

N° d'ordre...../FSI/UMBB/2017.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche scientifique



جامعة امحمد بوقرة- بومرداس

Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

Faculté Des Sciences de l'ingénieur

Département de Génie des matériaux

Mémoire de fin d'étude

En vue l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière Génie des matériaux

Spécialité Contrôle qualité des matériaux

THEME

Contribution a une étude comparative sur le contrôle destructif (CD) et non-destructif (CND) des bétons sur site.

Présenté et soutenu par:

- M^{elle} ROUMANE Sarra.
- M^{elle} NECHATE Dyhia.

Promoteur :

M^r : P^r BENMOUNAH. A

Année universitaire :2016/2017

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier le bon Dieu le tout puissant de nous avoir illuminé et ouvert les portes du savoir, et nous avoir donné la volonté et le courage pour réaliser ce mémoire.

Nous tenons en premier lieu, à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur M^r BENMOUNAH. A qui a bien voulu nous encadrer pour l'élaboration et le suivi théorique de notre projet de fin d'étude.

Nous tenons à remercier sincèrement M^r le directeur de « Centre d'études technologiques des matériaux de construction » (CETIM) pour nous avoir accepté d'effectuer le stage pratique au sein de ce centre, et pour la confiance qu'il nous a témoigné.

*Nous tenons à exprimer toutes nos gratitudes à M^r Aribi chouaib
Pour ses conseils et son aide.*

Il nous est particulièrement agréable de témoigner notre reconnaissance à nous encadreur M^r MORSLI Hamza, ZIANI Karim, LOUNAS Oualid pour leurs suivi pratique et leurs conseils instructifs et précieux.

Nous remercions le chef de département M^r Benothmane pour sa disponibilité à tous les moments difficiles.

Nous tenons à exprimer aussi notre vive reconnaissance aux enseignants de département de génie des matériaux qui ont contribué à notre formation.

Enfin, que toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin nous ont généreusement offert leurs concours à l'élaboration de ce travail, trouvant ici l'expression de notre profonde sympathie.

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont encouragées pour réaliser ce travail.



Dédicace :

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, pour m'avoir donné la force et la patience

Avec toute estime et mon amour, je dédie ce travail.

A mon père qui a su a me soutenir durant les moments les plus difficiles de ma vie ,et qui est toujours présent et continue de l'être pour faire mon bonheur. Merci pour les sacrifices consenties pour que tes enfants grandissent et prospèrent .

A ma chère mere , qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie,

A ma sœur aînée dehbia et son mari fawzi et leurs anges meriem et mohamed, et ma sœur massissilia et son mari youcef et leurs petite ange meriem, et ma petite sœur fella

A mon frère idir .

A mon binôme avec qui j ai passé de très bon moment de travail, et a sa famille

A mes chères amies de proche ou de loin sans oublier (

Besma, Khadija, Lila, Nesrine, Anissa, Sarra , Meriem. Ahlem, besma)

A toute la famille Nèchat .

Dyhia

Dédicaces

*Je tiens tout d'abord à remercier le bon Dieu de m'avoir aidé à
Réaliser cet ouvrage.*

Je dédie ce mémoire :

A mes très chers parents avec toute ma reconnaissance.

*A ma chère maman qui n'a jamais cessé de ménager ses efforts
Pour que j'atteigne ce niveau. Ni sacrifices, ni privations ne l'ont
Empêché d'accomplir son devoir de mère soucieuse de l'avenir de
ses enfants.*

*A mon cher papa qui a su se montrer patient, compréhensif et
Encourageant, sa chaleur paternelle a été et sera toujours pour moi
D'un grand réconfort. Ce travail est le fruit de tes sacrifices.*

A mes adorables sœur : Mounia et Loubna.

A mon cher frère : Younes.

A la mémoire de ma grande mère.

A mon binôme Dyhia.

*A mes chères ami(e)s : Lamia, Amal, Hanan, Besma, Salma, Zakia,
Fawzi, Mohamed, Hakim et Hamza.*

*Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon
affection et mes pensées, vous êtes pour moi des frères, sœurs et des amis
sur qui je peux compter*

*En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les
moments que nous avons passé ensemble, je vous souhaite une vie pleine
de santé et de bonheur.*

A toute ma famille.

Ainsi qu'à tous ceux qui me sont chers.

SARRA .R

Liste des abréviations

D_{max}: Dimension maximale des granulats.

CaO: La chaux.

M_{va}: La masse volumique apparente.

V: La vitesse d'impulsion (m/s).

T : Le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur en (s).

Ø: Diamètre.

μ s: Micro seconde.

BPE: Béton Prêt à l'emploi.

BT: Béton témoin.

CD: Contrôle destructif.

CND: Contrôle non destructif.

SSB: Surface spécifique Blain.

ES: Equivalent de sable.

M_f: Module de finesse du sable.

S₁: Proportion de sable du KADDARA.

S₂: Proportion de sable du BOUSSAADA.

C/E: Rapport Ciment/ Eau.

R_c (v): La résistance à la compression en fonction de la vitesse de propagation.

R_c (I): La résistance à la compression en fonction de l'indice de rebondissement.

EP: Eprouvette.

R_c : La résistance en compression.

R_{28j}: La résistance à 28 jours.

I : L'indice de rebondissement.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Partie théorique :

Histoire du béton.....	4
Chapitre I : Généralité sur le béton.	
I- 1- INTRODUCTION :.....	6
I - 2 - Définition du béton :.....	6
I - 3 - Classification des bétons	7
I - 3 - 1 - Introduction :.....	7
I - 3 - 2 – Classes d'exposition des bétons :.....	7
A - Exigences spécifiées par la norme NF EN 206-1 :.....	9
B - Exigences liées aux classes d'exposition :.....	9
I - 3 – 3 – Les trois types de béton :.....	9
I - 3 - 4 - Classes de consistance du béton frais :.....	10
I - 3 - 5- Classes de résistance à la compression des bétons durcis :.....	10
I- 3-6- Classes de masse volumique :.....	13
I-3-7- Classe de teneurs en chlorures :.....	13
I - 3 - 8 - Dimension maximale des granulats :.....	14
I-3- 9 -Valeurs limites pour le classement des attaques chimique :.....	14
I-3-10-Valeurs limites spécifiées pour les bétons :.....	15
I- 3 - 11 - Exigences sur les constituants :.....	16
I – 4 - Les constituants du béton :.....	17
I – 4 -1- Le ciment :.....	17
I – 4 -1 -1- INTRODUCTION :.....	17
I-4-1-2- Définition:.....	18
I-4-1-3 - Différents types des ciments courants :	18
I-4-1-4-Les ciments a caractéristiques complémentaire normalisées :	19
I-4-1-5-Les caractéristiques des ciments	20
A-Caractéristiques physiques	20

SOMMAIRE

A-1- Comportement physico-chimique de la pate	20
A-2- Indice d'hydraulicité	21
A-3- Prise	22
A-4- Durcissement	22
A-5- La fausse prise	22
A-6- Finesse de mouture	23
A-7- Retrait	23
A-8- Expansion	23
A-9- Gonflement	24
B - Caractéristiques chimiques :	24
C-Caractéristiques mécaniques des ciments courants :	25
I-4-2 -L'eau :	26
I-4-2-1- INTRODUCTION :	26
I-4-2-2- Définition :	26
I-4-2-3- Le rôle de l'eau de gâchage.....	27
I-4-3-Les granulats	27
I-4-3-1-INTROUDUCTION.....	27
I-4-3-2- Définitions.....	28
I-4-3-3- Les classes des granulats	29
I-4-3-4- Caractéristiques des granulats.....	30
A- Caractéristiques géométriques.....	30
A-1- Classe granulaire.....	30
A-2- Courbe granulométrique.....	30
A-3- Module de finesse.....	31
A-4- Forme et coefficient d'aplatissement.....	31
B - Caractéristiques physico -chimiques	32
B-1- Masse spécifique ou masse volumique absolu des grains.....	32
B-2- La masse volumique apparente	32
B-3- La compacité et la porosité	33
B-4- Coefficient d'absorption	33
B-5- Foisonnement des sables	33
B-6- La propreté	33
C - Caractéristiques mécaniques	34
C-1- Los angles (LA).....	34

SOMMAIRE

C-2- MICRO DEVAL	35
C-3-Essais DEVAL.....	35
C-4- Sensibilité au GEL – (G)	35
I-4- 4- Le sable :	
I - 4-4-1 - Propriétés recherchées dans un sable	36
A - La granulométrie.....	36
B - La propriétés du sable	36
C - La compacité	36
I-4-5- Le choix et le dosage des granulats	37
I-4-6- Les adjuvants.....	37
I-4-6--1- INTRODUCTION.....	37
I-4-6-2 – Définition	38
I-4-6 -3- Classification	38
I-4-7-Les additions	39
I - 4 - 7- 1-Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau	39
I - 4 - 7-2- Les cendres volantes	39
I - 4 - 7 -3-La fumée de silice	40
I - 4 - 7 -4-Les additions siliceuses	40
I - 4 - -5-Les additions calcaires	40
 Chapitre II : Les propriétés du béton.	
II-1- INTRODUCTION	41
II- 2-Propriété du béton a l'état frais	41
II-2-1- Ouvrabilité	41
II- 2-1-1- Mesure de la maniabilité du béton	42
A - Essai d'affaissement au cône d'ABRAMS	42
B - Maniabilimètre LCPC	43
II- 2-1-2 - Paramètres affectant la maniabilité	43
II- 2 - 2 - Densité réelle du béton frais	44
II- 2- 3- Mesure de la teneur en air occlus.....	44
II- 2 - 4 - Ségrégation	45
II- 2 - 5- Ressuage	45
II-2- 6- Propriétés rhéologiques	45

SOMMAIRE

II- 3-Propriété du béton a l'état durci	46
II- 3- 1 - Résistance mécanique	46
II – 3 -1- 1- Essais destructifs	46
A-Résistance à la compression	46
B - Résistance à la traction	47
C - Le Carottage	48
C – 1 - Généralités	48
C – 2- Principe	50
C – 3 - Définitions	50
C – 4 - Le matériel	51
C - 5- Facteurs influent la résistance des carottes	52
II- 3- 1 -2- Essais non destructifs	52
A - Essai par scléromètre	54
A – 1 - introduction	54
A – 2 - Historique	54
A - 3 - Appareillage	55
A – 4 - Méthodologie	57
B - Les ultrasons	60
B – 1 - introduction	60
B – 2 – Historique	61
B – 3 - Principe	62
B - 4 - Appareillage	62
B – 5 - Mode Opératoire	64
a - Travaux préparatoires	64
b - Points de mesures	64
c - Distances minimales entre points de mesures	64
d - Étalonnage de l'appareil	64
e - Manières de mesure	64
1- mesures en transparence (directe).....	64
2 - mesures en surface (indirecte)	65
3 -- la mesure en semi-directe	65
B – 6 - Facteurs affectants la vitesse de propagation	66
II - 3 – 1- 3 - Déformation des bétons	68
a – Fluage	68

SOMMAIRE

b - Élasticité du béton	69
C - Effet «Poisson»	70
D - Retrait du béton	70
E- Durabilité des bétons.....	70

Chapitre II : Le Béton Prêt à l'Emploi.

III – 1 - INTRODUCTION.....	71
III – 2 - L'origine et le développement du BPE.....	71
III - 3 --Définition de béton prêt a l'emploi	71
III – 4 - Fabrication du béton	71
A- La réception et le stockage.....	72
B - Le dosage	72
C - Le malaxage	72
D - Le poste de commande.....	72
E - Le laboratoire et les contrôles.....	73
III – 5 - Description de la chaîne de production	74
III - 6 - Comportement des constituants au cours de la fabrication	76
III – 7 - L'approvisionnement, le stockage et le dosage des constituants.....	77
III – 7 – 1 - Le stockage duciment.....	77
III – 7 – 2 - Le stockage des granulats.....	78
III – 7 – 3 - Le stockage des adjuvants.....	78
III – 7 – 4 - Le dosage des constituants	78
III – 7 – 5 - Le malaxage des constituants	78
III – 7– 6 -Les paramètres du malaxage.....	79
III – 7 – 7-Les services.....	79
III – 7- L'usage de BPE.....	81
A - Dans le secteur routier.....	81
B - Dans les tunnels.....	81
C-Pour la réalisation de dalles	81
III – 8 - Les avantages du BPE	82
III - 10- Les inconvénients du BPE.....	82

SOMMAIRE

Partie pratique:

I- Caractérisation des matières premières.....	84
II- Formulation.....	100
II- 1- Formulation d'un béton TEMOIN par la méthode de "D. GORISSE".....	100
II- 2- Formulation d'un BPE par la méthode de "D. GORISSE".....	106
III - Méthodologie de prélèvement des carottes et caractérisation des éprouvettes es les carottes.....	112
III- 1 – La méthodologie de prélèvement des carottes pour le BT et BPE.....	112
III- 2- La caractérisation des éprouvettes normalisée et les carottes.....	113
III - Les méthodes non destructives	114
A - Essai ultrason.....	114
B-Essai scléromètre.....	117
C- Essais de compression sur les éprouvettes normalisées et les carottes et exploitation des résultats	120
III- 1 -L'influence de POLYCARBOXYLATE sur les paramètres de CND et CD	123
III – 2-Tableau récapitulatif et comparatif.....	125
Conclusion générale.....	128
ANNEX.	
Liste des figures.	
Liste des tableaux.	
Référence bibliographiques.	



