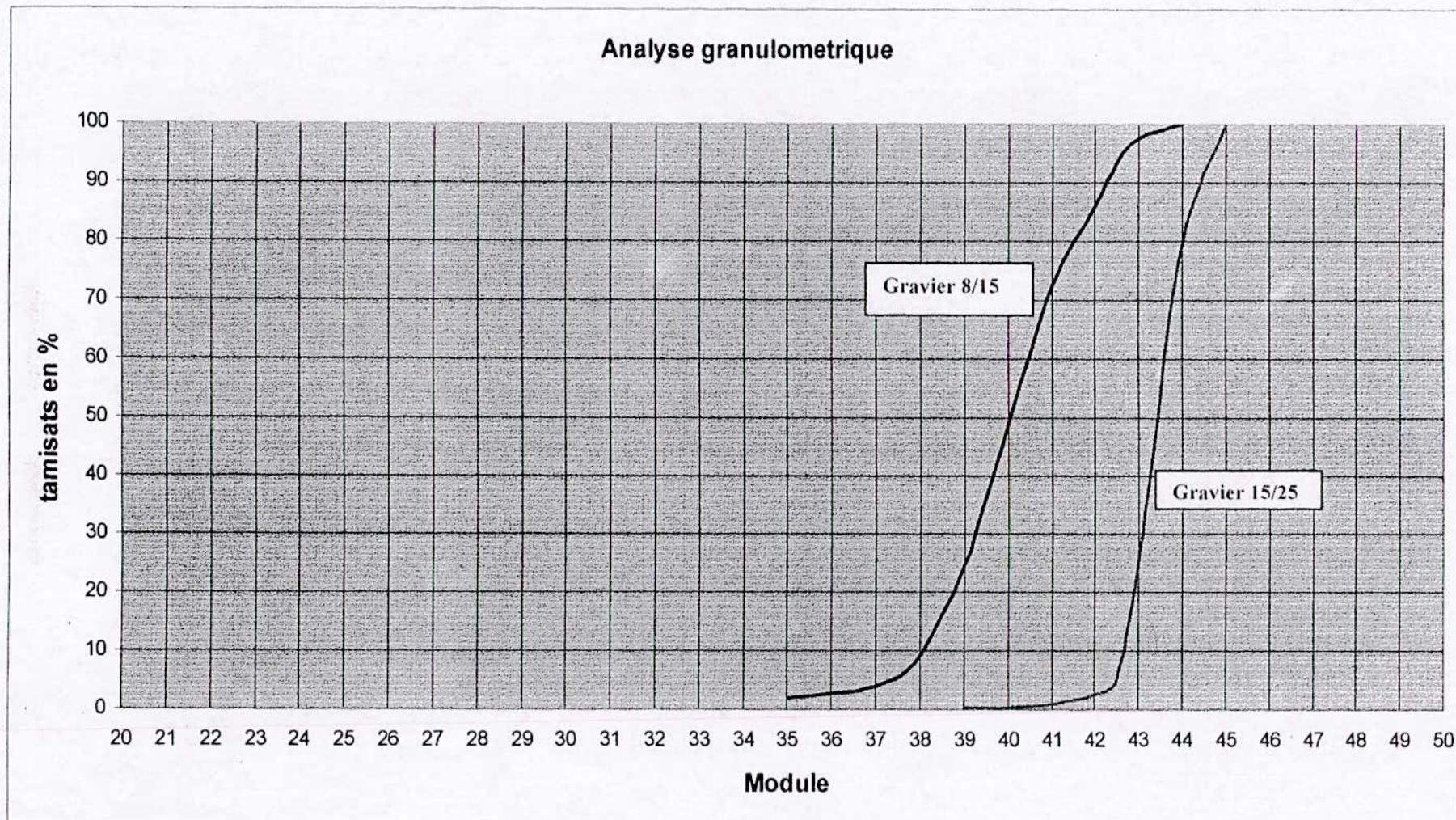
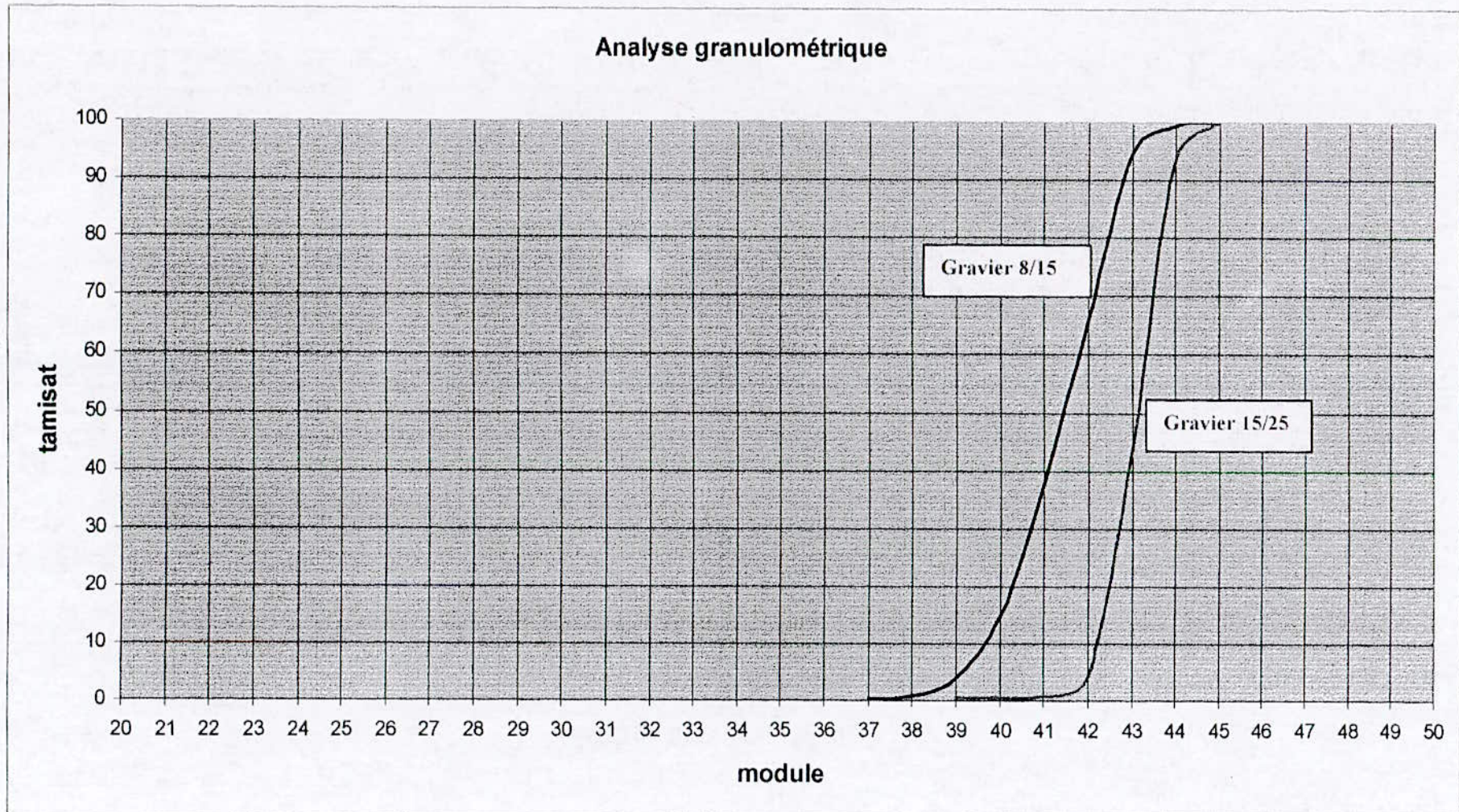


Fig. V.6 : courbe granulométrique des graviers de Sétif



4. Formulation des bétons :

Prenant le dosage en ciment égal à $C = 350 \text{ kg/m}^3$, et la quantité d'eau $E = 210 \text{ l/m}^3$. On les fixe pour tous les mélanges.

On prend $D_{\max} = 25 \text{ mm}$.

On détermine les points O, A, B de la courbe de référence de DREUX comme suit :

O (0,08 ; 0) ; B (25 ; 100) ; A ($D/2$; $50-D^{1/2}+K$)

A savoir : $D = 25$; $K = 0$

Donc A (12,5 ; 45).

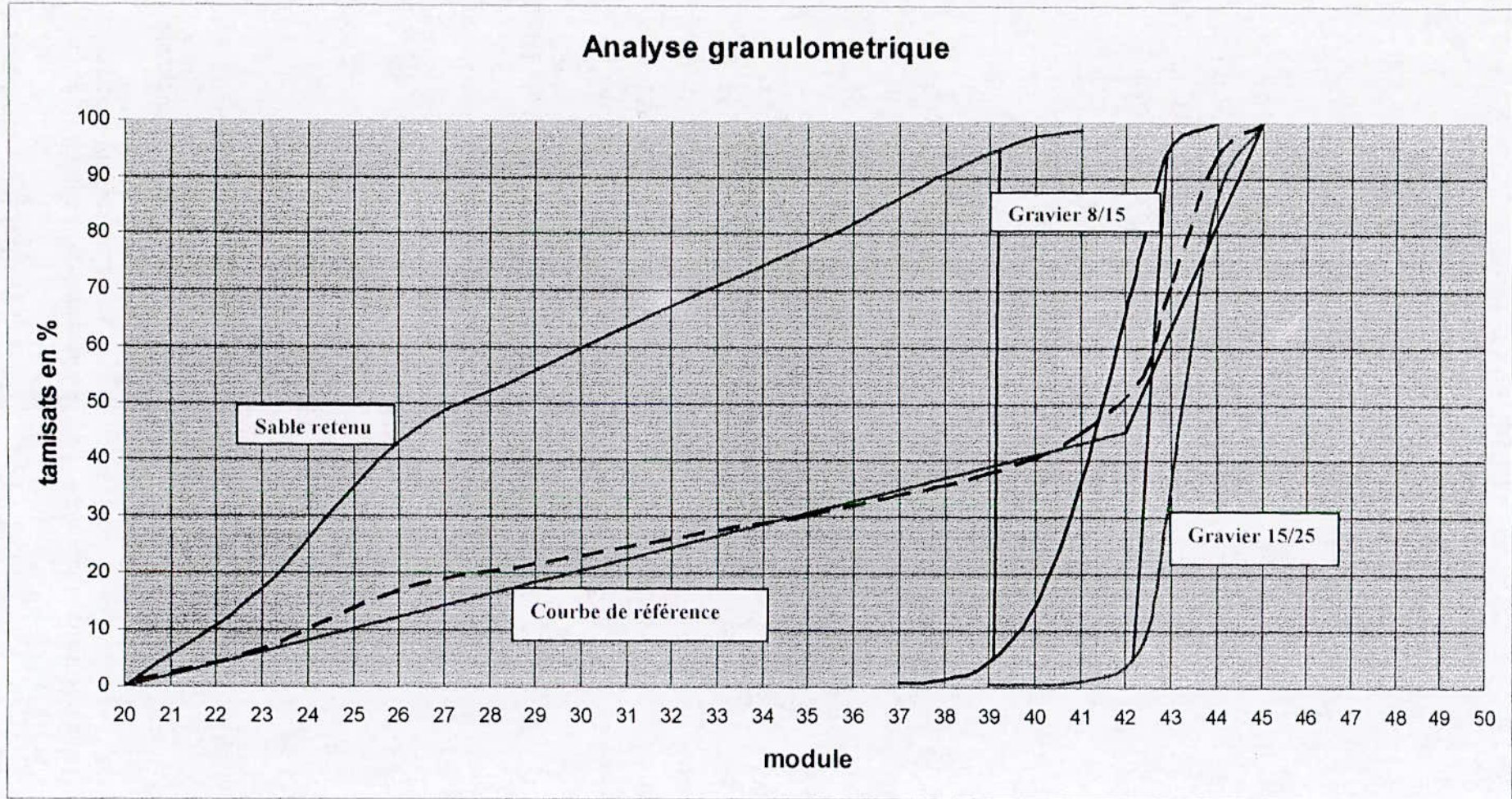
On aura donc les graphes suivants pour chaque mélange :

Béton 1 (LAKHDARIA)

Maille (mm)	sable	Gravier 8/15	Gravier 15/25
25	-	-	100
20	-	100	86.6
16	-	96.16	36.26
14	-	83.03	10.72
12.5	-	65.73	3.68
10	98.9	36.53	1.02
8	97.5	14.56	0.6
6,3	94.5	4.36	0.56
5	90.9	1.53	-
4	86.47	0.83	-
2.5	78	-	-
1.25	67	-	-
0.63	55.48	-	-
0.315	43.26	-	-
0.16	17.26	-	-
0.08	1.45	-	-

Tableau V.6 : granulométrie du béton 1

Fig. V.7 : formulation du béton 1

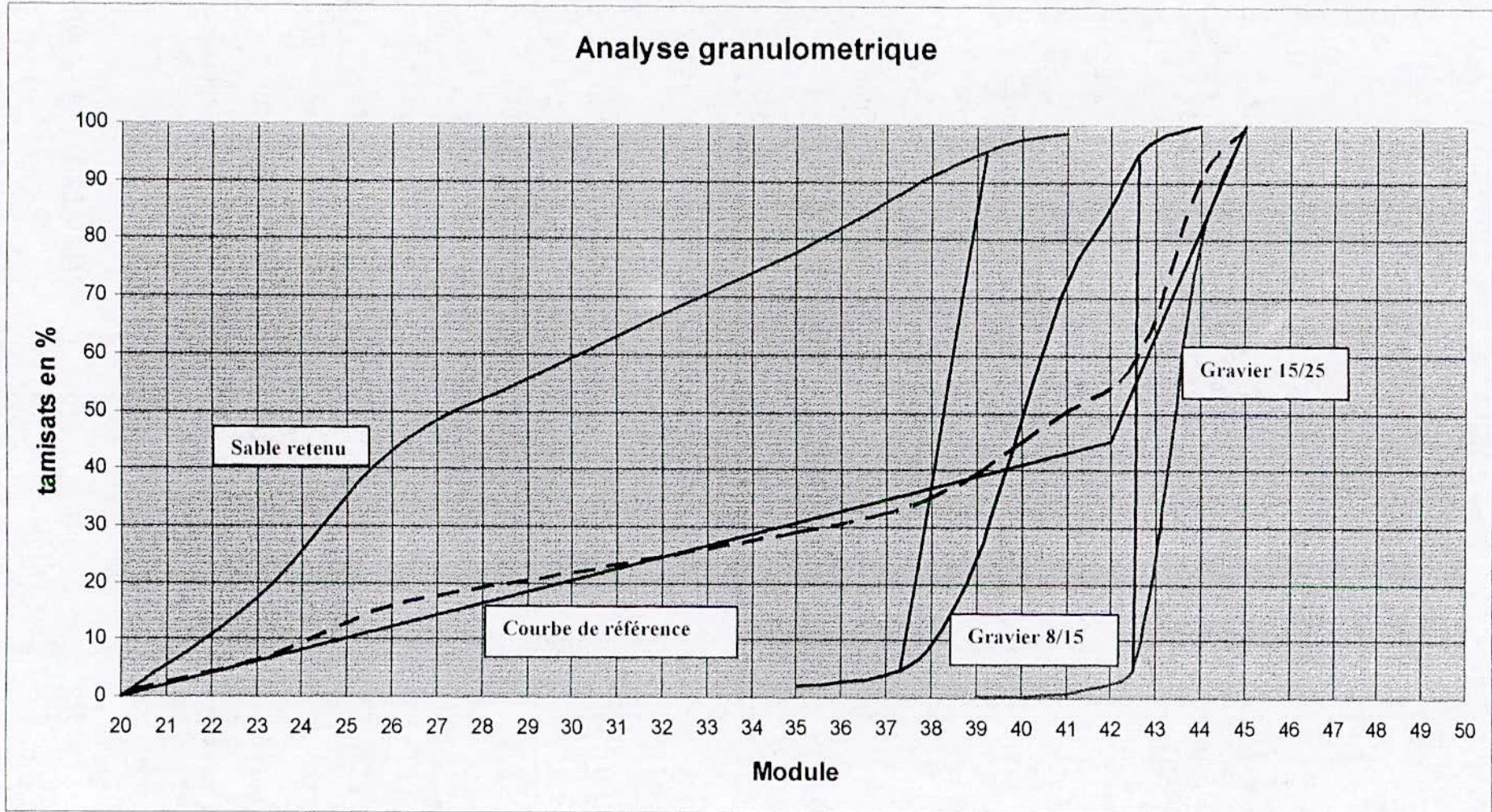


Béton 2 (SI MUSTAPHA)

Maille (mm)	sable	Gravier 8/15	Gravier 15/25
25	-	-	100
20	-	100	79.32
16	-	99.47	25
14	-	95.55	10
12.5	-	89.83	2.5
10	98.9	72.45	0.9
8	97.5	49.03	0.38
6,3	94.5	24.6	0.3
5	90.9	9.12	-
4	86.47	4	-
2.5	78	2	-
1.25	67	-	-
0.63	55.48	-	-
0.315	43.26	-	-
0.16	17.26	-	-
0.08	1.45	-	-

Tableau V.7 : granulométrie du béton 2

Fig. V.8 : formulation du béton 2

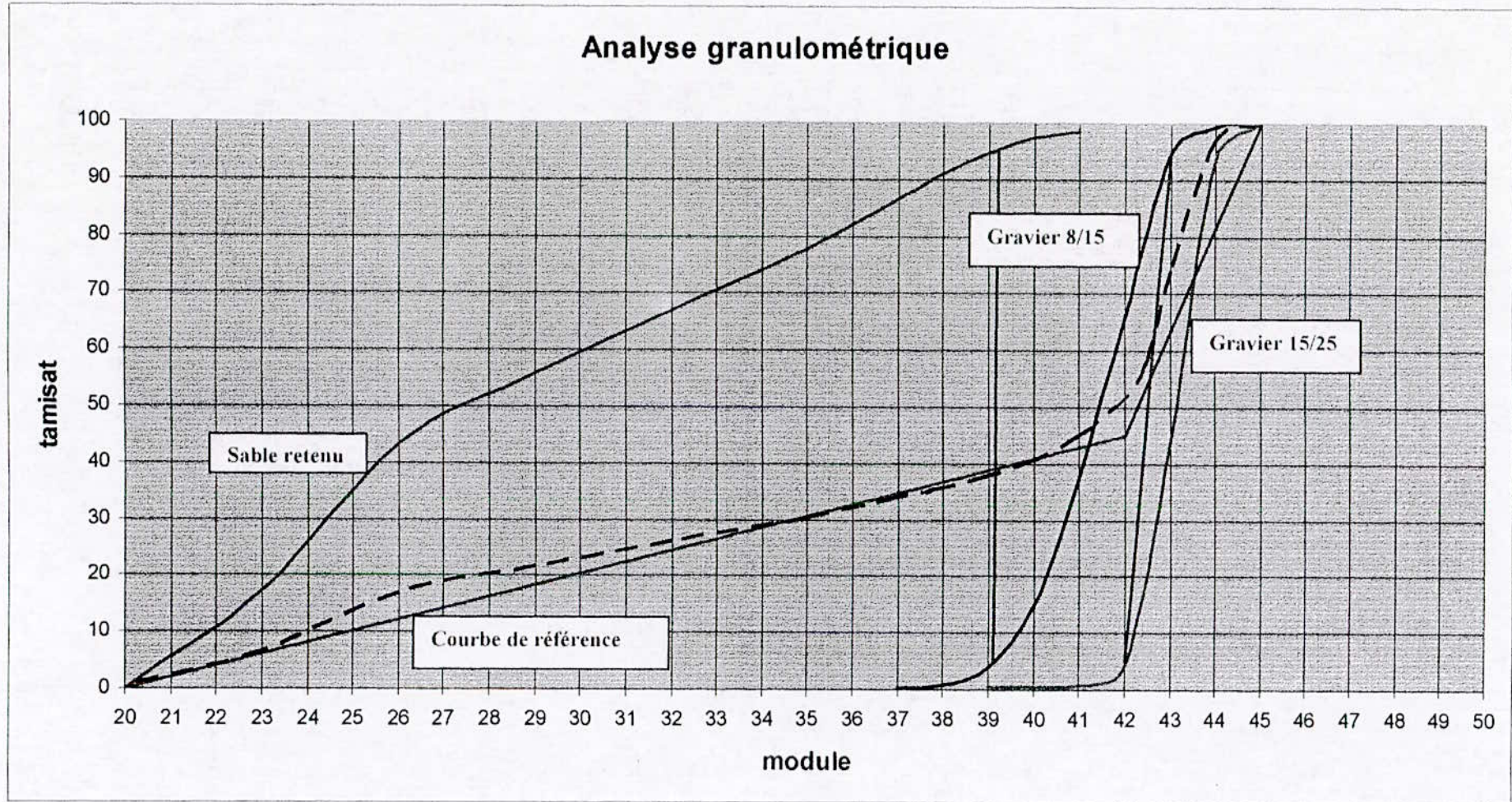


Béton 3 (SETIF)

Maille (mm)	sable	Gravier 8/15	Gravier 15/25
25	-	100	100
20	-	99.57	93.64
16	-	94.63	44.1
14	-	83.87	12.38
12.5	-	65.83	4.26
10	98.9	37.57	0.9
8	97.5	15	0.54
6,3	94.5	3.97	0.46
5	90.9	0.8	-
4	86.47	0.34	-
2.5	78	-	-
1.25	67	-	-
0.63	55.48	-	-
0.315	43.26	-	-
0.16	17.26	-	-
0.08	1.45	-	-

Tableau V.8 : granulométrie du béton 3

Fig. V.9 : formulation du béton 3



Béton 1 (LAKHDARIA)

X = 39,1 % ; Y = 55,5 %

	E (l)	C (kg)	Ps (kg)	Pg (kg)	PG (kg)
Pour 1 m³	210	350	693.63	287.6	780.388
Pour 50 l	10,5	17,5	34.68	14.38	39.02

Tableau V.9 : composition du béton 1

Sable noir = 19,07 kg

Sable jaune = 15,6 kg

Béton 2 (SI MUSTAPHA)

X = 36,8 % ; Y = 55,5 %

	E (l)	C (kg)	Ps (kg)	Pg (kg)	PG (kg)
Pour 1 m³	210	350	652.83	329.2	783.4
Pour 50 l	10,5	17,5	32.64	16.46	39.17

Tableau V.10 : composition du béton 2

Sable noir = 17,95 kg

Sable jaune = 14,69 kg

Béton 3 (SETIF)

X = 39,2 % ; Y = 55,5 %

	E (l)	C (kg)	Ps (kg)	Pg (kg)	PG (kg)
Pour 1 m³	210	350	689.3	286.62	782.497
Pour 50 l	10,5	17,5	34.465	14.33	39.125

Tableau V.11 : composition du béton 3

Sable noir = 18,95 kg

Sable jaune = 15,5 kg

5. Préparation du béton:

Après avoir déterminé les quantités des constituants à utiliser par la méthode de Dreux, on les met dans le malaxeur (photo V.7) dans l'ordre suivant :

- Sable fin, sable grossier, ciment, gravier 8/15, gravier 15/25.
- On met le malaxeur en marche pendant 5 minutes (maximum).
- On met de l'eau peu à peu.

Cet ordre d'exécution a pour but de faciliter le malaxage, d'avoir un bon malaxage et d'éviter la ségrégation des graviers.



Photo V.7 : Malaxeur

6. Mesures sur béton frais:

Nous avons effectué des mesures d'ouvrabilité des bétons confectionnés à l'aide de 3 tests différents:

- Mesure d'affaissement au cône d'Abrams (photo V.8),
- Mesure d'étalement à la table à secousses (photo V.9),
- Mesure du temps d'écoulement au maniabilimètre L.C.P.C (photo V.10).