Introduction générale



INTRODUCTION GENERALE :

Le matériau béton, est irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques. Le compromis trouvé entre résistance mécanique, économie, esthétique et facilité de mise en œuvre, offre à ce matériau la première place dans la construction au niveau mondial. Au niveau régional et national le béton est le matériau de construction utilisé par excellence au sein de tous les chantiers, aussi bien dans les secteurs du bâtiment que ceux des travaux publics ; il n'a pas de substitut économique et performant à condition qu'il présente les qualités requises.

Les ouvrages en béton se comportent généralement assez bien même s'ils sont exposés à un environnement sévère. Néanmoins des statistiques montrent que certaines difficultés surgissent au cours de la période de construction pour différentes raisons ; la plus fréquente est une insuffisance de la résistance du béton à la compression.

En effet, suite aux constats et expertises effectués sur des structures en béton armé après des catastrophes naturelles « **séisme BOUMERDES 2003** ». Il a été constaté que l'un des facteurs majeurs à l'origine de l'ampleur des désastres est dû au non-respect des normes de construction. La qualité du béton mis en place est de loin inférieure à celle officiellement mentionnée par les essais d'écrasement aux laboratoires.

Traditionnellement ; la méthode normalisée utilisée, pour évaluer la qualité du béton dans les ouvrages en béton comprend, les essais de résistance à la compression, à la flexion et à la traction, effectués sur des éprouvettes coulées au même moment. Mais cette méthode a beaucoup d'inconvénients qui proviennent du fait que : les résultats ne sont pas immédiatement disponibles ; le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage, par le fait même que la cure ou le compactage peuvent être différents ; d'autre part, les propriétés de résistance d'une éprouvette dépendent de sa grosseur et de sa forme.

Le non-respect des propriétés mécaniques du béton sur chantier est dû essentiellement à différents facteurs :

- ✓ L'échantillon est non représentatif.
- ✓ La - non qualification de la main d'œuvre.
- ✓ L'absence de contrôle strict et continu.
- ✓ La difficulté de maintenir une formulation constante pendant la mise en œuvre du Béton.
- ✓ Les propriétés de résistance d'une éprouvette de béton dépendent de sa grosseur et de sa forme.

Le développement de méthodes fiables d'auscultation et de vérification des propriétés du béton in situ s'avèrent alors d'une importance particulière. Plusieurs méthodes non destructives d'évaluation ont été mises au point. Ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des moyens non destructifs.

Parmi les méthodes non destructives les plus populaires et habituellement utilisées du fait de leur simplicité et de leur moindre cout, pour évaluer certaines propriétés et déterminer la résistance du béton sur site sont :

- Les ultrasons.
- Le scléromètre.

La méthode d'ultrasons consiste à mesurer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques est actuellement la seule du genre qui permet d'effectuer des essais de résistance sur le béton coulé sur place. Cette méthode permet de mesurer le temps de propagation d'une impulsion ultrasonore à travers le béton.

La représentativité des résultats obtenus par cette méthode dépend de plusieurs paramètres intrinsèques au béton : sa maturité (jeune âge, prise) ; l'homogénéité du matériau (ségrégation, nature, zone), la détection d'un ou de plusieurs défauts (fissures, amas, porosités, vides), l'endommagement et la caractérisation mécanique (microfissuration, présence de vide, atteintes chimiques), les dimensions et nature des granulats.

L'essai au scléromètre évalue la résistance en compression du béton par le rebond d'une masse élastique (marteau). Malgré le fait que l'essai au scléromètre est très simple à réaliser, il présente plusieurs inconvénients :

- ✓ il est sensible aux variations locales dans le béton. Par exemple, si la tête du marteau est appuyée sur un granulat, l'indice de rebondissement sera plus élevé que s'il est situé sur un vide.
- ✓ la tête du marteau doit toujours être perpendiculaire à la surface du béton, ce qui n'est pas facilement réalisable. De plus, la position du marteau par rapport à la verticale influencera l'indice de rebondissement, la gravité agissant sur le déplacement de la masse du marteau.

De nos jours le béton connu beaucoup d'améliorations pour l'évaluation de leur résistance par l'utilisation des adjuvants, permis celles les **SUPERPLASTIFIANTS**, dans notre travail nous avons utilisé un **POLYCARBOXYLATE** pour mieux voir si celui la a une influence sur les paramètres de **CD** et **CND**.

❖ **L'objectif de travail :**

L'objectif de cette contribution est donc:

- De mieux comprendre le rôle de **CD** et **CND**.
- De comprendre l'influence des **POLYCARBOXYLATES** sur les paramètres de **CND** et **CD**, (par un indice sclérométrique, ultrason et compression).
- De comparer la précision et évaluer la fiabilité des essais **non destructifs** et **destructifs**.

Les trois essais ont été pratiqués sur des planchers en béton **Témoin** et en **BPE**, par l'organisme de contrôle ; le **CTC** de **BOUMERDES**.

Pour cela on a divisé notre travail en 2 parties ; une partie théorique et une partie expérimentale.

La première partie s'articule autour des chapitres suivants :

- Une introduction générale qui présente la position du problème et précise le but de cette recherche.
- Un historique sur le béton (de puis sa naissance jusqu'à nos jours).
- Le premier chapitre concerne une généralité sur les bétons ; classifications, types, constituants du béton.
- Le deuxième chapitre sur les propriétés du béton à l'état frais et durci.
- Dans le chapitre suivant une généralité sur le **BPE**.

La deuxième partie est subdivisée en **4 étapes** :

- La première étape est destinée à la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentant les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des matériaux utilisés.
- **La deuxième partie du travail** est consacrée à la formulation d'un béton **Témoin** et un **BPE**, selon la méthode de **DREUX GORISSE** ; et la caractérisation du béton à l'état frai et durci.
- **La troisième partie**, présente la méthodologie de prélèvement des carottes, et la caractérisation des éprouvettes normalisées et ces carottes qui est effectué par 2 méthodes destructif (écrasement) et non destructif (scléromètre et ultrason), ainsi que l'influence de **POLYCARBOXYLATE** sur les paramètres de **CND** et **CD**.
- **Finalement**, par une étude comparative entre le **CD** et le **CND**, puis on a terminé par la présentation et l'interprétation des résultats, une conclusion générale et des recommandations.



Partie théorique



HISTOIRE DU BETON

Le béton est un matériau particulier, fruit d'une invention ; à été considéré longtemps comme un matériau de construction. Les Chinois, les Egyptiens, les Mayas construisaient avec des mortiers à base d'une chaux obtenue par cuisson de roches calcaires, suivie d'une extinction à l'eau. Les Romains fabriquaient des liants hydrauliques, comme en témoigne Vitruve dans ses 10 livres d'architecture. Il leur revient d'avoir découvert au début de notre ère qu'en ajoutant au mortier de la terre de Pouzzole issue de cendre volcaniques, le béton donc est le mélange d'un liant hydraulique (ciment), de granulats (gravier) et d'eau ; l'eau provoque une réaction chimique de prise avec le ciment qui, en durcissant à l'air, lie tous les composants en un ensemble homogène et monolithique. [1]

Cette opinion été basée sur le bon comportement de quelque construction maritimes romaines, exécutés 250 ans av.J.C ainsi que de certaines constructions monumentales ; parmi les quelles le panthéon de Rome qui terminé en 28 av.J.C. cet édifice circulaire, composé de murs de 6 m d'épaisseur, revêtus intérieurement de briques céramiques, se termine par une calotte sphérique de 37.2 m de diamètre. A sa partie supérieure, cette calotte a un orifice circulaire de 9 m de diamètre, par lequel l'intérieur du Panthéon reçoit la lumière du jour. Les murs ont été exécutés en béton, dont le granulats est un tuf volcanique et le liant un mélange de chaux et de pouzzolane ; pour la calotte, on a utilisé le même liant, mais le granulats était constitué de pierre ponce. Cette construction deux fois millénaire se trouve encore en parfait état. [2]

. La première histoire du béton est repose tout d'abord sur des stratégies d'inventeurs et d'entrepreneurs. L'ingénieur **BELIDOR**, auteur de « L'architecture hydraulique » (1737) étudia la composition du béton et introduisit le mot « béton » dans son sens actuel ; C'est en fait le mariage ciment-métal, appelé ciment armé, puis béton armé, qui va donner au béton son plein essor.

L'invention du ciment par **LOUIS VICAT** en 1817, celle du ciment Portland par **ASPDIN** en Ecosse en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en France en 1830 préparent l'avènement du béton. [3], par exemple ; la barque en béton (1848) de **JOSEPH-LOUIS LAMBOT** (en fil de fer recouvert de ciment) baptisée le « **bateau ciment** ».; et aux caisses à fleurs (1849) de **JOSEPH MONIER** succèdent les réalisations d'entrepreneurs qui développent des « systèmes » de béton. **FRANÇOIS COIGNET**; qui met au point le béton aggloméré ; construit en 1852 le 1^{er} immeuble en béton coulé avec fers profilés enrobés, terrasse à St-Denis ; 1867 : immeuble en béton aggloméré (92, rue de Miromesnil, 75008) ,dont les brevets de 1877 et 1878 seront exploités en

Allemagne ; le plus significatif, l'immeuble Hennebique à Paris (1898), rue Danton (1900) à Paris et la villa de l'architecte à Bourg-la-Reine (1903) ; en 1910 Pilier-Champignon créé à Zurich par le Suisse **ROBERT MAILLART** ; (1913) théâtre des Champs-Élysées **D'AUGUSTE PERRET** ; sont des exemples encore existants. Donc après la 1^{ère} guerre mondiale, les brevets de plusieurs systèmes constructifs passent dans le domaine public ; le béton devient un matériau anonyme. [1]

En 1929, **EUGENE FREYSSINET** va révolutionner le monde de la construction en inventant le « béton précontraint ». La fin des années 80 voit l'arrivée des « Bétons Hautes Performances (**BHP**) ». Lors de la dernière décennie de nombreuses innovations ont révolutionné les constructions en béton, parmi lesquelles les « Bétons Autoplanants (**BAP**) » et les « Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (**BFUHP**) ». [2]

Donc après la 2^{ème} guerre mondiale les besoins de logements développent la « préfabrication » ; c.-à-d : le XX^{ème} siècle voit le développement considérable du béton et parallèlement, l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre.....ect. [3]

En fin, le béton est un matériau de substitution, un matériau utile, économique, employé principalement pour les fondations les canalisations et les bâtiments industriels : usines, hangars, silos. Au cours de la dernière décennie du XIX^é siècle, son emploi dans les structures d'immeubles reste caché sous des revêtements de pierres ou de briques. [1]



Figure 01 : JOSEPH LAMBOT, barque en ciment armé, 1849.



Chapitre I



I- 1- INTRODUCTION :

Le béton est l'un des matériaux le plus utilisé dans le domaine de la construction. Ces performances ne cessent de s'améliorer, en l'occurrence les résistances mécaniques et la durabilité. Hier c'était le béton aujourd'hui ce sont les bétons, grâce au développement technologique et à la recherche scientifique des nouveaux types de béton ont été créés et employés à savoir le béton compacté au rouleau (**BCR**), les bétons de hautes et de très hautes performances (**BHP** et **BTHP**), les bétons de fibres métalliques et synthétiques, les bétons autoplaçants (**BAP**) la liste est encore très longue. Ces différents types de bétons seront sans aucun doute les matériaux de demain. Pour la durabilité le béton ne brûle pas comme le bois, il ne se corrode pas aussi rapidement que les aciers. L'inconvénient principal du béton est la lenteur avec la quelle il acquiert ses résistances mécaniques. [4]

I - 2 - Définition du béton :

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, air, granulats et, le plus souvent, adjuvants qui doivent constituer un ensemble homogène. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (**eau**) à 3 (**ciment**) t/m^3 ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0,5 μm (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (**gravillons**). [3]

ORDRE DE GRANDEUR DES PROPORTIONS DES CONSTITUANTS D'UN BÉTON COURANT

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (%)	14-22	1-6	7-14	60-78
Poids (%)	5-9		9-18	63-85

Figure 02 : Les constituants du béton.

I - 3 - Classification des bétons :

I - 3 - 1 - Introduction :

La résistance du béton aux diverses conditions environnementales auxquelles il est soumis pendant la durée de service prévue de la structure est conditionnée notamment par le respect de spécifications sur le béton. Ces spécifications doivent être adaptées aux conditions susceptibles d'être rencontrées dans chaque pays européen. Il est donc nécessaire de se référer aux éditions nationales des normes (**EN 206-1**, normes de produits préfabriqués et **EN 13369**) en vigueur dans le pays concerné.