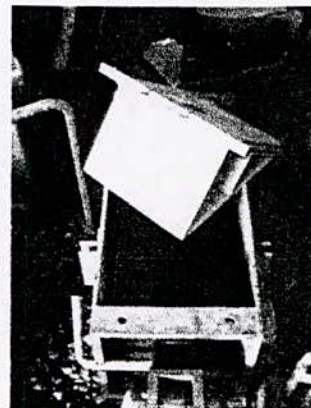
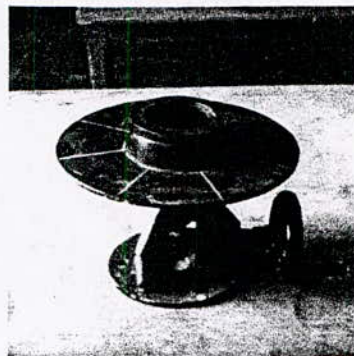


Photo V.8: Cône d'Abrams Photo V.9: Table à secousses Photo V.10 : Maniabilimètre

Le tableau suivant résume les résultats obtenus.

Essai	Béton 1	Béton 2	Béton 3
Affaissement (cm)	9	8	8
Étalement (%)	61	58	55
Maniabilité (s)	23	20	15

Tableau V.9 : récapitulatif des résultats sur béton frais

7. Mise en œuvre des éprouvettes :

Le béton est testé sur des éprouvettes cylindriques normalisées de diamètre de 16 cm et de hauteur de 32 cm.

- On prépare les moules en les graissant.
- Après effectué le bétonnage et en même temps que les essais sur béton frais, on commence à remplir les éprouvettes en 3 couches en les vibrant pendant 15 secondes pour chaque couche.
- On laisse les éprouvettes reposer un peu, et puis on les frappe pour faire monter les bulles d'air.
- On surface la partie latérale supérieure.
- Après 24 heures, on démoule les éprouvettes et on les conserve dans un bac d'eau (photo V.11).

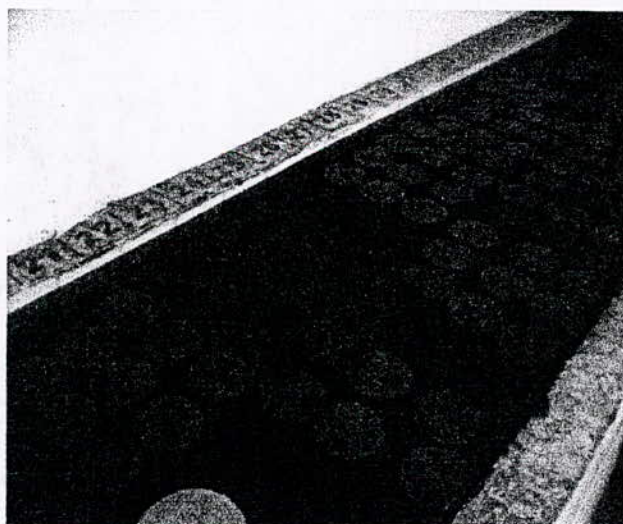


Photo V.11 : Bac d'eau

8. Ecrasement des éprouvettes :

- 24 heures avant chaque essai de compression, on enlève les éprouvettes du bassin en les mettant à sécher à l'air libre.
- Le jour de l'essai, on surface les extrémités latérales des éprouvettes en employant le soufre (photo V.12) et ceci dans le but d'obtenir une planéité parfaite des faces de chargement ainsi que l'orthogonalité de celles-ci par rapport aux génératrices des cylindres.
- Après surfacage, on met l'éprouvette dans la presse (photo V.13), on augmente la charge progressivement jusqu'à la rupture et on note la résistance à la compression

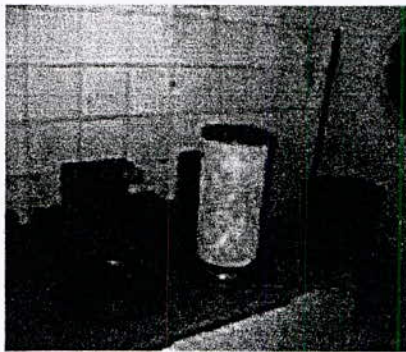


Photo V.12 : Epreuve surfacée

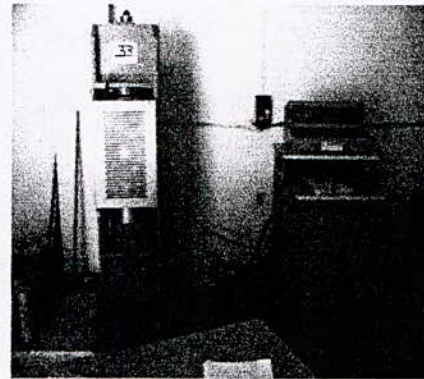


Photo V.13 : Presse électronique

9. Essai de traction par flexion « σ_t » :

C'est l'essai le plus utilisé. Il est réalisé sur les éprouvettes prismatiques (7 x 7 x 28 cm).

Le montage de l'éprouvette sur l'appareil est représenté par le schéma ci-dessous (photos V.14 et V.15)

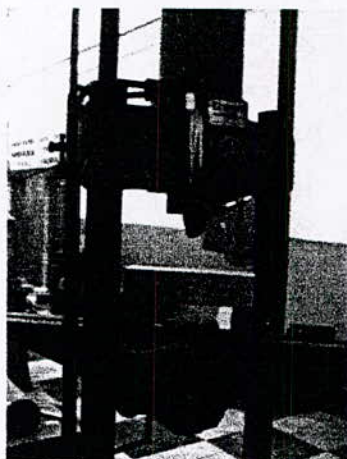


Photo V.14 : Epreuve cylindrique avant flexion

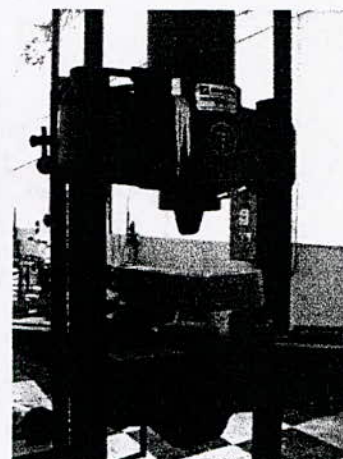


Photo V.15 : Epreuve cylindrique après flexion

9. Etude de la variation Contrainte - Déformation :

Pendant l'écrasement des éprouvettes, on mesure les déformations longitudinales et transversales de celles-ci en fonction de la contrainte appliquée jusqu'à la rupture.

Pour cela, on utilise des jauges, des produits de nettoyage et colle (photo V.16), un appareil qui teste la soudure et deux appareils assemblés tels que l'un des deux affiche le pourcentage de déformation de l'éprouvette étudiée (photo V.17).

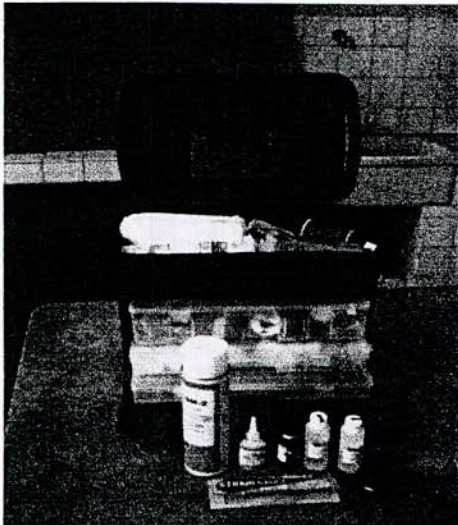


Photo V.16 : Produits de nettoyage



Photo V.17: Post tensiomètre

L'exécution de l'essai s'effectue comme suit :

- ❖ On prépare l'éprouvette après surfaçage.
- ❖ Avec un papier de verre, on frotte sur les surfaces où on va placer les jauges, pour avoir des surfaces lisses.
- ❖ On nettoie ces surfaces de la poussière avec un dégraisseur.
- ❖ On met deux produits successivement (un conditionneur, puis un neutraliseur).
- ❖ On met la jauge sur un papier blanc, puis on met du papier adhésif (scotch) de façon à avoir la jauge droite et on enlève le papier blanc.
- ❖ On met de la colle dans les surfaces préparées avant, pour pouvoir fixer les jauges et transmettre les déformations.
- ❖ On place les jauges (l'une longitudinalement et l'autre transversalement) pour chaque éprouvette.
- ❖ On enlève le scotch surtout pour la partie des fils sortant des jauges.
- ❖ On soude les deux sorties de la jauge à un fil (qui assure la transmission à l'appareil « Pont d'extensomètre ») de 3 sorties. L'une au rouge et l'autre aux deux restants (le noir et le blanc assemblés).
- ❖ On teste la qualité du soudage.
- ❖ Les autres sorties du fil vont se brancher à l'appareil « Pont d'extensomètre » de la façon suivante :

Le rouge avec le rouge, le blanc avec le blanc et le noir avec le jaune.

- ❖ On place l'éprouvette dans la presse (photo V.18), après mise en marche en contrôlant pour quelques valeurs de charges, on note à chaque valeur de charge, les valeurs de déformations correspondantes (longitudinale et transversale) affichées sur l'appareil « Pont d'extensomètre ».

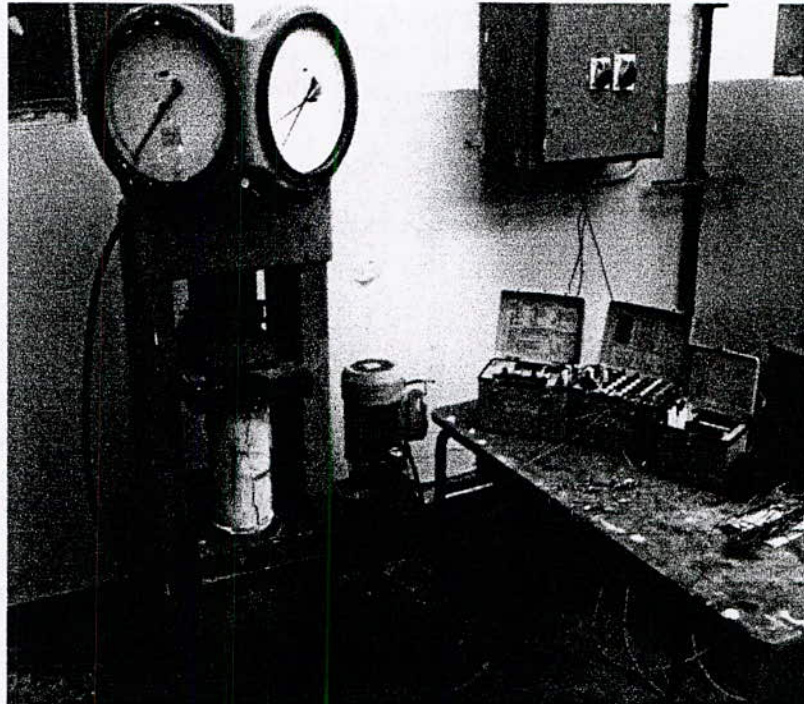


Photo V.18 : Etude de contrainte déformation



CHAPITRE VI

Résultats et interprétations

Introduction:

L'étude du béton frais est liée à la définition de notions qui expriment certaines de ses qualités, ou propriétés. C'est ainsi que l'on distingue des:

- notions qualitatives empiriques (ouvrabilité, maniabilité) ;
- notions quantitatives empiriques (affaissement, étalement) ;
- notions quantitatives fondamentales (viscosité, seuil d'écoulement).

Nous avons observé des notions qualitatives liées à l'ouvrabilité et mesuré les résistances des bétons.

Les différentes méthodes de mesures de l'ouvrabilité se justifient par leur caractéristique propre. Dans cette étude, les granulats utilisés sont siliceux pour les bétons 1 et 2 et calcaires pour le béton 3.

1. Consistance et maniabilité du béton frais :

Essai	Béton 1	Béton 2	Béton 3
Affaissement (cm)	9	8	8
Etalement (%)	61	58	55
Maniabilité (s)	23	20	15

Pour les 3 bétons testés, les résultats correspondent à des bétons plastiques (slump \approx 9cm) ce qui était attendu, puisque pour la composition de nos bétons, c'était une hypothèse de départ.

On constate qu'il y a une correspondance entre les résultats obtenus par les différentes méthodes de mesure de l'ouvrabilité.