La norme **NF EN 206-1** et son annexe nationale s'appliquent aux bétons de bâtiments et de structure de génie civil, qu'ils soient réalisés par un producteur de béton prêt à l'emploi ou un utilisateur de béton sur chantier. Dans le cas des produits en béton, les normes qui s'appliquent sont les normes de produit. Dans le cas des produits structuraux, les normes s'appuient sur la norme **NF EN 13369**, qui elle-même reprend, pour les aspects concernés, certaines exigences de la norme **NF EN 206-1**. [5]

I - 3 - 2 – Classes d'exposition des bétons :

La prise en compte de l'environnement dans lequel va être situé l'ouvrage et les risques d'agressions et d'attaques auxquels il va être exposé pendant sa durée de service, va permettre d'optimiser les performances du béton et sa durabilité. Pour ce faire, on définit des classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement auxquelles les bétons sont soumis. [5]

Classes d'exposition		Description de l'environnement	Béton concerné
X_O		Aucun risque de corrosion ou d'attaque.	Béton non armé ou béton armé en environnement très sec.
X_C		Corrosion induite par carbonatation.	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées exposé à l'air et à l'humidité
	X_{C1}	Sec ou humide en permanence.	
	X_{C2}	Humide, rarement sec.	
	X_{C3}	Humidité modérée.	
	X_{C4}	Alternance d'humidité et de séchage.	
X_D		Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine.	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact d'une eau ayant une origine autre que marine contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage.
	X_{D1}	Humidité modérée.	
	X_{D2}	Humide, rarement sec.	
	X_{D3}	Alternance d'humidité et de séchage.	
X_S		Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer.	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin.
	X_{S1}	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer.	
	X_{S2}	Immergé en permanence.	
	X_{S3}	Zone de marnage, zone soumise à des projections ou à des embruns.	
X_F		Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage.	Béton soumis à une attaque significative due à des cycles gel/dégel alors qu'il est mouillé.
	X_{F1}	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage.	
	X_{F2}	Saturation modérée en eau avec agent de déverglaçage.	
	X_{F3}	Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage.	
	X_{F4}	Forte saturation en eau avec agent de déverglaçage.	
X_A		Attaques chimiques.	
	X_{A1}	Environnement à faible agressivité chimique.	
	X_{A2}	Environnement d'agressivité chimique modérée.	
	X_{A3}	Environnement à forte agressivité chimique.	

Tableau 01: Classes d'exposition des bétons selon la norme NF EN 206-1.

A - Exigences spécifiées par la norme NF EN 206-1 :

La norme NF EN 206-1 spécifie les exigences applicables : [5]

- ✓ Aux constituants du béton.
- ✓ Aux propriétés du béton frais et durci et à leur vérification.
- ✓ Aux limitations imposées à la composition du béton.
- ✓ A la spécification du béton.
- ✓ A la livraison du béton frais.
- ✓ Aux procédures de contrôle de production.
- ✓ Aux critères de conformité et à l'évaluation de la conformité.

B - Exigences liées aux classes d'exposition :

La résistance du béton aux diverses conditions environnementales auxquelles il est soumis pendant la durée de service prévue de la structure impose le respect d'exigences précises. [5]

Ces exigences propres à chaque classe d'exposition doivent être spécifiées en termes de:

- ✓ Type et classe de constituants permis.
- ✓ Rapport maximal eau/ciment.
- ✓ Dosage minimal en ciment (ou absorption d'eau maximale dans les cas des produits structuraux préfabriqués).
- ✓ Résistance minimale à la compression du béton ; et, dans certains cas :
- ✓ Teneur minimale en air du béton ou résistance à des essais de gel-dégel.

I - 3 – 3 – Les trois types de béton :

La Norme NF EN 206-1 décline trois types de béton prêt à l'emploi ou réalisé sur chantier. [5]

• Béton à Propriétés Spécifiées (BPS) :

Béton pour lequel les propriétés requises et les caractéristiques supplémentaires sont spécifiées par le prescripteur au producteur qui est responsable de fournir un béton satisfaisant à ces exigences.

• Béton à Composition Prescrite (BCP) :

Béton pour lequel la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés au producteur qui est responsable de fournir un béton respectant cette composition.

- **Béton à Composition Prescrite dans une Norme (BCPN) :**

Béton dont la composition est définie dans une norme applicable là où le béton est utilisé.

I - 3 - 4 - Classes de consistance du béton frais :

La norme **NF EN 206-1** définit pour les bétons à teneur en eau courante, **5 classes** de consistance des bétons. [5]

Classe	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
Affaissement en (mm)	10 à 40	50 à 90	100 à 150	160 à 210	~ 220

Tableau 02 : Classes de consistance des bétons

La mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide du « **cône d'ABRAMS** ». [5]

La consistance peut aussi être spécifiée par :

- ✓ Le temps VEBE (en S).
- ✓ L'indice de serrage.
- ✓ Le diamètre d'étalement (en mm).

I - 3 - 5- Classes de résistance à la compression des bétons durcis :

La résistance des bétons durcis à 28 jours peut être mesurée sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques, elle peut donc être définie par deux valeurs : [5]

- **f_{ck-cyl}** : résistance caractéristique (fractile 5 %) en compression du béton déterminée par essais sur éprouvettes cylindriques (**Ø**=150 mm – **H** = 300 mm, **Ø**= 160 mm – **H** = 320 mm, ou **Ø**= 110 mm – **H** = 220 mm).

- **f_{ck-cube}** : résistance caractéristique (fractile 5 %) en compression du béton déterminé par essais sur éprouvettes cubiques (côté : 100 ou 150 mm).

La norme **NF EN 206-1 (article 4-3.1)** propose deux familles de classes de résistance en fonction de la masse volumique du béton.

- La classe de résistance à la compression des bétons de masse volumique normale et des bétons lourds est désignée par la lettre **C** suivie des valeurs **fck-cyl** et **fck-cube**.
- La classe de résistance des bétons légers est désignée par les lettres **LC** suivies des valeurs **fck-cyl** et **fck-cube**.

Elle définit respectivement **seize classes** de résistance pour les bétons de masse volumique **normale** et les bétons **lourds** et **quatorze classes** pour les bétons **légers**. [6]

Béton normal et lourd		
Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale ⁽¹⁾ sur cylindre ⁽²⁾ f [N/mm ²]	Résistance caractéristique minimale ⁽¹⁾ sur cube ⁽²⁾ f [N/mm ²]
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Tableau 03 : classes de résistance à la compression pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds.

Béton léger		
Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale ⁽¹⁾ sur cylindre ⁽²⁾ f [N/mm ²]	Résistance caractéristique minimale ⁽¹⁾ sur cube ⁽²⁾ f [N/mm ²]
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

Tableau 04 : Classes de résistance à la compression pour les bétons légers.

I- 3-6- Classes de masse volumique :

La norme NF EN 206-1, couvre les bétons de masse volumique normale, les bétons lourds et les bétons légers.

Les bétons légers sont classes selon 6 plages de masse volumique : [6]

Béton	Masse volumique (en Kg /m ³)
Béton léger.	De 800 à 2000.
Béton de masse volumique normale.	De 2000 à 2600.
Béton lourd.	Supérieure à 2600.

Tableau 05 : type de béton en fonction de sa masse volumique.

Classe de masse volumique	D1.0	D1.2	D1.4	D1.6	D1.8	D2.0
Plage de masse volumique	800÷1000	1000÷1200	1200÷1400	1400÷1600	1600÷1800	1800÷2000

Tableau 06 : classification de la masse volumique des bétons légers.

I-3-7- Classe de teneurs en chlorures :

La norme NF EN 206-1 définit les teneurs maximales en ions chlorures du béton à respecter en fonction de son type d'utilisation. Elle définit quatre classes de teneur : **Cl 1,0** / **Cl 0,4** / **Cl. 0,2** / **Cl 0,1**. Une cinquième classe a été définie dans l'annexe nationale de la norme NF EN 206-1 : la classe **CL 0,65**. [6]

Classes de chlorures	CL _{1,0}	CL _{0,65}	CL _{0,40}	CL _{0,20}	CL _{0,10}
Teneur maximale	1%	0.65%	0.4%	0.2%	0.1%

Tableau 07: Classes de chlorures.

La teneur maximale en ions chlorure est définie en pourcentage de la masse du ciment, elle concerne la somme des chlorures de tous les constituants. [6]

Utilisation du béton	Classe de chlorure
Béton ne contenant ni armatures en acier ni pièces métalliques noyées	CL _{1,0}
Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées et formulés avec un ciment de type CEM III.	CL _{0,65}
Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées	CL _{0,40}
Béton contenant des armatures de précontrainte en acier	CL _{0,20}

Tableau 08 : Classes de chlorures à respecter en fonction de l'utilisation du béton.

I - 3 - 8 - Dimension maximale des granulats :

La classification du béton est fonction de la dimension maximale des granulats : dimension nominale supérieure du plus gros granulat présent dans le béton (**D max**). [6]

I-3- 9 -Valeurs limites pour le classement des attaques chimique :

La norme NF EN 206-1 définit les valeurs limites des paramètres correspondants aux attaques chimiques. Ces seuils correspondent à des caractéristiques chimiques des eaux de surfaces et souterraines ou des sols. [6]

Caractéristiques chimique	Classe d'exposition		
	XA ₁	XA ₂	XA ₃
SO ₄ ²⁻ en mg/ l	200 à 600	600 à 3000	3000 à 6000
PH	5.5 à 6.5	4.5 à 5.5	4 à 4.5
CO ₂ en mg/ l	15 à 40	40 à 100	De 100 jusqu'à saturation.
NH ₄ ⁺ en mg/ l	15 à 30	30 à 60	60 à 100
Mg ²⁺ en mg/ l	300 à 1000	1000 à 3000	De 3000 jusqu'à saturation.
SO ₄ ²⁻	2000 à 3000	3000 à 12000	12000 à 24000
Acidité en ml/ kg	Supérieur à 200 Baumann Gully.	N'est pas rencontré dans la pratique.	

Tableau 09 : Les valeurs limites pour les attaques chimiques des eaux de surface et souterraines.

Pour ces classes d'exposition, l'annexe nationale de la norme NF EN 206-1 renvoie au fascicule de documentation FD P 18-011 qui fournit des recommandations complémentaires, notamment pour le choix de ciments. [6]

I-3-10-Valeurs limites spécifiées pour les bétons :

Classes d'exposition		Rapport E_{eff} / liant éq maximal	Classe de résistance minimale	Teneur minimale en liant éq (kg / m ³)	Teneur minimale en air (%)		
Aucun risque de corrosion ou d'attaque		X₀	-	-	150	-	
Carbonatation			XC₁	0.65	C 20/25	260	-
			XC₂	0.65	C 20/25	260	-
			XC₃	0.60	C 25/30	280	-
			XC₄	0.60	C 25/30	280	-
Corrosion induite par les chlorures	Eau de mer	XS₁	0.55	C 30/37	330	-	
		XS₂	0.55	C 30/37	330	-	
		XS₃	0.50	C 35/45	350	-	
	Chlorures autres que l'eau de mer	XD₁	0.60	C 25/30	280	-	
		XD₂	0.55	C 30/37	330	-	
		XD₃	0.50	C 35/45	350	-	
Attaque gel/dégel		XF₁	0.60	C 25/30	280	-	
		XF₂	0.55	C 25/30	300	4	
		XF₃	0.55	C 30/37	315	4	
		XF₄	0.45	C 30/37	340	4	
Environnement contenant des substances chimiques agressives		XA₁	0.55	C 30/37	330	-	
		XA₂	0.50	C 30/37	350	-	
		XA₃	0.45	C 35/45	385	-	

Tableau 10: Valeurs limites spécifiées à la composition et aux propriétés du béton.

Classes d'exposition		Rapport E_{eff} / liant éq maximal	Classe de résistance minimale	Teneur minimale en liant éq (kg / m^3)	Teneur minimale en air (%)
Aucun risque de corrosion ou d'attaque	X₀	-	C 20/25	-	-
		0.60	C 25/30	7	-
		0.55	C 30/37	6	-
		0.50	C 35/45	6	-
Carbonatation	XC₁ XC₂ XC₃ XC₄	0.50	C 35/45	5	-
		0.45	C 35/45	6	-
		0.45	C 40/50	6	-
		0.40	C 40/50	4	-
Corrosion induite par les chlorures	Eau de mer XS₁ XS₂ XS₃	0.45	C 35/45	6	-
		0.45	C 40/50	6	-
		0.40	C 40/50	4	-
	Chlorures autres que l'eau de mer XD₁ XD₂ XD₃	0.50	C 35/45	6	-
		0.50	C 35/45	5	-
		0.45	C 40/50	5	-
Attaque gel/dégel	XF₁ XF₂ XF₃ XF₄	0.50	C 35/45	6	-
		0.50	C 35/45	5	4
		0.45	C 35/45	5	4
		0.40	C 35/45	4	4
Environnement contenant des substances chimiques agressives	XA₁ XA₂ XA₃	0.5	C 35/45	6	-
		0.45	C 35/45	5	-
		0.40	C 40/50	4	-

Tableau 11 : Valeurs limites spécifiées pour la composition et les propriétés des produits en béton fabriqués en usine.

I- 3 - 11 - Exigences sur les constituants :

➤ Choix du ciment :

Le choix du ciment doit prendre en considération : [6]

- les contraintes d'exécution de l'ouvrage,
- l'utilisation finale du béton,
- les conditions de cure,
- les dimensions de la structure (développement de chaleur lors de l'hydratation du ciment),
- les agressions environnementales auxquelles la structure est exposée,
- la réactivité potentielle des granulats aux alcalins des constituants.