L'affaissement au cône d'Abrams permet d'estimer l'écoulement en milieu libre, alors que le maniabilimètre L.C.P.C donne une indication sur la capacité d'écoulement en milieu fermé, confiné. On peut considérer que le test d'étalement (à la table à secousses) est un indicateur de l'ouvrabilité d'un béton tenant compte de sa ségrégation éventuelle lors de vibration.

Le cône d'Abrams indique que le béton 1 est plus ouvrable que les bétons 2 et 3, or si on étudie les masses volumiques, on constate que c'est le béton 3 qui devrait avoir le slump le plus élevé si on considère que les grains, au moment de l'affaissement, descendent sous l'effet de leur poids propre. En fait, le coefficient d'absorption d'eau est plus élevé pour le béton 3, qui donne d'ailleurs les valeurs les moins élevées d'affaissement, d'étalement ou de temps d'écoulement. Ceci s'explique puisque l'eau de gâchage, dont le rôle est de mouiller les grains, d'hydrater le ciment, puis d'assurer la réaction de prise et de durcissement a été en partie bue par les graviers.

La table à secousse confirme que le béton 1 est plus consistant et plus ouvrable que les deux autres bétons. Et encore indique que le béton 3 est le moins ouvrable que les autres bétons.

Sachant que la maniabilité est plus bonne, si le temps d'écoulement sur le maniabilimètre est plus court. On déduit alors que la maniabilité est plus bonne pour le béton 3, moyenne pour le béton 2, et moins bonne pour le béton 1.

En tous les cas, les trois bétons ont donnés des valeurs d'affaissement, d'étalement et de maniabilités acceptables et bonnes qui indiquent la plasticité et la bonne qualité de ces bétons à l'état frais.

Donc il reste à vérifier les qualités de ces bétons à l'état durci, surtout les résistances caractéristiques.

En effet, si l'on s'intéresse à l'ouvrabilité et la maniabilité (qualités du béton frais), on peut se conseiller de choisir les graviers utilisés dans le béton 1 (graviers de LAKHDARIA), qui ont donnés un béton plus ouvrable et plus maniable.

2. Qualités du béton durci :

2.1. Résistance à la compression :

On constate que la résistance à la compression augmente avec l'âge pour les 3 bétons, et démarre avec des valeurs à 3 jours tout à fait acceptables ($\approx 12\text{MPa}$) L'accroissement, régulier dans le temps, est plus important pour le béton 3. Celui-ci est à granulats calcaires, qui peuvent régir en présence d'eau pour former des carbonates durs, par exemple par formation de cristaux massifs de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Mais on ne peut tirer une relation directe de cause à effet pour la densité.

A. Béton 1 : Gravier de Lakhdaria

Age (jours)	Densité du béton		Résistance à la compression (MPa)	
	1 ^{ère} épreuve	2 ^{ème} épreuve	1 ^{ère} épreuve	2 ^{ème} épreuve
3	2,38	2,382	12,40	12,60
	2,381		12,50	
7	2,33	2,35	18,55	16,05
	2,34		17,30	
14	2,364	2,37	22,85	22,55
	2,367		22,70	
28	2,33	2,33	28,15	28,95
	2,33		28,55	

➤ La densité de ce béton est de 2,354

Le béton 1 atteint une résistance caractéristique de 28,55 MPa qui est supérieure à la limite exigée par les normes 25 MPa. Ce qui veut dire que ce béton est bon (acceptable). Et donc, on peut utiliser les graviers de LAKHDARIA avec garantie.

Ce béton est moins bon par rapport aux autres bétons pour la résistance obtenue, il vaut mieux utiliser d'autres granulats si c'est la cible visée.

B. Béton 2 (SI-MUSTAPHA) :

Age (jours)	Densité du béton		Résistance à la compression (MPa)	
	1 ^{ère} épreuve	2 ^{ème} épreuve	1 ^{ère} épreuve	2 ^{ème} épreuve
3	2,29	2,26	12,50	13,20
	2,275		12,85	
7	2,35	2,34	20,50	16,00
	2,345		18,25	
14	2,33	2,3	23,75	23,95
	2,315		23,85	
28	2,31	2,36	29,60	30,30
	2,335		29,90	

- La densité de ce béton est de 2,32

Le béton 2 atteint une résistance en compression à 28 jours de 29,90 MPa qui est supérieure à la limite exigée par les normes 25 MPa. Donc, comme le béton 1, ce béton est bon (acceptable). Et donc, on peut utiliser ces graviers de SI MUSTAPHA avec garantie.

C. Béton Mélange 3 (SETIF) :

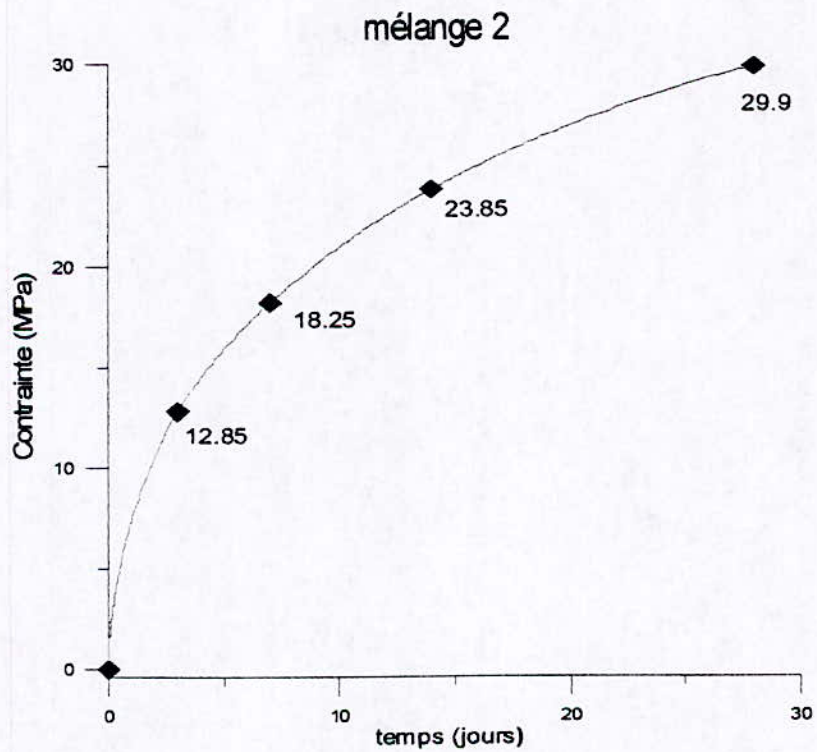
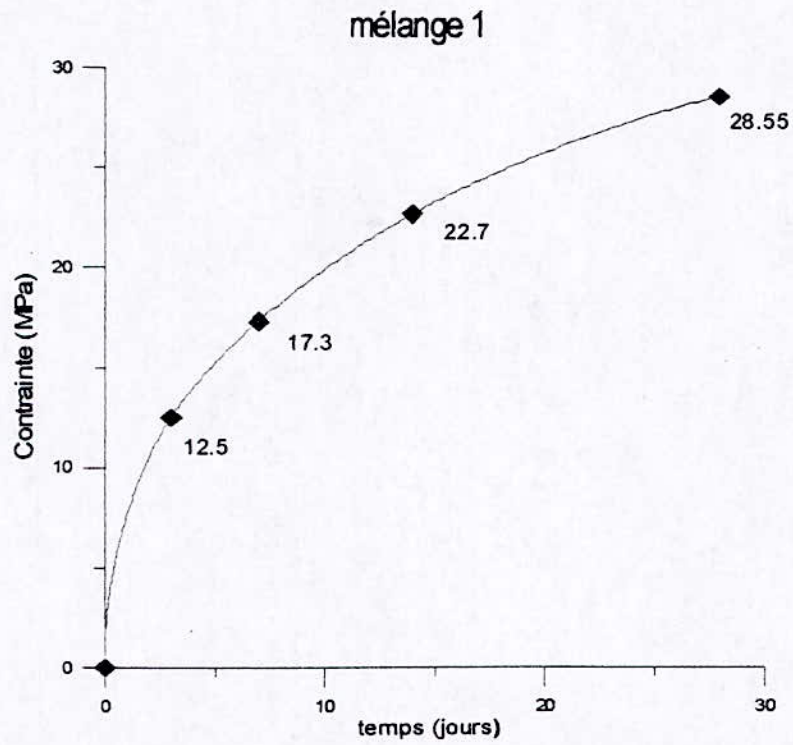
Age (jours)	Densité du béton		Résistance à la compression (MPa)	
	1 ^{ère} éprouvette	2 ^{ème} éprouvette	1 ^{ère} éprouvette	2 ^{ème} éprouvette
3	2,38	2,32	11,60	12,50
	2,35		12,05	
7	2,33	2,36	20,80	19,50
	2,345		20,15	
14	2,33	2,39	26,15	24,85
	2,36		25,5	
28	2,35	2,38	31,65	30,75
	2,365		31,20	

- La densité de ce béton est de 2,355

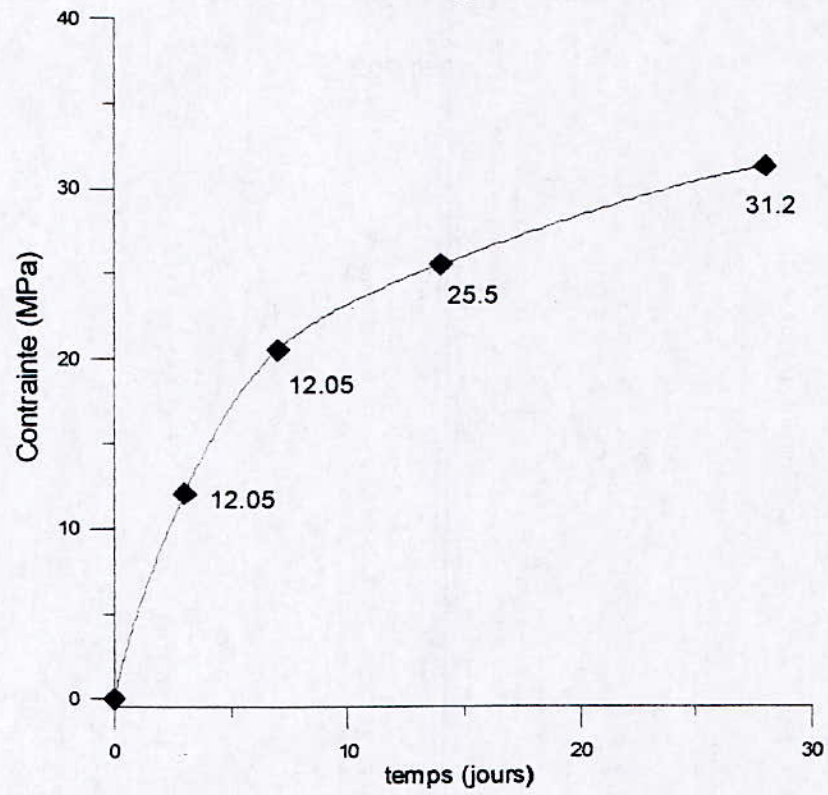
Le béton 3 atteint une résistance caractéristique de 31,20 MPa qui est supérieure à la limite exigée par les normes 25 MPa. Ce qui veut dire que ce béton est bon (acceptable). Et donc, on peut utiliser ces graviers de SETIF avec garantie.

La résistance en compression à 28 jours obtenue pour ce béton est la plus grande. Donc pour avoir une meilleure résistance caractéristique et une meilleure garantie, il est conseillé d'utiliser ces graviers de SETIF.