➤ Choix des granulats :

Le type, la dimension et les catégories de granulats doivent être sélectionnées en tenant compte:

- Des contraintes d'exécution de l'ouvrage,
- De l'utilisation finale du béton,
- Des conditions environnementales auxquelles sera soumis le béton,
- De toutes les exigences liées aux traitements de surface appliqués au béton frais ou durci,

Le maximum de la dimension nominale supérieure des granulats (**D_{max}**) est sélectionné en prenant en compte la valeur d'enrobage, la géométrie des sections et les dispositions constructives des armatures.

I – 4 - Les constituants du béton :

I – 4 -1- Le ciment :

I – 4 -1 -1- INTRODUCTION :

On sait que les liants hydrauliques sont des poudres fines constituées de silicates et d'aluminates de chaux qui s'hydratent en présence d'eau pour donner naissance à un matériau solide, véritable roche artificielle. Les liants hydrauliques peuvent agglomérer une forte proportion de matière inerte d'où leur emploi bien connu pour la fabrication des mortiers et des bétons. 1) Les ciments usuels sont aussi appelés « **liants hydrauliques** » car ils ont la propriété de s'hydrater en présence d'eau et parce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. [7]

Il existe différents types de ciments sur le marché, qui se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. De ce fait, le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs) et de la nature des autres composants. Pour un béton courant, les ciments les plus utilisés sont les CEM II de classe 32,5 – 32,5 R – 42,5 – 42,5 R. Donc le ciment est le constituant de base du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. [7]

I-4-1-2- Définition:

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. [8]



Figure 03 : les principaux composants du ciment.

I-4-1-3 - Différents types des ciments courants :

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme .le tableau « A » pour la liste des différents types de ciment courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu'ils comportent. [9]

Désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivant : laitier-pouzzolanes-calcaires-schistes-fumées de silice	Teneur en constituants secondaires
CEM I	Ciment portland	95 à 100%		0 à 5%
CEM II/A	Ciment portland composé	80 à 94%	-De 6 à 20% de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10%.	0 à 5%
CEM II/B		65 à 79%	-de 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus.	0 à 5%
CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35 à 64%	36 à 65% de laitier de haut- fourneau.	0 à 5%
CEM III/B		20 à 34%	66 à 80% de laitier de haut- fourneau.	0 à 5%
CEM III/C		5 à 19%	81 à 95% de laitier de haut-fourneau.	0 à 5%
CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90%	10 à 35% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces derniers étant limitées à 10%	0 à 5%
CEM IV/B		45 à 64%	36 à 55% comme ci-dessus.	0 à 5%
CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64%	18 à 30% de laitier de haut-fourneau et 18 à 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5%
CEM V/B		20 à 39%	31 à 50% de chacun des 2 constituants comme ci-dessus.	0 à 5%

Tableau 12 : les différents types des ciments courants.

I-4-1-4-Les ciments a caractéristiques complémentaire normalisées :

Pour certaines classes d'expositions ou certains ouvrages particuliers, des exigences relatives aux caractéristiques des ciments peuvent être requises; Les ciments possédant ces caractéristiques font l'objet de normes spécifiques : [8]

- **Ciments pour travaux à la mer (PM) NF P 15-317:**

Les ciments n'ont pas tous la même résistance face aux attaques chimiques liées à l'environnement marin ; l'emploi de ciments présentant de bonnes caractéristiques de résistance à ces agressions est donc nécessaire.

- **Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES) XP P 15-319 :**

Les eaux séléniteuses constituent un milieu particulièrement agressif, qui nécessite l'emploi de ciments spécifiques.

- **Ciments à faible chaleur d'hydratation initiale et à teneur en sulfures limitée (CP) NF P 15-318 :**

Ces ciments trouvent leurs principales applications dans les ouvrages en grande masse et certains ouvrages en béton précontraint.

I-4-1-5-Les caractéristiques des ciments :

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur pâte, soit sur « mortier normal » (mélange normalisé de ciment, sable et eau défini par la norme **NF EN 196-1**).

A- Caractéristiques physiques:

A-1- Comportement physico-chimique de la pâte :

Comme cela a été étudié au premier paragraphe, le ciment est constitué essentiellement de :

- **C3S** : Silicate tricalcique.
- **C2S** : Silicate bicalcique.
- **C3A** : Aluminium tricalcique.
- **C4AF** : Aluminoferrite tétracalcique.

Une fois la poudre de ciment mélangée à l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système constituant des hydrates stables avec formation des cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise.

Chacune des phases précédentes a un rôle dans l'acquisition des propriétés du ciment hydraté, on aura donc les phases suivantes : [9]

1- Phase initiale : une dissolution superficielle des silicates tricalciques formant ainsi un mono silicate de calcium hydraté et l'étrangéité.

2-Phase dite dormante : Au cours de laquelle la pâte reste fluide, avec la présence de la réaction précédente lentement pendant 2 à 3 heures.

3-Phase de prise : Au cours de laquelle la pâte acquiert une certaine consistance due à l'interpénétration des cristaux.

4-Phase de durcissement : elle se développe environ huit heures après le début d'hydratation et se poursuit pendant des années à une vitesse de plus en plus lente et dont le résultat est l'augmentation de la résistance mécanique et de la compacité.

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

A-2- Indice d'hydraulicité :

L'indice d'hydraulicité ou indice de Vicat est le rapport de la fraction acide du ciment à la fraction basique :

$$I = \frac{\text{Fraction acide}}{\text{Fraction basique}} = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

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 $I \# 1$, le ciment est dit acide (conventionnellement) ; ce sont ceux qui font prise en mettant en liberté non de la chaux mais de l'alumine (ciment alumineux).

Actuellement on préconise les règles suivantes :

$$1,40 < \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} < 1,45 \qquad 0,45 < \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} < 0,50$$

A-3- 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, le début de prise est d'autant plus rapide que la finesse est plus poussée.
- ✓ La température ambiante, la prise étant stoppée à **0 °C**, alors qu'elle est accélérée dès que T° dépasse **30 °C**.
- ✓ La présence de matières organiques dans l'eau.
- ✓ L'excès d'eau de gâchage qui agit alors comme retardateur de prise.

La norme spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

- 1 h 30 pour les ciments de classes **32,5**.
- 1 h pour les ciments des classes **42,5** et **52,5**.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h 30 pour la majorité des ciments pour une température ambiante de 20°C. [9]

A-4- Durcissement :

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

Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classes élevées et de préférence de classe « **R** » c'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire « rapide ». Il est également possible d'utiliser du ciment alumineux fondu CA qui après quelques jours a atteint le quasi totalité de sa résistance. [9]

A-5- La fausse prise :

Dans la composition des ciments rentre en général un peu de gypse (sulfate de calcium hydrate à deux molécules d'eau **CaSO₄ 2H₂O**). Si les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre (**Ca SO₄ 0,5 H₂O**) 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. Les

ciments les plus sensibles sont ceux à très fine mouture ou à assez fort pourcentage de gypse. [9]

A-6- Finesse de mouture :

La finesse de mouture, est appelée aussi « **finesse Blaine** », exprimée en « m^2/kg », représente la surface spécifique ou surface développe d'une masse de **1kg** de ciment. Elle est, d'une façon générale, comprise entre **300** et **350** (notons que la finesse s'exprime également en cm^2/g . Il ressort qu'une finesse de **300 m^2/kg** correspond à **3000 cm^2/g**).certaines ciments tel que les ciments prompts naturelles « **CNP** » ont une Blaine supérieure à **450 m^2/kg** .

Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'événement du ciment sont accrus. [9]

A-7- Retrait :

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de **16cm** de longueur et d'une section droite de **4 × 4cm**, conservées dans l'air à une température de **20 °C** et une hygrométrie de **50 %**. [10]

La norme impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

- **800 μm /m** pour les ciments Portland **CPA-CEM I** et **CPJ-CEM II** de la classe **32,5**.
- **1000 μm /m** pour des types de ciment identiques mais des classes **32,5 R-42,5** et **42,5 R**.

A-8- 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 **CaO** ou de magnésie libre **MgO**.

Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries. La stabilité se détermine par l'essai Le Chatelier, qui consiste à mesurer l'écartement de deux aiguilles solidaires d'un moule rempli de la pâte de ciment à tester, et conservé dans l'eau bouillante. La valeur de l'expansion mesurée doit être inférieure à 10mm pour tous les types de ciments courants.

Le pourcentage maximal de magnésie est limité ; sa valeur, spécifiée par la norme, doit être au plus égale à 5 % pour les **CPA-CEM I** ainsi que pour le clinker. [9]

A-9- Gonflement :

Bien que non normalisé, il est utile de rappeler qu'alors qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est émergé dans l'eau, ses variations dimensionnelles étant environ le 1/10e de celles constatées dans l'air. [9]

B- Caractéristiques chimiques :

D'une façon générale, les ciments doivent satisfaire au respect d'un certain nombre d'exigences, résumées dans le tableau ci après quant à leur composition chimique.

Propriétés	Types de ciments	Classe de résistances	Valeur maximale en % de la masse
Perte au feu	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Touts classes	≤ 5
Oxydes de magnésium	CPA-CEM I	Touts classes	≤ 5
Résidu insoluble	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Touts classes	≤ 5
Sulfates SO_3 limites supérieure	CPA-CEM I et CPJ-CEM II (*)	32.5 32.5 R 42.5	≤ 3.5
	CPZ-CEM IV Et CLC CEM V CHF-CEM III	42.5 52.5 52.5 R Toutes classes	≤ 4 ≤ 4
Chlorures	Tous types de ciments (**)	52.5 R Toutes les autres classes	≤ 0.05 ≤ 0.10

Tableau 13 : Les caractéristiques chimiques du ciment.

(*) Valables pour les **CPJ-CEM II/A** et **B** à l'exception des ciments ne contenant que des schistes calcinés comme constituants autre que le clinker, pour les quels la limite est de 4.5 % pour toutes les classes de résistances.

(**) Les **CHF-CEM III/C** peuvent contenir plus de 0.10% de chlorures mais dans ce cas la teneur réelle doit être déclarée.

C-Caractéristiques mécaniques des ciments courants :

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, **32,5 - 42,5 - 52,5**, définies par la valeur de la résistance normale du ciment à 28 jours.

Pour chaque classe de résistance, deux classes de résistance au jeune âge sont définies, une classe avec résistance au jeune âge ordinaire (indiquée par la lettre **N**) et une classe avec résistance au jeune âge élevée (indiquée par la lettre **R**). [11]

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme **NF EN 196-1** et exprimée en **N/mm²** (**1 N/mm² = 1 MPa = 10 daN/cm² = 10 bars**).

Pour les ciments de classes **32,5** et **42,5**, une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours est fixée.

Les valeurs indiquées dans le tableau n°6 sont les résistances caractéristiques fixées pour les ciments titulaires du marquage **CE** complétées par les spécifications supplémentaires de la marque **NF**.

Classe de Résistance	Résistance a la compression (MPa)			
	Résistance a court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
23.5 N	--	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5 R	≥ 10.0	--		
42.5 N	≥ 10.0	--	≥ 42.5	≤ 62.5
52.5 N	≥ 20.0	--	≥ 52.5	--
52.5 R	≥ 30.0	--		

Tableau 14 : classification des ciments d'après leur résistance.

Les classes « **R** », rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et trouvent leur intérêt particulièrement dans certaines circonstances telles que bétonnages par temps froids, décoffrage rapide, préfabrication. [9]

I-4-2 -L'eau :**I-4-2-1- INTRODUCTION :**

L'eau est l'un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum sur un objectif contradictoire : une meilleure résistance obtenue en réduisant la quantité d'eau et une amélioration de l'ouvrabilité en augmentant la teneur en eau. C'est lors de la recherche de cet optimum que les adjuvants peuvent jouer un rôle. [12]

I-4-2-2- Définition :

L'eau de gâchage est la quantité d'eau additionnée au mélange de ciment, d'addition et de granulat lors du malaxage du béton. Si des adjuvants ou des additions sont employés sous forme de solutions ou de suspensions, il faut tenir compte de leur apport d'eau à partir d'une quantité de 3 l/m². La teneur en eau totale se compose de l'eau de gâchage, de l'eau apportée par les adjuvants et les additions ainsi que de l'eau adsorbée à la surface des granulats et l'eau absorbée par les granulats. On entend par eau efficace la somme de l'eau de gâchage, l'eau apportée par les adjuvants et les additions ainsi que l'eau adsorbée à la surface des granulats. [11]



Figure 04 : l'eau de gâchage.

I-4-2-3- Le rôle de l'eau de gâchage :

L'eau dans le béton sert à **hydrater** le ciment. Toutes les eaux ne sont pas utilisables car elles peuvent contenir des éléments qui modifient le comportement et les propriétés du béton (temps de prise, résistance, durabilité, aspect du béton...).

L'eau couramment utilisée est celle du réseau d'eau potable. Toutefois, elle peut provenir du pompage d'eau des nappes phréatiques ou de cours d'eau. Dans ce dernier cas, le producteur de béton doit produire une analyse de l'eau qui doit conclure à la conformité vis-à-vis de la norme **NF EN 1008** avant de pouvoir être employée. En particulier, l'eau trop pure, caractérisée par sa dureté, peut entraîner une dissolution (ou lixiviation) du liant. [10]

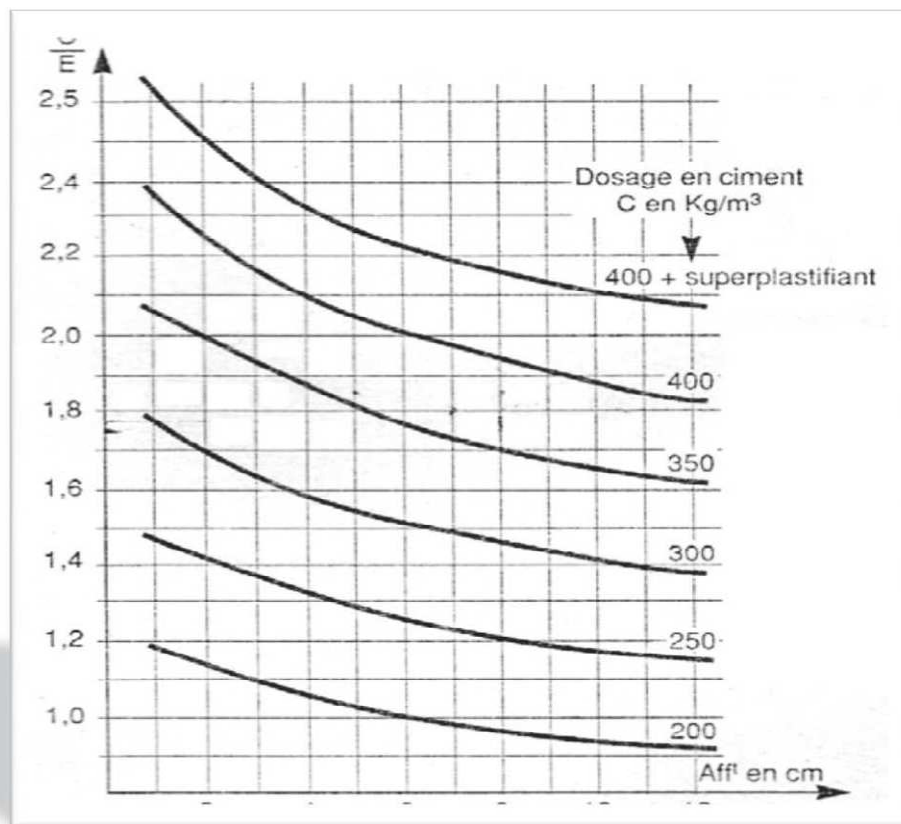


Figure 05 : Influence du dosage en eau à un dosage de ciment fixé.

I-4-3-Les granulats :

I-4-3-1-INTRODUCTION:

Les granulats sont un constituant essentiel des bétons qui conditionne à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Leur élaboration relève des industries extractives.

Les granulats sont définis par la norme **P18-540**, comme un ensemble de grains minéraux, destinés à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondations, de bases de roulement des chaussées et des assises et des ballasts de voies ferrées.

On peut distinguer les granulats naturels, issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (c'est-à-dire concassage, broyage, criblage, lavage, sélection) et 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 de bâtiments divers en béton, souvent appelés granulats recyclés.

Les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et, dans certains cas, chimiques influencent les performances du béton. Par ailleurs, les granulats présentent un certain nombre de propriétés intrinsèques qui ne sont pas reliées à la nature du massif rocheux d'origine, telles la forme et la dimension des grains, la texture de surface et l'absorption, or toutes ces propriétés peuvent avoir une influence considérable sur la qualité du béton, autant à l'état frais qu'à l'état durci. il faut donc, déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, puisque ces derniers influent fortement sur les caractéristiques du béton ; à savoir les propriétés dimensionnelles, physico-chimiques et mécaniques. [12]

I-4-3-2- Définitions :

Les granulats sont des grains minéraux appelés fillers, sablons, sables, graves ou gravillons suivant leurs dimensions. Ils sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origines alluvionnaires terrestres ou marines, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par recyclage de produits tels que les matériaux de démolition.

Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origines alluvionnaires (granulats roulés ou semi concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés). [9]

Le granulat est désigné par sa classe granulaire **d/D** ou **O/D** avec :

- **d** : dimension inférieure du granulat.
- **D** : dimension supérieure du granulat.

Ces matériaux sont quelques fois encore appelés « **agregats** ». Vieil usage tout a fait impropres, en effet le dictionnaire donne la définition suivante :

❖ LES AGREGATS :

Réunion des substances diverses formant un tout non homogène. Le béton, par exemple est un agrégat de gravier sable et ciment, ce dernier jouant le rôle de matière d'agrégation.

Les spécifications aux quelles doivent satisfaire les granulats sont précises dans la norme **XP P 18 -540** d'octobre 1997 qui remplace les normes **P18-101** de décembre 1990 et **P18-541** de mai 1994. [9]



Figure 06: Les différents granulats.

I-4-3-3- Les classes des granulats :

Les granulats sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacune d'elles : La catégorie **A** correspond aux granulats destinés à la confection du béton de qualité tels que ceux destinés à la construction d'ouvrages d'art ou de bâtiments pour lesquels la résistance caractéristique **R_c** est supérieure ou égale à **35 MPa** ; éventuellement certaines caractéristiques des catégories **B** ou **C** étant tolérées.

Les granulats de catégorie **B** sont destinés à de bons bétons ainsi qu'à ceux pouvant être situés dans un environnement agressif, à condition que leur coefficient d'absorption respectent les spécifications imposées aux granulats de catégorie **A**.

Les granulats de catégorie **C** et **D** conviennent pour les bétons courants à condition, dans le cas d'utilisation de granulat **D**, que seuls deux de leurs caractéristiques soient présentés et que les autres correspondent à celle de catégories supérieures, faute de quoi ils ne doivent pas être utilisés dans la courante confection de béton courant. [8]

II-4-3-4- Caractéristiques des granulats :

A- Caractéristiques géométriques :

A-1- Classe granulaire :

La granularité est la distribution par dimension des grains d'un granulat.

L'analyse granulométrique est la méthode d'essai pour déterminer la granularité. Cette opération consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à mailles carré (0,16 - 0,31 - 0,63 - 2,5 - 5 - 10 - 20 - 40 et 80mm) et peser le refus obtenu sur chaque tamis. On trace ensuite la courbe.[13]



Figure 07: les différents tamis pour l'analyse granulométrique.

A-2- Courbe granulométrique :

On trace les courbes granulométriques sur un graphe de référence, présentant en ordonnées les pourcentages des passants ou refus, en abscisse l'ouverture des mailles. [8]

On exclut les gros grains $> 80\text{mm}$ et les fines $< 80\text{ }\mu$.

La forme des courbes granulométriques apporte les informations suivantes :

- Limite des différentes fractions d et D .
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins.
- la continuité ou la discontinuité de la granularité.

La norme NF-P18-101, on a la classe granulaire suivante : [13]

- **Fillers** : $0/D \rightarrow D < 2\text{ mm}$ avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063mm.
- **Sables** $0/D \rightarrow d = 0$ et $D \leq 4\text{ mm}$.
- **Graves** $0/D \rightarrow D \geq 6,3\text{ mm}$.
- **Gravillons** $d/D \rightarrow d \geq 2\text{ mm}$ et $D \leq 63\text{ mm}$.
- **Ballasts** $d/D \rightarrow d = 31,5\text{ mm}$ et $D = 50$ ou 63 mm .

A-3- Module de finesse :

Le module de finesse d'un granulat est égal à la somme des refus exprimés en pourcent sur les différents tamis de la série suivante : [14]

- **Sable** : 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5mm.
- **Gravier** : 10-20-40-80mm

Le module M_f est une caractéristique intéressante en ce qui concerne un sable.

Pour celui-ci le M_f doit varier entre **2.2** et **2.8** au dessous duquel le sable renferme plus de fines, ce qui nécessite un excès d'eau, et en dessus le sable contient moins de fines particules, donc le béton perd son ouvrabilité. [8]

A-4- Forme et coefficient d'aplatissement :

La forme des granulats a une incidence directe sur la maniabilité du béton. La forme souhaitée est la sphère, alors que la forme plate est mauvaise, elle demande une quantité d'eau élevée et donc des défauts d'aspect.

Les grains concassés sont moins lisses que les sables roulés. La compacité est moins bonne, le béton est moins ouvrable ; il est caractérisé par une surface spécifique élevée, et exige plus de ciment, donc plus d'eau. Aussi le grain concassé présente l'avantage d'offrir plus de contact que le grain roulé. [14]



Figure 08: Granulats roulés.

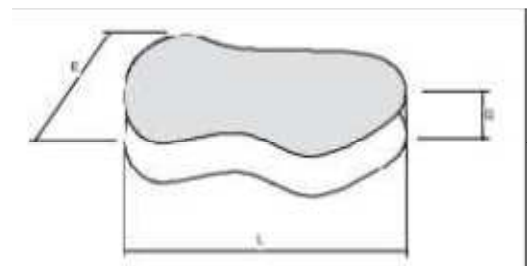


Figure 09: Granulats concassés.

La forme des granulats est définie par l'épaisseur **E** et la grosseur **G** (l'ouverture des mailles) et la longueur **L**.



Figure 10 : Granulats aplatis.



Le coefficient d'aplatissement **A** caractérise la forme des granulats, et il est donné par le rapport **G/E**. celui-ci doit être supérieure à **1.58**.



Figure 11: Grilles de mesure le coefficient d'aplatissement.

B- Caractéristiques physico -chimiques :

On les classe en deux groupes :

- a-** Celles qui concernent le granulat lui-même c'est-à-dire la masse volumique du grain, la porosité.
- b-** Celles qui concernent les substances organiques étrangères et nocives tel que les sulfates, les chlorures...ect. [15]

B -1- Masse spécifique ou masse volumique absolu des grains :

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains.

La densité absolue est le rapport de la masse absolue d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse du même volume d'eau distillée à la même température. [16]

- ✓ **Pour les graviers :** on pèse un échantillon de granulat sec et à l'aide de la balance hydrostatique on mesure le volume.
- ✓ **Pour le sable :** le volume est déterminé en pycnomètre, sous vide pour éliminer les bulles d'air entre les grains. Elles s'expriment en g/cm^3 . [16]

B -2- La masse volumique apparente :

C'est le rapport de la masse du granulat en volume total (les vides inclus) en g/cm^3 . On la détermine en calculant le quotient:

La densité apparente à l'état compacté ou non compacté sera obtenue en établissant le rapport de la masse apparente d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse d'une même quantité d'eau distillée à même température. [14]

B -3- La compacité et la porosité :

La porosité d'un granulat est exprimée en pourcentages, elle représente le rapport entre le volume des vides contenus dans les grains sur volume absolu des grains. [14]

B -4- Coefficient d'absorption :

Est le rapport de l'augmentation de la masse des granulats au bout de 24h par imbibition partielle la masse sèche, ce coefficient mesure le volume des pores accessible à l'eau. Plus la valeur est grande plus la durabilité du béton est limitée dans un milieu agressif. De même la pénétration de l'eau dans les pores des grains fragilise la structure. [9]

B -5- Foisonnement des sables :

Le volume occupé par le sable sec augmente au même temps que son humidité on appelle le coefficient de foisonnement f en pourcentage l'augmentation de volume correspondant à une humidité donnée, par rapport au volume occupé par la même quantité de sable à l'état sec : [9]

$$F = \frac{V_{humide} - V_{sec}}{V_{sec}} \quad \text{en \%}$$

B -6- La propreté :

Le granulat doit être propre. La loi interdit tout déchet nuisible à la résistance du béton tel que : les sciures de bois, la ferraille ... le pourcentage est inférieur à 1%. Le granulat ne doit pas aussi contenir des huiles et la matière organiques...la présence de l'argile diminue l'adhérence entre mortier et gravier, Donc diminue la résistance. Un excès de fines entraîne un dosage important en eau, mais un manque des fines conduit à des bétons peu malléables. Pour les sables, la propreté est mesurée par la détermination de l'équivalent de sable (E.S). [9]

$$E.S = \frac{h_1}{h_2} \times 100$$

On rencontre l'E.S à vue et l'E.S à piston (E.S.V et E.S.P) :

E.S.V	E.S.P	Types de sables	Influences
< 65	< 60	Argileux	Risque retrait ou gonflement
> 65	< 75	Très argileux	Retrait assez fort
75 - 85	70 - 80	Bon sable	Béton haute qualité
> 85	> 80	Manque de fines argiles	Manque de plasticité

Tableau 15: Classification du sable en fonction de l'E.S.

C - Caractéristiques mécaniques :

La nature du matériau est caractérisée par la roche ou le produit constituant le grain : basalte calcaire, grès, barytine... le grain peut être un produit naturel obtenu par criblage (grain plus ou moins arrondi) ou un produit de concassage (grain plus ou moins anguleux). La quantité des fines doit être déterminée par des essais d'écrasement ou d'usure, on peut citer : [8]

C-1- Los angles (LA) :

C'est un essai courant, il consiste à introduire dans un cylindre horizontal une quantité des granulats à étudier en présence de boules d'acier et de mesurer la quantité de fines obtenue après un temps de rotation. La norme prévoit pour les gros granulats (pas pour le sable) la classification suivante : [8]

Types	VSS en %
A	30
B	40
C	40
D	50

Tableau 16: Valeurs Vss pour les catégories des gros granulats.