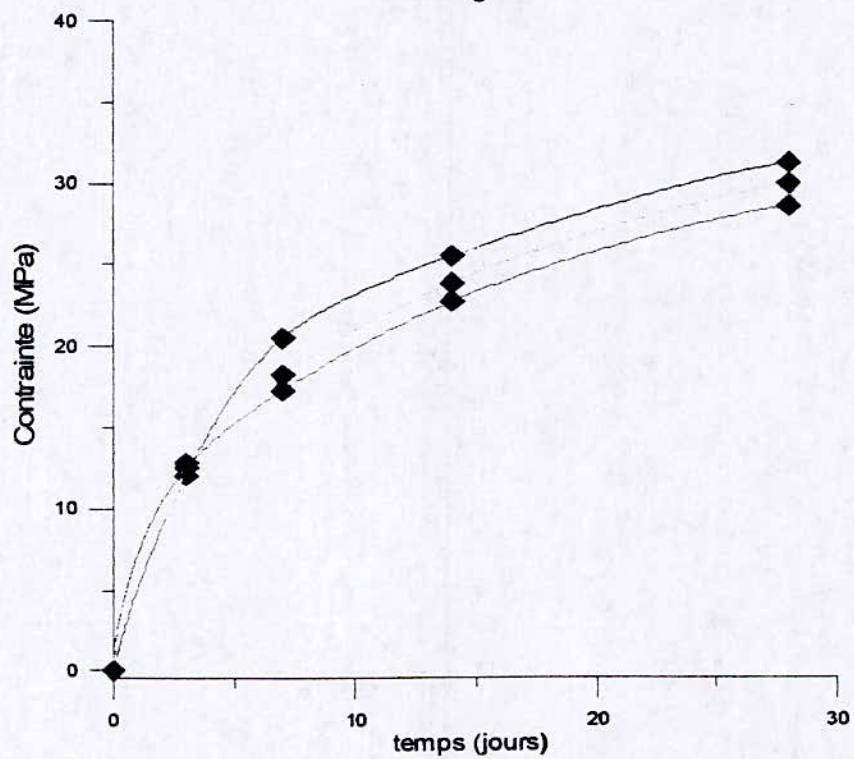
2.2. Evolution de la résistance en fonction du temps :



mélange 3



mélange 1+2+3



Ce dernier graphe montre les différentes évolutions des résistances en compression des trois bétons en fonction de temps et la différence entre elles.

Les résistances en compression des bétons 2 et 3 évoluent normalement et de même façon.

Par contre, le béton 3 a eu une résistance faible au jeune âge (à 3 jours), puis devient meilleur au plus tard.

Ce qui veut dire que la prise de ce béton est gênée au début (au jeune âge).

Ce qui peut être expliqué par la teneur faible en aluminates des graviers utilisés pour ce béton. En effet, les aluminates rentrent dans l'équation de l'hydratation du ciment au jeune âge, donc la faiblesse de sa teneur entraîne un faible avancement de l'hydratation de ciment.

Donc, ces granulats sont déconseillés pour les ouvrages qui nécessitent une forte résistance au jeune âge.

Mais comme ces granulats ont le privilège de donner un béton de meilleure résistance caractéristique, on peut les utiliser en ajoutant des adjuvants accélérateurs de prise, pour éliminer l'inconvénient de ce béton.

2.3. Résistance à la traction par flexion :

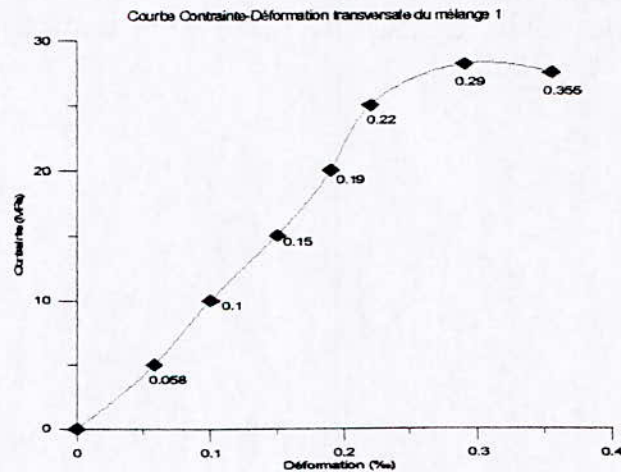
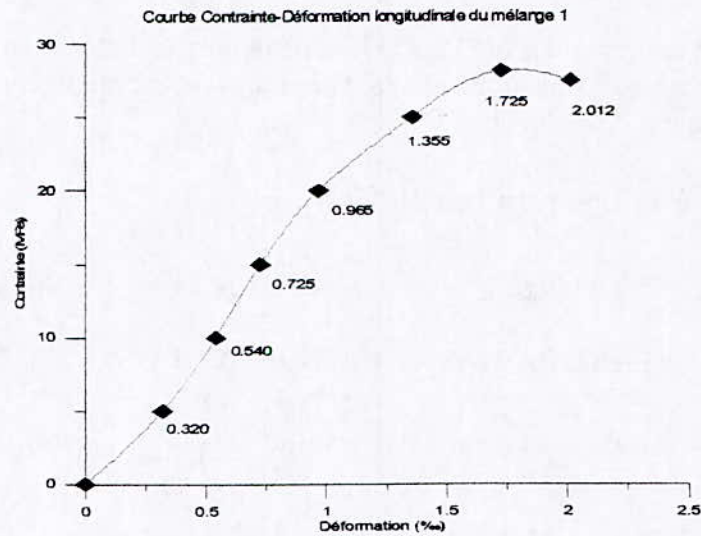
Age (jours)	Mélange 1		Mélange 2		Mélange 3	
	(LAKHDARIA)		(SI-MUSTAPHA)		(SETIF)	
	1 ^{ère} essai	2 ^{ème} essai	1 ^{ère} essai	2 ^{ème} essai	1 ^{ère} essai	2 ^{ème} essai
3 jours	1,34	1,36	1,35	1,39	1,33	1,36
	1,35		1,37		1,345	

Ces valeurs vérifient approximativement la relation entre la résistance à la compression et celle de traction soit: $R_t = R_c/12$ à $R_c/10$ ou, si on utilise les formules réglementaires: $R_t = 0.6 + 0.06R_c$

2.4. Etude de la variation Contrainte - Déformation :

A. Béton 1 :

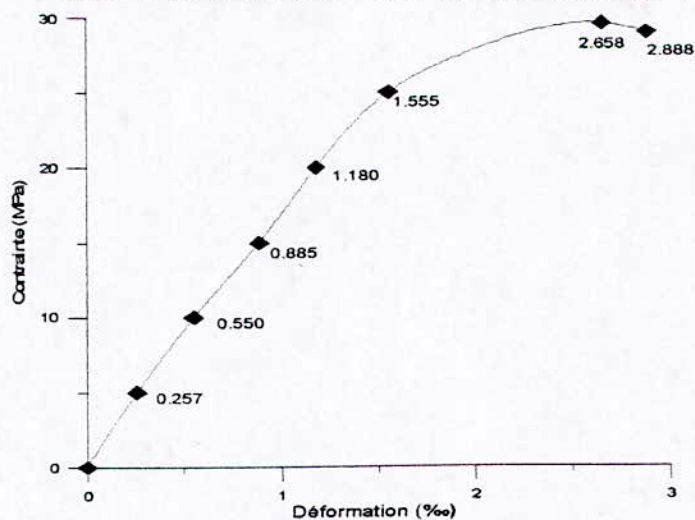
Contrainte (MPa)	Déformations	
	Longitudinale	Transversale
5	0,32	0,058
10	0,54	0,1
15	0,725	0,15
20	0,965	0,19
25	1,355	0,22
28,15	1,725	0,29
27,5	2,012	0,355



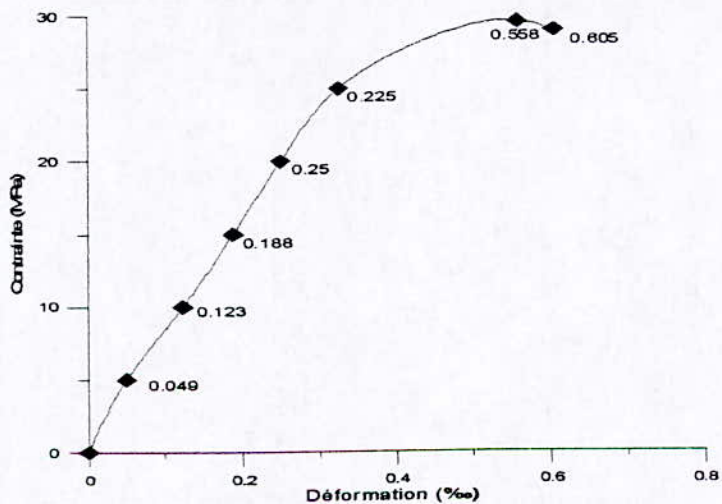
B. Béton 2 :

Contrainte (MPa)	Déformations	
	Longitudinale	Transversale
5	0,257	0,049
10	0,55	0,123
15	0,885	0,188
20	1,18	0,25
25	1,555	0,325
29,6	2,658	0,558
29	2,88	0,605

Courbe Contrainte-Déformation longitudinale du mélange 2



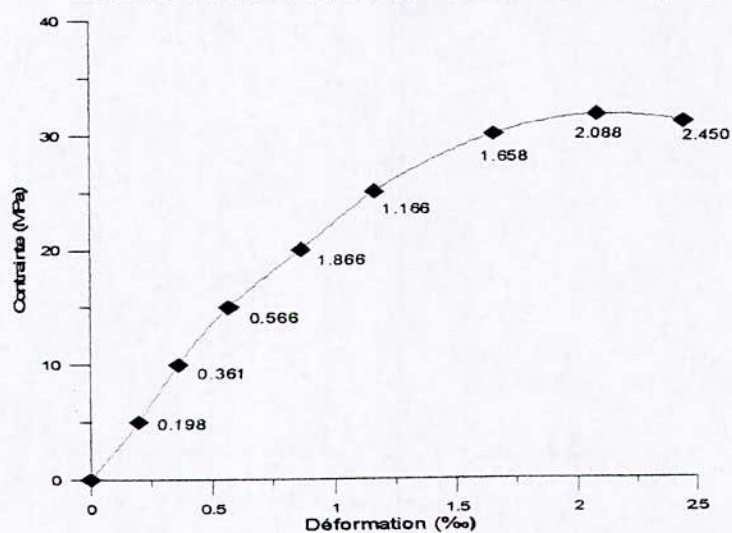
Courbe Contrainte-Déformation transversale du mélange 2



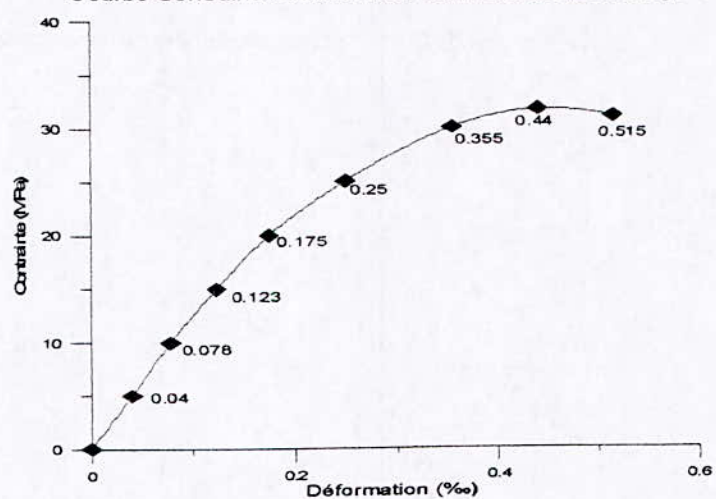
C. Béton 3 :

Contrainte (MPa)	Déformations	
	Longitudinale	Transversale
5	0,198	0,04
10	0,361	0,078
15	0,566	0,123
20	0,866	0,175
25	1,166	0,25
30	1,658	0,355
31,65	2,088	0,44
31	2,45	0,515

Courbe Contrainte-Déformation longitudinale du mélange 3



Courbe Contrainte-Déformation transversale du mélange 3



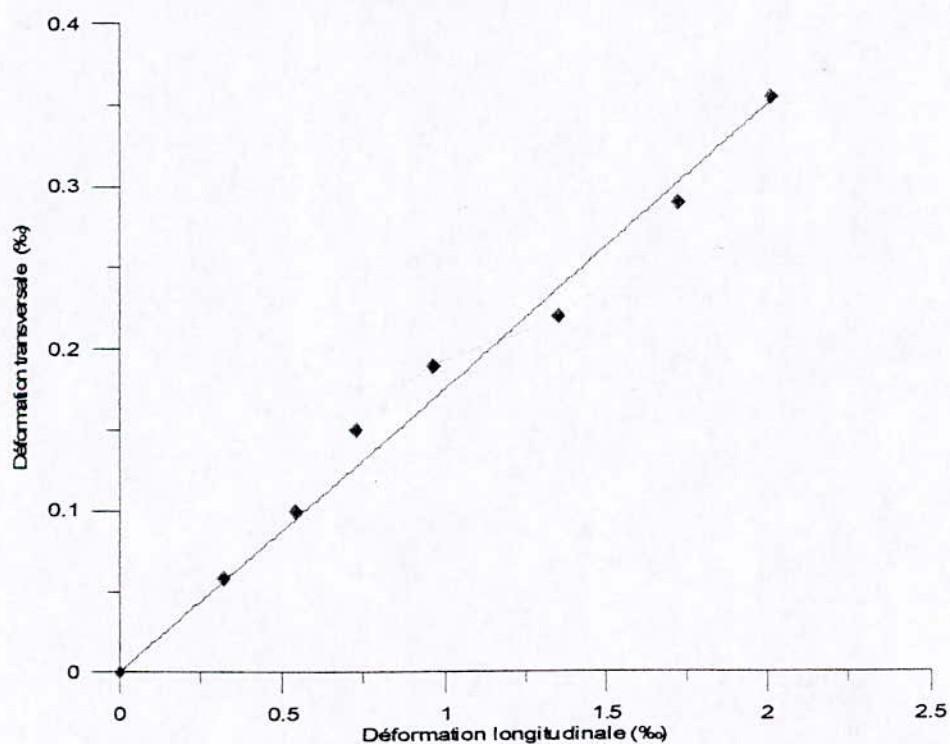
❖ Ces graphes confirment le comportement du béton durci.