Pour un béton de $f_{c28} = 30 \text{ MPa}$, le LA doit être inférieur à 40 %.

A un coefficient Los Angeles faible correspond un excellent matériau.

Par définition, le coefficient de Los Angeles est le rapport :

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

m : la masse de la prise d'essai

M : la masse de refus tamisé à 1,6mm

C-2- MICRO DEVAL :

Cet essai permet de mesurer la résistance à l'usure par frottement entre granulats et une charge abrasive.

Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieure à 1,6mm produite dans un broyeur, dans des conditions bien définies, à sec ou en présence d'eau. Plus le coefficient micro-Derval est élevé, meilleur est matériaux. [12]

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

C-3-Essais DEVAL :

Essai Deval est un essai d'attrition. Un échantillon de 5 kg, compose de 44 pierres du même calibre, cubiques et à arêtes vives, est placé dans un cylindre tournant autour d'une diagonale du plan diamétral. Après un nombre de tours à une vitesse précisée par le mode opératoire, on tamise sur le tamis de 2 mm. **U** étant le passant à 2 mm. [12]

Le coefficient Deval est donné par la formule suivante :

$$D = \frac{400}{U}$$

C-4- Sensibilité au GEL – (G) :

Le granulat doit être insensible au gel dégel. Le granulat est considéré antigélif lorsqu'il respecte l'une des trois valeurs spécifiées à savoir :

- ✓ **Absorption : AB < 1%.**
- ✓ **LA < 40.**

✓ $G < 3$.

Le coefficient G consiste à mesurer, sur une partie d'un granulat scindé en deux, le LA , et sur l'autre partie une série de cycle gel dégel (G/D) suivi de l'essai de LA .

Les résultats sont : le grain soumis à l'essai de LA donne le coefficient de LA , tandis que l'autre grain donne log, et le coefficient est calculé par la formule suivante : [9]

$$G = \frac{LA_g - LA}{LA} \times 100$$

II-4- 4- Le sable :

Le sable utilisé dans le béton. Doit satisfaire aux exigences suivantes :

- Avoir une granularité optimale (composition granulométrique équilibrée).
- Etre propre, et surveiller la teneur des particules fines. [9]

II – 4 – 4 - 1- Propriétés recherchées dans un sable :

A- La granulométrie :

Est une propriété importante pour la qualité d'un béton, elle permet d'économiser le liant sans réduire les propriétés du matériau,

Elle assure un volume minimal des vides entre les grains. La granulométrie des sable est fixée à l'intérieur de fuseau du quel doit se trouver la courbe représentatif de leur analyse granulométrique. Le sable est apprécié suivant le module de finesse. [9]

Remarque : un bon sable doit avoir un module de finesse = 2,2 à 2,8.

B - La propreté du sable :

Le sable doit être débarrassé de toutes les substances susceptibles d'altérer l'adhérence entre la matrice et le grain. [9]

C - La compacité :

La compacité est le rapport du volume de matière pleine au volume total. Ainsi le problème est d'assurer un bon mélange, ossature avec moins de vide, donc un béton plein, avec une bonne homogénéité. [9]

I-4- 5 - Le choix et le dosage des granulats :

Une fois déterminée la dimension maximale des granulats compatible avec les exigences de l'ouvrage (espacement des armatures entre les quelles doit pouvoir passer le béton, épaisseur d'enrobage de celle-ci, forme de la pièce à mouler) on doit résoudre les deux problèmes suivant :

A- Le choix de la classe granulaire :

La plus part du temps, un béton est composé à partir de deux classes : un sable de type 0/5 et un gravillon 5/12.5 ; 5/15 ou 5/20.

On peut également utiliser deux classes de gravillons dans les compositions plus élaborées. [9]

B- Le dosage des granulats :

Deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les qualités du béton : [9]

- La proportion relative gravillon/sable est traduite par le facteur G/S que les études récentes ont fait apparaître comme moins important qu'on ne le pensait auparavant. Lorsque ce facteur reste inférieur à 2.

La granulométrie du sable peut par exemple être caractérisée par son module de finesse, est généralement compris entre 2,2 et 2,8.

II-4-6- Les adjuvants:**II - 4 - 6- 1 - INTRODUCTION:**

Les adjuvants font l'objet de la norme **NF EN 934**, Partie 2 "Adjuvants pour béton, mortier et coulis. Définition - exigences - conformité - marquage et étiquetage." L'emploi d'un adjuvant ne doit pas altérer les caractéristiques mécaniques, physiques ou chimiques du béton, du mortier ou du coulis, ni les armatures. Chaque adjuvant est défini par une fonction principale, caractérisée par la ou les modifications majeures qu'il apporte aux propriétés des bétons, des mortiers ou des coulis, à l'état frais ou durci. [5]

II- 4 -6 - 2 – Définition :

Un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5 % de la masse de ciment) aux bétons, mortiers ou coulis lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque des modifications des propriétés du mélange, à l'état frais ou durci. [5]

Ils fournissent au formulateur de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur fabrication par temps froid ou chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés des bétons durcis, voire même lui conférer des propriétés nouvelles. [12]



Figure 12 : Adjuvant liquide de gauche à droite : agent anti –lessivage de retrait, réducteur d'eau, agent moussant, inhibiteur de corrosion et agent entraîneur d'air.

II - 4 – 6 -3 - Classification :

La norme **NF EN 934-2** classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis suivant leur fonction principale. [5]

On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants :

• Ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton :

- ✓ Plastifiants.
- ✓ Plastifiants-réducteurs d'eau.
- ✓ Superplastifiants.

• Ceux qui modifient la prise et le durcissement :

- ✓ Accélérateurs de prise.
- ✓ Accélérateurs de durcissement.

✓ Retardateurs de prise.

• **Ceux qui modifient certaines propriétés particulières :**

✓ Entraîneurs d'air.

✓ Hydrofuges de masse.

Rétenteurs d'eau.

I – 4 – 7 -Les additions :

Les additions pour le béton sont définies dans la norme **NF EN 206-1**. Une addition est un matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés, ou pour lui conférer des propriétés particulières. [6]

Il existe deux types d'additions :

- les additions quasiment inertes (**type I**)
- les pouzzolanes ou les additions à caractère hydraulique latent (**type II**)

Les additions peuvent être utilisées :

- soit en substitution partielle au ciment de **type CEM I** pour constituer un liant équivalent conformément aux spécifications de la norme **NF EN 206-1**.
- soit incorporées au béton sans substitution du ciment. [6]

Il existe aujourd'hui cinq additions normalisées : le laitier vitrifié moulu, les cendres volantes, la fumée de silice, les additions calcaires et les additions siliceuses.

I- 4- 7- 1 -Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau :

Le laitier vitrifié moulu est une addition de type II. Il provient du laitier (granulé ou bouleté), coproduit de la fabrication de la fonte, obtenu par tempe du laitier de haut fourneau en fusion. Les laitiers de fonte non trempés (cristallisés et donc non vitrifiés) sont exclus de cette norme. Les laitiers d'aciéries et tous les laitiers de métaux non ferreux qui peuvent contenir des éléments nuisibles aux bétons (sels métalliques) sont aussi exclus de cette norme. Les laitiers se classent en deux catégories A et B ; mais seuls ceux de la classe B sont substituables au sens et sous les conditions de la norme **XP P 18 305** (finesse $>3250 \text{ cm}^2/\text{g}$). [17]

I- 4 – 7 – 2 - Les cendres volantes

Les cendres volantes de silice est une addition de type II. C'est une poudre fine constituée principalement de particules vitreuses de forme sphérique, dérivées de la combustion du charbon pulvérisé, ayant des propriétés pouzzolaniques et composées essentiellement de SiO_2 et Al_2O_3 , la proportion de SiO_2 réactive constituant au moins 25%) en masse.[17]

I- 4 – 7 – 3 -La fumée de silice :

La fumée de silice est une addition de type II. C'est une poudre amorphe finement divisée résultant de la production d'alliages de silicium ou contenant du silicium. Suivant la finesse et la composition chimique (taux de silice) ; les fumées de silice sont divisées en deux classes, classe A (riches en silice et les plus fines ; surface spécifique de 200000 à 350000 cm²/g) et la classe B (moins riches en silice et moins fines); leur proportion est limitée à 10% et leur emploi est réservé aux bétons contenant des super plastifiants. [17]

I- 4 – 7 – 4 -Les additions siliceuses :

Les additions siliceuses sont des produits finement divisés, constitués, à plus de 96.0% par de la silice exprimé en SiO₂ mesurée sur produits secs et obtenus par broyage et/ou sélection de constituants de roches quartzeuse ou de cristobalites synthétiques. Les additions siliceuses de roches quartzeuse sont de type A (M_{va} = 2600 à 2700 kg/m³) et les cristobalites sont de type B (M_{va} = 2250 à 2450 kg/m³). Leurs surfaces spécifiques Blaine doivent être supérieures à 1500 cm²/g. [17]

I- 4 – 7 –5 -Les additions calcaires :

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, provenant de gisements de roches calcaires pouvant être dolomitiques, massives ou meubles. [17]



Chapitre II



II-1- INTRODUCTION :

Le béton est un matériau composite qui fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ces caractéristiques de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, sa durabilité, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les teintes et les textures. Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés à l'état frais et à l'état durci. [12]

II- 2-Propriété du béton a l'état frais :

Lors du malaxage, l'eau est l'élément qui va donner une capacité d'écoulement au squelette compact formé par l'empilement des grains solides. Ceci signifie que l'eau va venir desserrer le squelette compact afin de donner une mobilité aux grains suffisants pour permettre la mise en œuvre souhaitée ; deux façons de caractériser le béton à l'état frais sont abordées : l'ouvrabilité et les paramètres rhéologiques. [12]

II-2-1- Ouvrabilité :

L'Ouvrabilité est une qualité essentielle du béton: elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage; une bonne ouvrabilité comporte une marge de sécurité permettant sans conséquences fâcheuses une certaine et nécessaire latitude par rapport aux bonnes et plus ou moins rigoureuses règles à appliquer pour une exécution optimale. De l'ouvrabilité dépendent. En effet, la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, enrobage et adhérence des armatures. [17]

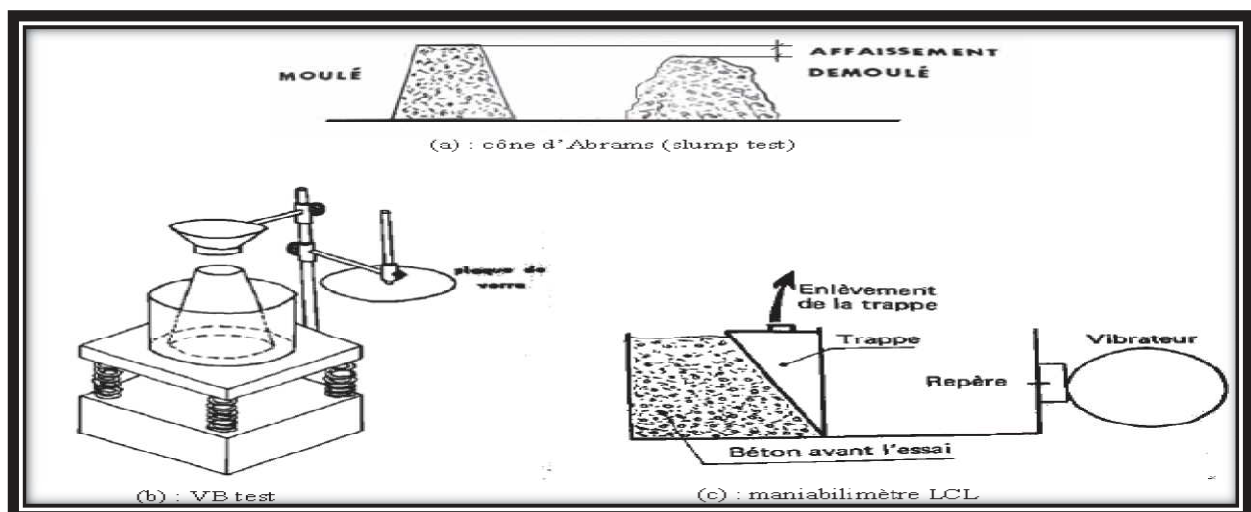


Figure 13 : Certains appareils pour mesurer l'ouvrabilité.

II- 2-1-1- Mesure de la maniabilité du béton :

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. On n'en citera que quelques-uns qui sont les plus couramment utilisés dans la pratique. [12]

Classe	Consistance du béton	Affaissement (en mm) au cône d'abrams
S ₁	Ferme	10_40
S ₂	Plastique	50_90
S ₃	Très plastique	100_150
S ₄	Fluide	160_210
S ₅	Très fluide	≥220

Tableau 17: Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.

A - Essai d'affaissement au cône d'ABRAMS :

L'essai d'affaissement est le plus couramment employé pour le béton sur chantier. Cet essai est cependant très pratique pour détecter des variations de l'homogénéité d'un béton donné. On utilise un moule normalisé de 300 mm de hauteur, placé sur une surface lisse, la petite ouverture vers le haut, le cône est rempli de béton en trois couches. Chacune des couches est compactée par 25 coups d'une tige métallique normalisée. [12]

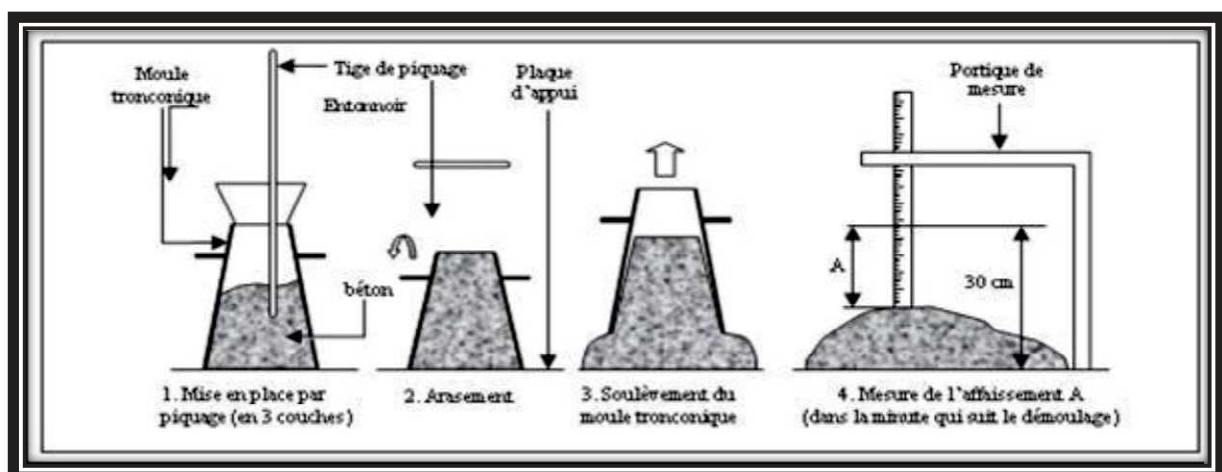


Figure 14 : Mesure de l'affaissement au cône d'ABRAMS.

Après remplissage, le cône est relevé lentement et le béton s'affaisse. La différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est l'affaissement; il est mesuré à 5 mm près (**Figure 14**).

B - Maniabilimètre LCPC :

Cet essai a l'avantage de tenir compte de la mise en vibration du béton dans l'appréciation de sa maniabilité. L'appareil comporte une cuve métallique parallélépipédique dont les dimensions inférieures sont : 30cm de largeur, 30cm de profondeur et 60cm de longueur. Une paroi mobile de section triangulaire sépare la cuve en deux alvéoles distinctes.

Après avoir rempli le moule de béton l'alvéole située du côté du parement incliné de la paroi mobile, cette dernière qui peut coulisser verticalement est soulevée ce qui déclenche simultanément un contact électrique provoquant la mise en marche d'un vibreur (50hertz) fixé sur la paroi avant de l'appareil; le béton s'écoule dans le second alvéole de la cuve et l'on chronomètre le temps qu'il met pour atteindre un trait repère sur la paroi opposée. [18]

Plus le béton est plastique, maniable et de bonne ouvrabilité et plus le temps est court; on constate en moyenne les valeurs suivantes :

- Pour les bétons mous et très fluides, $t \leq 10$ secondes;
- Pour les bétons très plastiques $t \leq 15$ secondes;
- Pour les bétons de bonne ouvrabilité, $20 \leq t \leq 30$ secondes;
- Pour les bétons secs, peu maniables et d'ouvrabilité défectueuse, $t \geq 40$ secondes.

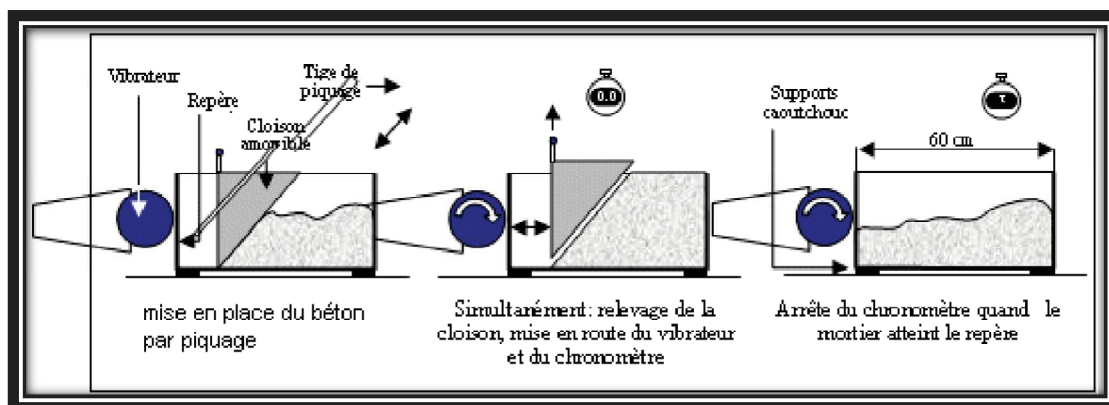


Figure 15: Principe de fonctionnement du Maniabilimètre L.C.P.C.

II- 2-1-2 - Paramètres affectant la maniabilité :

Les facteurs qui influent sur la maniabilité du béton sont : le mode de transport et la durée du transport, la quantité de liant et ces caractéristiques, la consistance du béton (affaissement), les caractéristiques des granulats (granulométrie, forme, type de surface des

grains), le pourcentage d'air entraîné, la teneur en eau, la température du béton et celle de l'air ambiant, et enfin les adjuvants.

Une distribution uniforme des granulats et la présence d'air entraîné contribuent de façon importante à réduire la ségrégation et à améliorer la maniabilité. [12]

II- 2 - 2 - Densité réelle du béton frais :

L'essai est assez simple et nécessite peu de moyens. Il suffit de remplir un moule de volume connu (**V**) (dans les mêmes conditions que celle du chantier) et le peser, soit une masse (**M**) La masse volumique se déduira alors de :

La masse volumique du béton courant dépend évidemment de la composition et des constituants, et en général, elle varie dans les limites suivantes (2200 – 2400) Kg/m³. [18]

II- 2- 3- Mesure de la teneur en air occlus :

La détermination de la teneur en air occlus du béton se fait à l'aide de l'aéromètre à béton (**figure 16**). La teneur en air occlus (bulles d'air) est directement indiquée sur le cadran du manomètre. [19]



Figure 16: Mesure de la teneur en air occlus à l'aide de l'aéromètre.

On peut aussi mesurer la teneur en air occlus par la méthode gravimétrique. La méthode gravimétrique utilise le même équipement que celui utilisé pour la détermination de la masse volumique du béton. La masse volumique mesurée est soustraite de la masse volumique théorique telle que déterminée à partir des volumes absolus des ingrédients, si l'on suppose l'absence d'air la différence, exprimée en pourcentage de la masse volumique théorique, est la mesure de la teneur en air. Le dosage du mélange et les masses volumiques

des ingrédients doivent être connus avec précision sinon les résultats peuvent être erronés. [12]

II- 2 - 4 - Ségrégation :

L'absence de ségrégation est essentiel puisqu'il est impossible d'obtenir un serrage complet d'un béton se ségrégant. La ségrégation peut être définie comme la séparation des constituants d'un matériau hétérogène de sorte que leur distribution n'est plus uniforme .dans le cas de béton ce sont les différences des granulats ainsi que celles des masses volumiques des constituants du béton qui sont la cause principales de la ségrégation. Ainsi, les risques de ségrégation peuvent être contrôlés par le choix d'une granulométrie appropriée et les soins lors de la mise en place du béton.

Il existe deux formes de ségrégation .dans le premier, les gros éléments tentent de se séparer parce qu'ils ont tendance à se déplacer plus vite où à compacter plus rapidement que les grains fins. la seconde forme de ségrégation se produit particulièrement dans les bétons fluides et se manifeste par la séparation de la pâte (ciment +eau) du mélange.

La ségrégation est difficile à mesurer quantitativement, mais elle est facilement détectable lorsque de mauvais procédés de manutention. [20]

II- 2 - 5- Ressuage :

Le ressuage est un type spécial de ségrégation où les particules solides ont un mouvement générale inverse à celui du liquide .En fait, pendant la période dormante du béton les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédiment. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméable.

Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une mince pellicule d'eau à la surface du béton .selon les conditions météorologiques, on assiste à une compétition entre le débit d'eau ressuée et le débit d'eau évaporée est plus faible, le phénomène de ressuage est visible, sinon la surface du béton au lieu d'être brillante, devient mate. La quantité d'eau ressuée sera de toute façon égale la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée. [12]

II-2- 6- Propriétés rhéologiques :

De Larrard et col. (1993) ont développé un rhéomètre à béton, le **BTRHEOM**, pour l'analyse du béton frais. Il s'agit d'étudier la relation entre la contrainte de cisaillement et la déformation dans un milieu homogène et continu. Selon de Larrard, le béton frais est un

matériau intermédiaire entre un fluide et un empilement humide de particules. Hu (1995) a montré que pour les bétons dont l'affaissement est inférieur à 10 cm, la caractérisation rhéologique n'a pas de sens. En effet, lorsqu'ils sont cisailés, de tels bétons peuvent présenter une dilatance importante et perdre leur homogénéité. Ces bétons contiennent alors un volume d'air piégé non négligeable (5-30%). Pour des affaissements supérieurs à 10 cm et si les conditions de stabilité (absence de ségrégation) sont respectées, le béton frais peut être assimilé à un fluide de type Herschel-Bulkley dont la loi fondamentale gouvernant le comportement rhéologique est décrit dans la référence de Larrard (2000). [12]

II- 3 - Propriétés du béton durci :

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme propriété la plus importante bien que, dans nombreux cas pratiques, d'autres caractéristiques telles la durabilité et la perméabilité puissent en fait être plus importantes. Néanmoins, la résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté. De plus, la résistance du béton est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité. [12]

II- 3- 1 - Résistance mécanique :

II – 3 -1- 1- Essais destructifs :

Les résistances sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques, cubiques ou prismatiques, les plus fréquemment utilisés sont les moules cylindriques.

A-Résistance à la compression :

Est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton et en béton armé. Le béton est caractérisé par la résistance à la compression R_{c28} mesurée sur des éprouvettes écrasées à 28 jours selon la norme **NF EN 12390-4**. (Figure 17).

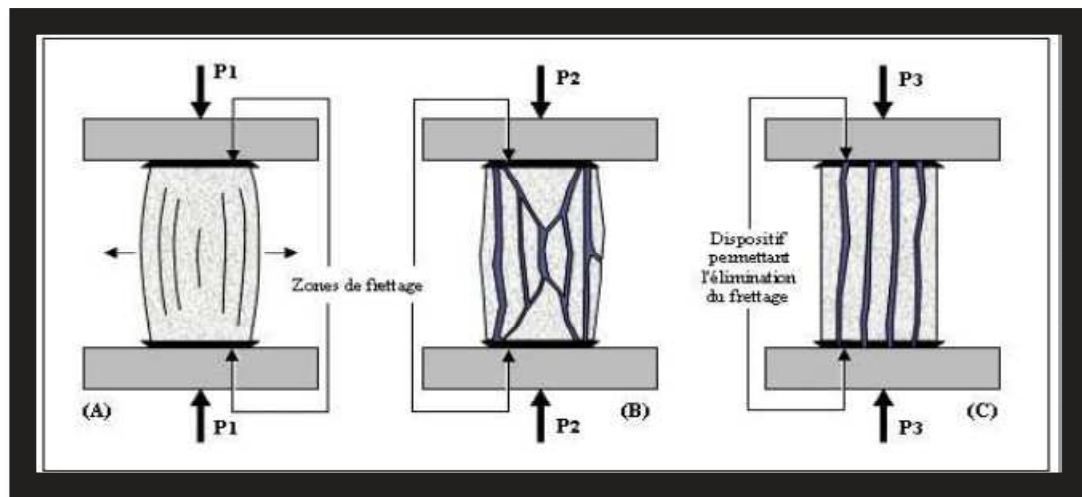


Figure 17: Les essais de la compression.

B - Résistance à la traction :

Elle est moins étudiée que la résistance en compression car le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression, et son comportement en traction est quasi fragile. Le comportement en traction du béton peut être identifié par l'essai de flexion sur trois points, désignée par F_{tj} 28 (figure 16). [21]

Plusieurs essais peuvent être réalisés :

➤ Traction directe :

La mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques à celle de la résistance en traction par fendage, mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite. [21]

➤ Résistance à la traction par fendage :

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé « Essai Brésilien ». Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera : [21]

$$F_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL}$$

Avec :

j : âge du béton en jour ou moment de l'essai.

D et **L** =diamètre et longueur du cylindre.

P= charge de rupture.