2.5. Calcul du coefficient de Poisson :

A. béton1 :

Déformations Longitudinale	Déformations Transversale	Coefficient de Poisson
0,32	0,058	0,181
0,54	0,1	0,185
0,725	0,15	0,207
0,965	0,19	0,197
1,355	0,22	0,162
1,725	0,29	0,168
2,012	0,355	0,176

Détermination du Coefficient de poisson

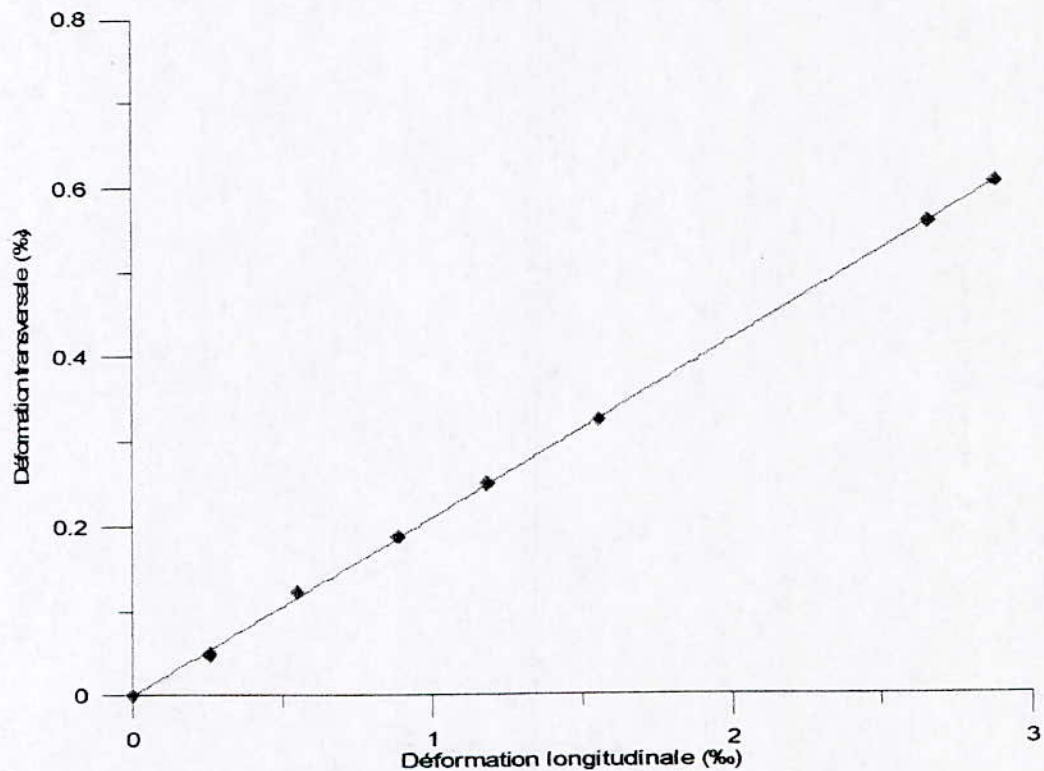


Le coefficient de Poisson est la tangente de la droite du graphe et la moyenne des valeurs du tableau : $\mu \approx 0,182$.

B. Mélange 2 :

Déformations Longitudinale	Déformations Transversale	Coefficient de Poisson
0,257	0,049	0,191
0,55	0,123	0,224
0,885	0,188	0,212
1,18	0,25	0,212
1,555	0,325	0,209
2,658	0,558	0,210
2,88	0,605	0,210

Détermination du Coefficient de poisson du mélange 2

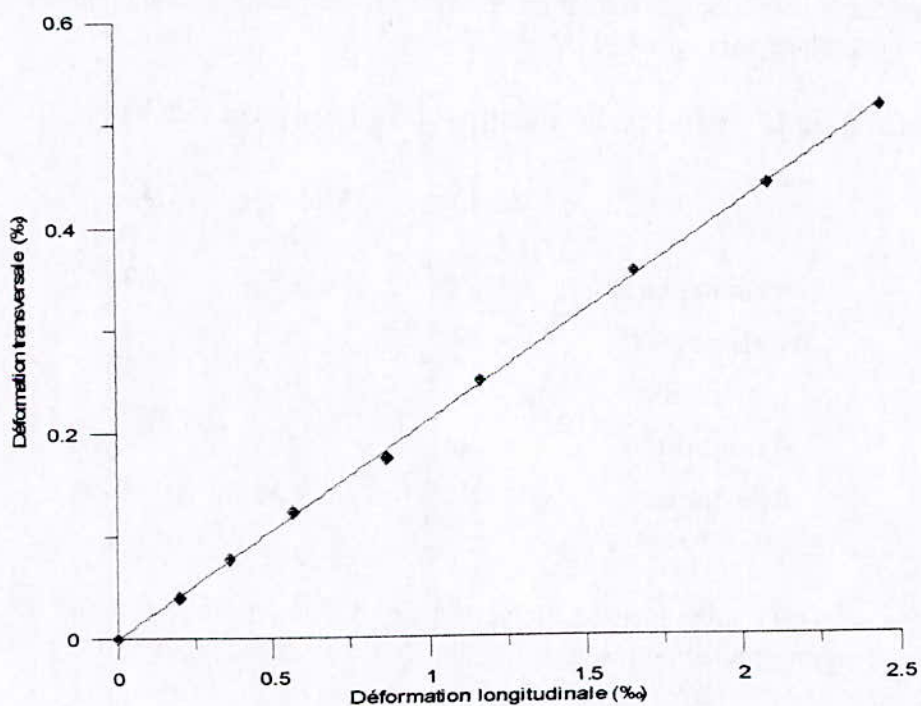


➤ Le coefficient de Poisson est : $\mu \approx 0,210$

D. Mélange 3 :

Déformations Longitudinale	Déformations Transversale	Coefficient de Poisson
0,198	0,04	0,202
0,361	0,078	0,216
0,566	0,123	0,217
0,866	0,175	0,202
1,166	0,25	0,214
1,658	0,355	0,214
2,088	0,44	0,211
2,45	0,515	0,210

Détermination du Coefficient de poisson du mélange 3



➤ Le coefficient de Poisson est : $\mu \approx 0,211$

3. Discussions :

3.1. Influence de la densité des graviers :

	Mélange 1	Mélange 2	Mélange 3
Densité apparente des graviers	1,35	1,30	1,45
Densité du béton	2,354	2,32	2,355
Résistance à la compression au jeune âge (3 jours) (MPa)	12,5	12,85	12,05
Résistance à la traction à 3 jours (MPa)	1,35	1,37	1,345

D'après les résultats obtenus, on remarque que : plus la densité apparente est élevée, plus la densité du béton augmente, et plus les résistances mécaniques, en compression et à la traction, au jeune âge diminuent.

C'est dû à la réduction du volume de la pâte de ciment causé par l'augmentation de la densité apparente des granulats. Et puisque les contraintes de déformation au jeune âge sont reprises par la pâte, donc la réduction de cette dernière entraînera une diminution des résistances mécaniques au jeune âge.

3.2. Influence de la granularité des graviers (rapport G/S) :

	Mélange 1	Mélange 2	Mélange 3
Le rapport G/S	1,551	1,557	1,717
Affaissement	9	8	8
Étalement	61	58	55
Maniabilité	23	20	15
Résistance caractéristique	28,55	29,9	31,2

On constate que l'augmentation du rapport G/S donne une augmentation des résistances mécaniques à la compression ; et une diminution de l'ouvrabilité.

L'augmentation du rapport G/S vient de l'augmentation de la quantité des graviers et la diminution de la quantité du sable. Ce qui diminuera la proportion en fines et puis la demande en eau va être moins importante. Cela va influencer sur le rapport C/E en le diminuant, puis entraîne une augmentation des résistances mécaniques.

3.3. Influence de l'absorption d'eau :

	Mélange 1	Mélange 2	Mélange 3
Absorption d'eau Ab	1,75	2,09	2,17
Affaissement	9	8	8
Étalement	61	58	55
Maniabilité	15	20	23
Résistance caractéristique	28,55	29,9	31,2

Ces résultats nous confirment ce qu'on a vu dans la partie théorique à propos de la proportionnalité entre le coefficient d'absorption d'eau et la résistance caractéristique puis le module d'élasticité ; et la proportionnalité inverse entre ce même coefficient et l'ouvrabilité.

L'absorption d'eau enlève une quantité d'eau qui doit s'hydrater avec le ciment, ce qui va gêner, d'une part, l'ouvrabilité ; mais d'autre part, une diminution de E entraînera une élévation du rapport C/E et puis la résistance caractéristique.

On a obtenu une même valeur de l'affaissement pour les mélanges 2 et 3. Cela doit être dû à une mauvaise exécution, puisque les valeurs d'étalement et de maniabilité confirment l'influence recherchée sur l'ouvrabilité.

3.4. Influence de la résistance mécanique Los Angeles :

On ne peut pas tirer une influence d'après les valeurs trouvées. L'influence du coefficient Los Angeles est négligeable par rapport aux autres influences des autres paramètres. Donc pour pouvoir atteindre cette influence, il faut encore fixé plusieurs autres paramètres qui agissent d'une façon ou d'une autre sur les qualités du béton. Ce qui est très difficile à effectuer.

3.5. Influence du coefficient Micro Deval :

	Mélange 1	Mélange 2	Mélange 3
coefficient Micro Deval	31,8	29,4	21,6
Affaissement	9	8	8
Étalement	61	58	55
Maniabilité	15	20	23
Résistance caractéristique	28,55	29,9	31,2

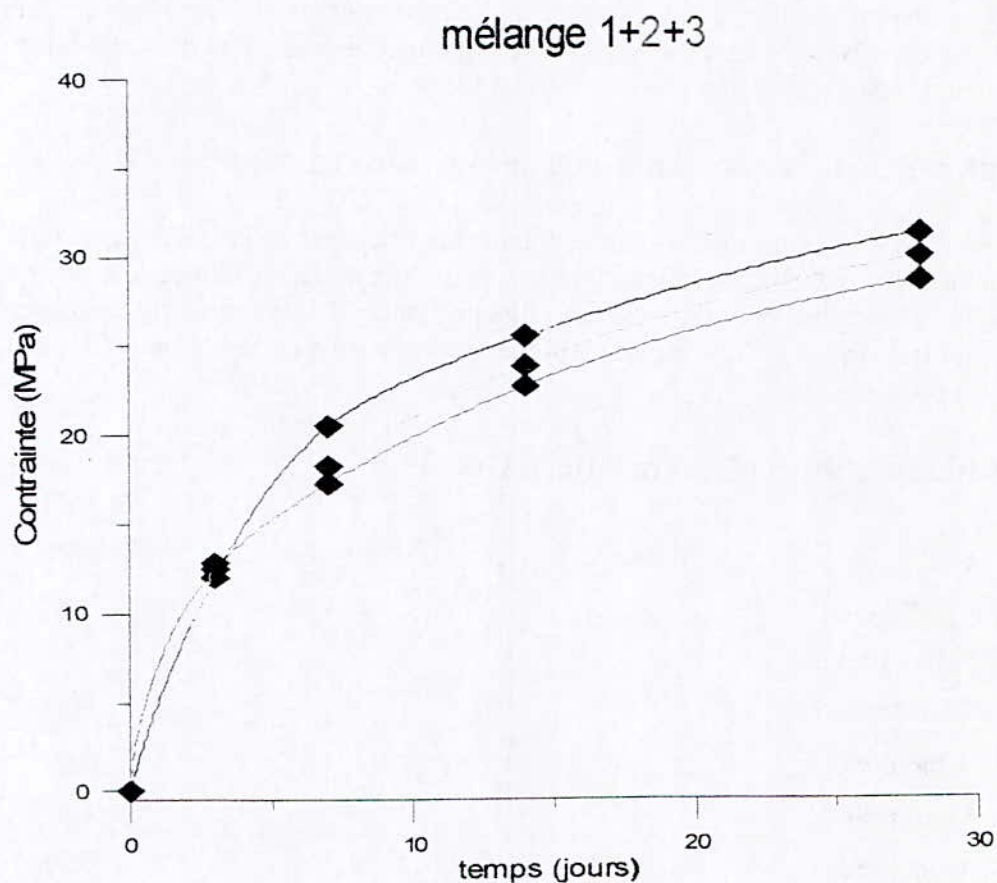
Cette influence est claire. Ce coefficient est proportionnel à l'ouvrabilité et inversement proportionnel à la résistance caractéristique.

On sait que ce coefficient représente le degré de dégradation des graviers. Don plus ce coefficient est élevé, plus ces graviers se fissurent facilement lors de l'écrasement des éprouvettes, et donc la résistance caractéristique est faible.

3.6. Influence de la teneur en sulfate SO_3 :

	Mélange 1	Mélange 2	Mélange 3
teneur en sulfate SO_3	0,119	0,20	0,10
Résistance à la compression au jeune age (à 3 jours) (MPa)	12,5	12,85	12,05
Résistance caractéristique	28,55	29,9	31,2

Reprenant les graphes suivants qui représentent l'évolution des contraintes en fonction du temps.



On peut tirer les deux constatations suivantes :

La première constatation à faire, sur le tableau, est la proportionnalité entre la teneur en sulfates et la résistance au jeune âge.

La seconde constatation, qui est la plus importante, surtout sur le troisième mélange qui a subi un retard de résistance au jeune âge (une faible résistance), alors qu'il est le meilleur aux jours suivants.

C'est dû à sa teneur faible en sulfates qui perturbe la prise du béton en perturbant la réaction d'hydratation du ciment.

3.7. Influence de la teneur en calcaire CaO :

	Mélange 1	Mélange 2	Mélange 3
Teneur en calcaire CaO	4,95	6,10	54
Résistance caractéristique	28,55	29,9	31,2

On voit clairement que l'augmentation de la teneur en calcaire fait augmenter la résistance caractéristique.

Donc les granulats calcaires donnent des bétons de meilleure résistance en compression à 28 jours.

3.8. Influence de la teneur en aluminates Al_2O_3 :

	Mélange 1	Mélange 2	Mélange 3
Teneur en aluminates Al_2O_3	16,64	15,93	0,3
Résistance à la compression au jeune âge (à 3 jours) (MPa)	12,5	12,85	12,05
Résistance à la traction à 3 jours (MPa)	1,35	1,37	1,345

Les aluminates rentrent dans l'hydratation du ciment. C'est pour cela que le béton 3 qui a une très faible teneur en aluminates, a provoqué un retard de prise.

Conclusion :

Les différentes mesures effectuées nous permettent de confirmer certains comportements prévisibles, mais le nombre limité des essais ne permet pas une généralisation.

Les granulats calcaires, provenant de Sétif ont présenté les meilleurs résultats pour les essais d'écrasement.

L'influence de la densité sur la résistance n'est pas évidente. C'est surtout l'absorption d'eau qui détermine l'ouvrabilité.

CONCLUSION GÉNÉRALE :

Nous avons tenté de découvrir et d'expliquer théoriquement puis expérimentalement, les liens existant entre les caractéristiques des granulats et les propriétés des bétons.

Le choix des granulats donc, d'après cette étude, porte principalement sur la nature minéralogique, la masse volumique, la propreté, la dureté, la granulométrie, l'absorption d'eau, etc....

Dans tous les cas, une grande importance est attachée au paramètre régularité qui va conditionner la constance de la maniabilité et du rapport e/c.

En effet, du fait de l'incidence des transports sur le coût des matériaux, l'utilisateur est en général tributaire des productions de proximité.

Donc, le choix des matériaux est restreint par ce facteur de coût.

Mais l'utilisateur doit connaître au moins les technologies mises en œuvre dans les exploitations de granulats. Ces technologies permettent aux producteurs de répondre aux exigences de qualité requises et donner l'assurance de fourniture de granulats conforme aux normes.

Le contrôle de conformité porte sur les granulats, soit avant leur expédition, soit après leur livraison sur l'aire du stockage du chantier.

Ce contrôle consiste à effectuer des prélèvements et des analyses pour apprécier, avec suffisamment de précision la conformité des lots à utiliser.

Il est à souligner que pour des raisons d'exploitation, les carrières exploitées sont sujettes à de nouveaux tests d'identification des matériaux produits.

Ce travail nous a permis de mieux comprendre les problèmes pratiques d'élaboration des bétons. L'importance des granulats sur le comportement des bétons n'est plus à souligner. La connaissance de leur nature minéralogique n'est pas toujours facile, car les études pétrographiques ne sont pas très courantes en Algérie.

Les études sur béton frais ne sont pas très développées en Algérie, or de la qualité du béton frais découlera celle du béton durci.

Les perspectives de ce travail sont :

Etudier l'influence des autres paramètres (rapport G/S) ; approfondir sur l'étude du béton frais ; exigence de maître des fiches techniques des matériaux au niveau des laboratoires, entreprises et centres de recherche, etc....

REFERENCES BIBLIOGRAPHIE

- [1]. **G. DREUX, J. FEST**, « Nouveau Guide du Béton et de ces constituants », 8^{ème} édition, Eyrolles, Mai 1998.
- [2]. **J. BARON, J. P.OLIVIER**, « Les Bétons, bases et données pour leur formulation », Deuxième tirage, Eyrolles, Janvier 1997.
- [3]. **REUNION D'INGENIEURS**, « Matériaux De Construction », 3^{ème} édition, Eyrolles, 1979.
- [4]. **HINANA, LABIOD**, « Influence des granulats sur la résistance à la compression des bétons », P.F.E, E.N.P, Alger-Algérie, 2000.
- [5]. **G.DREUX**, « Nouveau Guide du Béton », Eyrolles, 2^{ème} trimestre de 1981.
- [6]. **GRANITEX**, « Adjuvant, Résine et mortiers », catalogue, 2005.
- [7]. **Béton hydraulique**, Technique de l'ingénieur.
- [8]. **R. Maillot**, « Mémento Technique des Granulats », les presses de l'école des mines, paris, 2001.
- [9]. **R.DEGEIMBRE**, « Technologie Des Bétons », Centrale de l'A.E.E.S (Université de LIEGE, Faculté des Sciences Appliquées), 2^{ème} édition.
- [10]. **Norme algérienne des granulats**, E.N.G (Etablissement National des Granulats), édition INAPI, NA.255, 1990.
- [11]. **F. Gorisse**, « Essais et contrôle des bétons », édition Eyrolles, 1978.
- [12]. , « propriété et rhéologie du béton »,
- [13]. **Normalisation française**, P 18-572, afnor, 1990.
- [14]. **Algérie Equipement**, revue technique de l'école nationale des travaux publics, Janvier 2004
- [15]. **ABC BETON**, febelcem, 2004.

Annexes

Annexe A-1

Tableau 1 - Récapitulatif des spécifications exigées par la norme P 18-541, Cas général

Propriété	Valeur limite absolue ou valeur spécifiée (Vs) si plus de 14 résultats datant de moins de 15 mois	Valeur limite absolue si plus de 14 résultats datant de moins de 15 mois (borne = $V_a \pm U$)
Piliers :		
-passant à 2 mm	$\geq 99 \%$	$\geq 94 \%$
-passant à 0,125 mm	$\geq 80 \%$	$\geq 75 \%$
-passant à 0,063 mm	$\geq 70 \%$	$\geq 65 \%$
Granularité des sables (sable résultant) :		
- passant à D mm	$\geq 85 \%$	$\geq 80 \%$
-passant à 0,08 mm	$\leq 12 \%$	$\leq 15 \%$
-dispersion	Etendue ≤ 3 points ou coeffi- cient de variations $\leq 20 \%$	$\geq 1,65$ et $\geq 3,35$
-module de finesse :	$\geq 1,8$ et $\geq 3,2$	\geq moyenne $-0,50$ et
- valeurs limites	\geq moyenne $- 0,35$ et	\leq moyenne $+0,50$
-tolérance sur Vs	\leq moyenne $+ 0,35$	
Granularité des gravillons si $D \geq 2,5 d$: passant à $(d + D)/2$	\leq moyenne $+ 17,5$ ≤ 75 \geq moyenne $- 17,5$ ≥ 25	$\leq V_{ss} + 10$ $\geq V_{si} - 10$
Absorption d'eau Ab	$\leq 5 \%$	$\leq 5,5 \%$
Résistances mécaniques :		
-coefficient Los Angeles	≤ 40	≤ 43
- coefficient de friabilité des sables (sable de recyclage et alluvionnaires)	≤ 60	≤ 65
Coefficient d'aplatissement	$\leq 30 \%$	$\leq 34 \%$
Homogénéité	$\geq 95 \%$	$\geq 90 \%$
Impuretés prohibées et débris végétaux	$\leq 0,1 \%$	$\leq 0,12 \%$
Sensibilité au gel	$\leq 50 \%$	$\leq 55 \%$

Annexe A-2

Propriété	Valeur limite absolue ou valeur spécifiée (V4) si plus de 14 résultats datant de moins de 15 mois	Valeur limite absolue si plus de 14 résultats datant de moins de 15 mois (borne = $V_a \pm U$)
Alcali-réaction : alcalins	A communiquer sur demande	
Propreté des fillers ; V_{Bta}	≤ 1	$\leq 1,3$
Propreté des sables : - E_{sv} - E_s	≥ 75 ≥ 70 (65 et 60 pour sables concassés ou broyés)	≥ 70 ≥ 65 (60 et 55 pour sables concassés ou broyés)
-valeur de bleu V_{Bta}	≤ 1	$\leq 1,3$
Propreté des gravillons (passant à 0,5 mm) :		
- gravillons non concassés	$\leq 1,5\%$	$\leq 2\%$
- gravillons concassés	$\leq 3\%$	$\leq 3,5\%$
Teneur en soufre total.		
- exprimée en S	$\leq 0,4\%$	$\leq 0,45\%$
- exprimée en SO_3	$\leq 1\%$	$\leq 1,1\%$
Teneur en sulfates (en SO_3)	$\leq 0,15\%$	$\leq 0,20\%$
Matières organiques		Essai colorimétrique négatif
Teneur en chlorures	A communiquer si $> 0,06\%$	-
Teneur en éléments coquilliers des gravillons	$\leq 10\%$	$\leq 15\%$

Annexe B

	Roches	Minéraux sensibles en milieu alcalin
MAGMATIQUE	-Granites	Quartz à réseau déformé, présentant une extinction ondulante. Minéraux feldspathiques altérés, joints de grains ouverts.
	-Rhyolites -Dacites -Andésites -Trachyandésites -Basaltes	Présence de verres siliceux ou de verres basaltiques plus ou moins dévitrifiés, présence de tridymite, de cristobalite, d'opale.
	-Obsidienne -Tufs volcaniques -Rétinites	Verres riches en silice plus ou moins dévitrifiés souvent micro fissurés.
METAMORPHIQUE	-Gneiss -Mica schistes	Quartz, à extinction ondulante. Micro quartz de seconde génération ; joints de grains ouverts, minéraux feldspathiques et micacés altérés.
	-Quartzites	Quartz associé à un ciment quartzeux et opalin. Présence de micro quartz de seconde génération.
	-Cornéennes	Présence de phyllosilicates. Présence de quartz à extinction ondulante ou de quartz micro fissurés.
SEDIMENTAIRE	-Grés	Ciment siliceux mal cristallisé, joint de grains élargis.
	-Grauwackes -Sillites	Minéraux phylliteux associés. Présence d'opale, de quartz microcristallins.
	-Chailles -Silex	Présence de calcédoine, d'opale.
	-Calcaires -Calcaires dolomitiques	Présence de silice de type opale en micronodules ou diffuse en réseau, associée ou non à des sulfures sédimentaires et des phyllites

Tableau 1 : Risque Alkali-réaction

Annexe C-1

Conditions d'exposition		Exigences	
		E/C	C _{min} kg/m ³
1	Environnement sec	0,65	260
2a	Environnement humide	Sans gel	0,60
2b		Avec gel	0,55
3	Environnement humide avec gel+agents déverglaçant	0,50	300
4a	Environnement marin sans gel	Sans gel	0,55
4b		Avec gel	0,50
5a	Environnement chimiquement agressif	faible	0,55
5b		modéré	0,50
5c		fort	0,45

Tableau 1 : Classes d'environnement

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des sables		roulé	concassé	roulé	concassé	roulé	concassé
Dosage en %	400 + Fluide	-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

Tableau 2 : Valeurs de K

Annexe C-2

	Sables et graviers roulés	Sables roulés et graviers	Sables et graviers de
Consistance très fluide, mise en œuvre sans serrage	32 et au-dessus	34 et au-dessus	38 et au-dessus
Consistance fluide pour faible serrage	30 - 32	32 - 34	36 - 38
Consistance molle pour serrage moyen	28-30	30- 32	34 - 36
Consistance ferme pour serrage soigné	26-28	28 - 30	32 - 34
Consistance très ferme pour serrage puissant	24-60	26-28	30-32
Consistance de terre humide, serrage très puissant	24 et au-dessous	26 et au-dessous	30 et au-dessous

Tableau 3 : Valeurs de A

Qualité 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 4 : Valeurs de G

Annexe D -1-

Les différents modes opératoires d'identification des granulats

1. Analyse granulométrique :

On utilise la série de tamis suivante :

25-20-16-12.5-10-8-6.3-5-2.5-1.25-0.63-0.315-0.16-0.08 et à l'aide d'une tamiseuse.

On procède comme suit :

- A l'aide de la balance, on pèse une quantité de l'échantillon de granulat qui va être $\geq 0,2D$;
- On place la série de tamis de haut en bas par celui ayant la grande ouverture vers la plus petite, c'est à dire : 5-2.5-1.25-0.63-0.315-0.16-0.08 (mm) ;
- On verse la quantité de l'échantillon de granulat dans le premier tamis ;
- On place la série de tamis dans la colonne de la tamiseuse, on laisse tamiser pendant dix minutes ;
- Après les dix minutes de tamisage, on pèsera le poids des refus de chaque tamis ainsi les passant du dernier tamis (celui de 0,1 mm).

C. Equivalent De Sable :

Son principe est de laver un échantillon de sable dans des conditions normalisées et le laisser reposer pendant un temps prescrit, puis mesurer :

H1 qui correspond à la hauteur sable propre + éléments fins.

H2 ou H'2 qui correspond à la hauteur du sable propre uniquement.

On distingue :

- Equivalent de sable visuel, noté ESV.
- Equivalent de sable proprement dit, noté ESP.

On aura par définition :

$$\boxed{ESV = H_2/H_1 * 100 (\%)}$$

$$\boxed{ESP = H'_2/H_1 * 100 (\%)}$$

H2 : la hauteur du sable propre mesurée à vue (avec la règle).

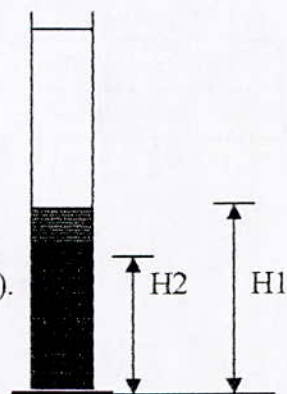
H'2 : la hauteur du sable propre mesurée par le piston.

$$H'_2 = H_t - H_p$$

Tels que :

Ht : est la hauteur de l'éprouvette qui vaut 43.5 cm.

Hp : est la hauteur mesurée du piston.



Annexe D -2-

On l'exécute comme suit :

- On remplit les éprouvettes par la solution lavante jusqu'au premier trait uniquement (à 10 cm).
- On pèse une masse de 120 g de chaque échantillon.
- On verse peu à peu et tout doucement le sable dans l'éprouvette, et cela pour minimiser les vides entre les grains.
- On élimine les bulles d'air tout en frappant l'éprouvette contre la paume de la main, puis on laisse reposer pendant 10 minutes.
- Après les dix minutes, on bouche l'éprouvette et on l'agite à l'aide d'un agitateur automatique pendant 30 secondes.
- On remplit maintenant l'éprouvette jusqu'au deuxième trait, en rinçant les parois de l'éprouvette avec la solution lavante, et on laisse le tout reposer pendant 20 minutes.
- Après les 20 min, on mesure en premier à vue les hauteurs H_1 et H_2 à l'aide d'une règle gradué verticalement.
- Après cela, on mesure H'_2 maintenant à l'aide du piston, et cela en le faisant rentrer dans l'éprouvette doucement. Une fois que le piston ne pénètre plus, on serre le piston et on le fait sortir afin de mesurer la hauteur H_p .

1. La densité apparente :

C'est le quotient de la masse d'un échantillon à son volume total (pores compris). On la mesure en pesant un récipient de volume connu rempli du matériau non tassé et arasé.

2. La densité absolue :

On utilise pour cela un pycnomètre normalisé. On le remplit avec l'eau et on pèse sa masse m . on met 1000 g du granulats à étudier, en laissant un peu d'eau pour la sécurité du pycnomètre, et on pèse sa masse M . puis on utilise la formule suivante :

$$d_{abs} = \frac{1000}{M - m} + 1$$

3. Teneur en eau :

- On pèse une quantité de granulats humide M_h ;
- On le met dans l'étuve à 105° jusqu'à avoir une masse constante ;
- On pèse ses granulats secs M_s .

La teneur en eau est : $w = 100 \times \frac{M - M_s}{M_s}$

Annexe D -3-

4. Coefficient d'absorption :

- On lave les granulats sur un tamis de 4mm ;
- On les Met à l'étuve à 105° jusqu'à une masse constante ;
- On prend une quantité Ms et on le met dans l'eau pendant 24 heures ;
- On essuie les granulats avec un chiffon absorbant et on pèse cette quantité Ma.

La formule est : $Ab = 100 \times \frac{Ma - Ms}{Ms}$

5. Essai Los Angeles :

Son objet est de définir la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats.

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angeles telle qu'elle est décrite dans la présente norme.

Classes granulaire (mm)	Charge de boulets		
	Nombre de boulets	Masse totale des boulets (grammes)	Tolérance (grammes)
4/6.3	7	3080	
6.3/10	9	3960	
10/14	11	4840	+ 20 à- 150
10/25 10/16(60%) 16/25(40%)	11	4840	
16/31.5	12	5280	
25 / 50	12	5280	

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité :

$$100 \times \frac{m}{M}$$

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, coefficient Los Angeles du matériau.

Annexe D -4-

Les étapes de cette mesure sont :

- Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand ;
- Laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve à 105° Jusqu'à l'obtention de la masse constante ;
- La masse de l'échantillon pour essai sera 5000g ;
- Replacer le couvercle ;
- Faire effectuer à la machine 500 rotations sauf pour la classe 25-50 où l'on effectue 1 000 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 et 35 tr/min ;
- Recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau ;
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm, le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération ;
- Laver le refus au tamis de 1,6 mm. Egoutter et sécher à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante ;
- Peser ce refus une fois séché. Soit m' le résultat de la pesée.

7. Essai d'usure Micro-Deval :

Il a l'objet de la mesure de la résistance à l'usure d'un granulat. Cette résistance à l'usure pour certaines roches n'est pas la même à sec ou en présence d'eau. Les étapes à suivre dans cet essai sont les suivantes :

- Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105 °C, jusqu'à masse constante ;
- Tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie ;
- Introduire dans le cylindre d'essai, disposé ouverture vers le haut, la charge abrasive, puis les 500 g de matériau préparé.

Modalités de l'essai Micro-Deval

Classe granulaire	Poids de l'échantillon d'essai	Nombre de tours	Charge abrasive
4/6.3	500 g ± 2 g	12 000 ou 2 h	2 000 g ± 5 g
6.3/10	500 g ± 2 g	12 000 ou 2 h	4 000 g ± 5 g
10/ 14	500 g ± 2 g	12 000 ou 2 h	5 000 g ± 5 g
25/50	10 kg ± 20 g	14000ou2h20mn	-

Annexe D -5-

Pour effectuer un essai en présence d'eau, on ajoute 2,5l d'eau.

- Mettre les cylindres en rotation à une vitesse de 100 tr/min \pm 5 tr/min pendant 2 h ;
- Après essai, recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac ;
- Tamiser le matériau dans le bac sur le tamis 5 de 1,6 mm; la charge abrasive sera retenue sur un tamis de 8 mm ;
- Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive ;
- Sécher te refus à 1,6 mm ;
- Peser ce refus au gramme près, soit m' le résultat de la pesée.

Le coefficient micro-Deval Mde ou MDS est par définition le rapport :

$$100 \times \frac{m}{M} = 100 \times \frac{M - m}{M}$$

séché puis tamisé de nouveau à sec à 0.1 mm.

Si m est le tamisât, le coefficient de friabilité est :

$$FS = \frac{100 \times m}{500} = \frac{m}{500}$$

الملخص

الأهداف الأساسية من مشروع نهاية الدراسة هي التركيز على خصائص الحصى وتأثيرها على نوعية الخرسانة إذن اختيار الحصى يكون معتمدا أساسا على النوعية المعدنية، الكتلة الحجمية، النقاوة، الصلابة، امتصاصية الماء.

من أجل هذا وبهدف زيادة مقاومة الخرسانة وسيولته اللتان هما النوعية الأساسية المطلوبة، إذن لا بد من معرفة وبدقة الدور الأساسي الذي يلعبه كل مكون، مشاركته وتأثيره على مقاومة الخرسانة.

كلمات مفتاحية:

الحصى، النقاوة، الطبيعة المعدنية، الخرسانة الغضة، السلوك.

Résumé

Les principaux objectifs de notre projet de fin d'études sont l'appréciation des caractéristiques des granulats et de leur influence sur la qualité du béton. donc le choix des granulats est basé principalement sur la nature minéralogique, la masse volumique, la propreté, la dureté, la granulométrie, l'absorption d'eau.

Pour cela et dans le but d'améliorer la résistance du béton et son ouvrabilité qui sont les qualités essentielles recherchées, il convient de connaître avec précision le rôle que joue chaque constituant, sa participation ainsi que son influence sur la résistance du béton.

Mot clés :

Granulats, propreté, nature minéralogique, béton frais, comportement.

Abstract

The principal aims of our project are the appreciation of the characteristics of the aggregates and of their influence on the quality of the concrete thus the choice of the aggregates, depends mainly on mineralogical nature, density, cleanliness, hardness, grading and absorption of water.

For that and with an aim of improving resistance of the concrete and its workability which are sought essential qualities, it is advisable to know with precision the role which each component plays, its participation thus its influence on the resistance of the concrete.

Key words:

Aggregates , mineralogical nature, cleanliness freshly, concrete, behaviour.