➤ **Résistance à la traction par flexion :**

Les essais les plus courants sont des essais de traction par flexion. Ils s'effectuent en général sur des éprouvettes prismatiques de côté **a** et de longueur **4a**, reposant sur deux appuis:

- Soit sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre).
- Soit sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges) (**figure 16**). [21]

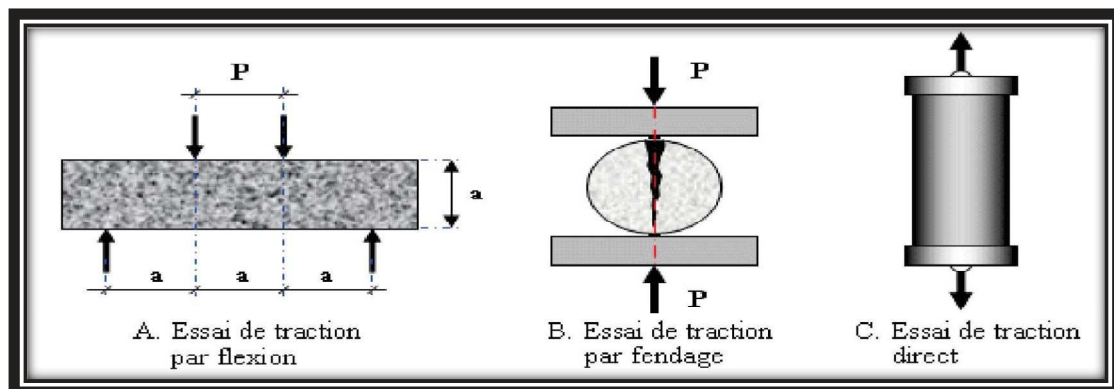


Figure 18: les essais de traction.

C - Le Carottage :

C – 1 - Généralités :

Dans l'Industrie du béton, les essais pour la détermination de la résistance mécanique sont généralement réalisés sur les produits eux-mêmes, voire sur éprouvettes confectionnées lors de la fabrication. Le recours au carottage est assez rare. En fait, il est essentiellement pratiqué dans les cas suivants :

- Soit parce que la structure a subi des dommages par exemple par le feu, surcharges, fatigue et/ou a été dans un environnement agressif....ect.
- Soit parce que les résultats obtenus lors des épreuves de contrôle de fabrication ne sont pas conformes et qu'il est nécessaire de procéder à des investigations complémentaires pour décider des actions à entreprendre.

Avant extraction, les implications possibles du carottage sur les structures doivent être considérées. Les emplacements choisis devront être dénués d'armatures métalliques ou ne présenter que peu d'armatures.

Les carottes seront de préférence prélevées à une distance des joints ou des arêtes suffisante pour ne pas rendre disgracieux ou impossible le ragréage des «trous».

En règle générale, l'extraction est réalisée par :

- un carottage vertical pour les dalles, les tabliers de ponts, les semelles et éventuellement pour les poutres de faible hauteur.
- un carottage horizontal dans l'âme des poutres de grande hauteur, dans le tiers central des poteaux, des murs, des piédroits...ect.. [22]



Figure 19 : carottage vertical



Figure 20 : Carottage horizontal.

C – 2- Principe :

Les carottes extraites au moyen d'un carottier sont soigneusement examinées, leurs extrémités sont préparées par rectification ou par surfaçage, puis testées en compression. [22]

C – 3 - Définitions :

- ✓ **Carottage :** C'est le découpage des échantillons de béton ou carottes, d'une structure, à l'aide d'une machine, ou carotteuse dont la partie active est le carottier.
- ✓ **Carottier :** Il est constitué d'un tube mince, muni à une extrémité d'une couronne diamantée. La dépouille interne correspond à la différence entre les diamètres intérieurs de la couronne diamantée et du tube. La différence entre les diamètres extérieurs est la dépouille externe.
- ✓ **Éprouvette carottée :** C'est la partie de la carotte, obtenue après élimination des extrémités et destinée aux essais de résistances mécaniques et autres mesures.

- ✓ **Résistance «vraie»** : Cette résistance intègre : la qualité propre du béton et des déficiences éventuelles dans une mise en œuvre et/ou une cure insuffisante.
- ✓ **Élancement** : L'élancement d'une éprouvette carottée est le rapport entre sa longueur et son diamètre.
- ✓ **Voilage** : Déplacement circonférentiel de l'outil dans une section donnée.
- ✓ **Battement** : Déplacement de l'outil suivant une direction parallèle à son axe. [22]

C – 4 - Le matériel :

La carotteuse est composée essentiellement d'un bâti, d'un moteur et d'un carottier.

-Le bâti Il doit être rigide et parfaitement immobilisé par rapport à la structure dont on veut extraire des carottes. Le positionnement se fait par l'un des moyens suivants :

- ✓ par lestage, pour des dallages par exemple.
- ✓ par ancrage, par exemple avec des pointes «spit» ou des chevilles à expansion.
- ✓ par étagage, en général pour un carottage horizontal.
- ✓ à l'aide de ventouse(s) avec pompe à vide.

-La fixation doit être particulièrement soignée afin d'éviter toute vibration préjudiciable à la qualité de la carotte et à la durée de vie de l'outil diamanté.

- Les moteurs peuvent être électriques, pneumatiques, thermiques ou hydrauliques. [22]

-La puissance du moteur dépend du diamètre des carottes à prélever. Pour des diamètres compris entre 70 et 100 mm, la puissance doit être au minimum de 2 kW.

-La vitesse de rotation de la broche doit permettre une vitesse périphérique de l'outil diamanté d'environ 2 à 3 m/s. Cela nécessite une broche tournant entre 500/700 tr/min avec un carottier de Ø 70 mm et 350/550 tr/min avec un carottier de Ø 100 mm.

-Le carottier Il doit être choisi en fonction de la dureté et de l'abrasivité du béton. Dans tous les cas, il s'agit d'un outil dont la couronne est constituée de segments de 2 à 4 mm d'épaisseur. L'espace entre segments est nécessaire à l'évacuation de l'eau de refroidissement et des débris de forage. Ces segments sont constitués de particules de diamant noyées dans un liant métallique, la concentration en particules de diamant, leur taille et la nature de la matrice sont fonction du type de béton à carotter.

Il est nécessaire de les aviver périodiquement par carottage dans un matériau tendre et abrasif (grès par exemple) ou avec une meule.

-Les dépouilles interne et externe du carottier doivent être importantes. Elles seront au minimum de 0,8 mm/m. Après montage, le carottier doit tourner parfaitement «rond», sans voilage ni battement excessif. [22]

➤ **Autres éléments :**

✓ La tête d'injection, permet d'assurer par l'intérieur de l'outil l'arrosage nécessaire au refroidissement des segments diamantés et à l'évacuation des débris. L'arrosage continu à l'eau est de l'ordre de 6 à 10 g/min au début du carottage.

✓ Le système d'avance de l'outil : le moteur est monté sur une crémaillère et l'ensemble moteur-outil se déplace en translation par rapport au bâti. L'avance manuelle doit être la plus uniforme possible et de ce fait, nécessite un soin soutenu de la part de l'opérateur. La vitesse d'avance dépend de la nature et de la qualité du béton, de la puissance de la machine et de l'état du carottier, elle est en général de 3 à 4 cm/min. Au début du carottage, afin d'éviter l'usure prématurée de la couronne diamantée, il est recommandé d'utiliser un guide de centrage, celui-ci évite un déplacement de l'outil sur la surface à carotter sous l'effet du couple résistant.

✓ La liaison moteur-outil se fait par un raccord auto-centreur. [22]

C-5- Facteurs influent la résistance des carottes :

✓ **Teneur en eau :**

La teneur en eau de la carotte aura une influence sur la résistance mesurée. Ainsi, la résistance d'une carotte saturée en eau est de 10 % à 15 % inférieure à celle d'une carotte comparable sèche.

✓ **Conditions de conservation :**

Les conditions de conservation auront une influence sur la résistance mesurée. La résistance augmente avec la maturité.

✓ **Porosité :**

Une porosité accrue fait diminuer la résistance. Environ 1 % de porosité réduit la résistance de 5 % à 8 %.

✓ **Sens par rapport au coulage :**

Selon la «stabilité» du béton frais, il est possible que la résistance mesurée d'une carotte prélevée verticalement dans le sens du coulage soit plus grande que la résistance d'une carotte prélevée horizontalement dans le même béton. Cette différence peut varier entre 0

% et 8 %.

✓ **Variables d'essai :**

- **Diamètre des carottes :**

Le diamètre des carottes influence la résistance mesurée et la variabilité de la résistance. Lorsque le diamètre diminue pour la même longueur de carotte, la variabilité de la résistance augmente et on peut prévoir que le niveau de résistance change à mesure que le diamètre diminue.

La variabilité de la résistance mesurée augmente lorsque le rapport du diamètre sur la classe granulaire maximale décroît.

- **Rapport longueur/diamètre :**

Le rapport longueur/diamètre a une influence sur la résistance mesurée (voir essai de compression).

- **Planéité des surfaces finales :**

Les écarts de planéité diminuent la résistance mesurée. [22]



Figure 21 : Les carottes.

II- 3- 1 -2- Essais non destructifs :

Les essais non destructifs sont des essais qui permettent d'évaluer la résistance d'un béton sans que l'on soit obligé d'aller jusqu'à la rupture des éprouvettes. C'est un avantage indéniable lorsque l'on est appelé à établir un diagnostic des ouvrages où les éprouvettes font défaut. [22]

A - Essai par scléromètre :

A – 1 - introduction :

L'augmentation de la dureté du béton avec l'âge a conduit au développement de méthodes d'essai pour mesurer sa résistance à la compression. Ces méthodes reposent sur deux principes physiques ; l'indentation et le rebondissement.

Les méthodes reposant sur l'indentation consistent à appliquer une charge à la surface du béton à l'aide d'un indenter qui peut prendre plusieurs formes géométriques suivant la méthode d'essai. Pendant l'indentation le matériau se déforme de manière elasto-plastique ; la déformation plus ou moins prononcée suivant le matériau ; pour le béton c'est un enfoncement et donc l'essai consiste à mesurer la largeur et la profondeur de l'enfoncement dû à l'impact.

Les méthodes d'indentation ont vu le jour en Allemagne en 1934 Introduits dans les standards allemands en 1935 [Boundy 1964] puis elles ont été utilisées en Angleterre et en URSS sous trois formes différentes :

- ✓ Testing pistol by Williams
- ✓ Spring hammer by Frank
- ✓ Pendulum hammer by Einbeck

Les méthodes basées sur le principe du rebondissement consistent à projeter une masselotte par un ressort contre la surface du béton et mesurer ensuite l'indice de rebondissement sur une échelle graduée. [22]

A – 2 - Historique :

De nos jours, la méthode la plus largement utilisée pour mesurer la dureté superficielle du béton est le scléromètre de Schmidt (Schmidt rebound hammer), [Szallagy K., 2013].

A l'origine développée en 1905 par l'ingénieur Swiss Ernest Schmidt et présenté à la swiss fédéral testing and expérimental Institute of Zurich ; l'appareil sera développée ensuite en intégrant une échelle graduée pour lire directement l'indice de rebondissement [Schmidt, 1950 1951,1954], et en utilisant un seul ressort au lieu de deux pour plus de simplicité et de pratique [Greene. 1954, Anderson et al. 1955].

Introduit et développé par Proceeq SA, fondée en 1954 ; plusieurs centaines de milliers d'exemplaires de l'original Schmidt rebound hammer ont été fabriqués et utilisés de par le monde [Baumann, 2006].

Il s'agit sans aucun doute de l'appareil de mesure NDT le plus couramment utilisé pour évaluer rapidement l'état d'une structure en béton. Au fil des années, son application s'est étendue aux tests de roches et aux tests de dureté de bobines de papier.

PROCEQ fabrique aussi un plus large éventail de marteaux pour s'adapter pratiquement à toutes les applications des essais in situ - y compris l'original Schmidt marteau de type N et L , le type enregistrement NR et LR , types numérique ND et LD DIGI- SCHMIDT.

Le dernier modèle PROCEQ Silver Schmidt - un instrument fabriqué en Suisse - offre des avantages sans précédent aux utilisateurs. Le nouvel instrument dispose d'une facilité d'utilisation inégalée ; facilité de lecture de l'indice de rebondissement et une précision supérieure, ainsi qu'une plage de mesure étendue. Un certain nombre d'avantages ont été intégrés, comme la correction automatique des relevés basés sur la direction de l'impact - éliminant le besoin de se référer aux courbes de conversion de direction de l'impact.

A- 3 - Appareillage :

Il existe plusieurs modèles de scléromètres selon le type de recul ainsi que l'énergie d'impact. Le modèle le plus utilisé est le scléromètre SCHMIDT (Suisse).

- L'appareil est composé d'une masselotte chargée par un ressort qui se projette sur une tige métallique appelée tige de percussion. Il est livré avec une pierre à polir et un bloc d'étalonnage
- La vitesse de déplacement du marteau produite par le ressort doit être constante et reproductible. Le rebondissement du marteau en acier par rapport à la tige de percussion en acier ou d'autres valeurs de rebondissement doit être mesuré sur une échelle linéaire solidaire du bâti de l'instrument. [22]

Le scléromètre est un appareil cylindrique composé de divers éléments illustration ci-dessous:

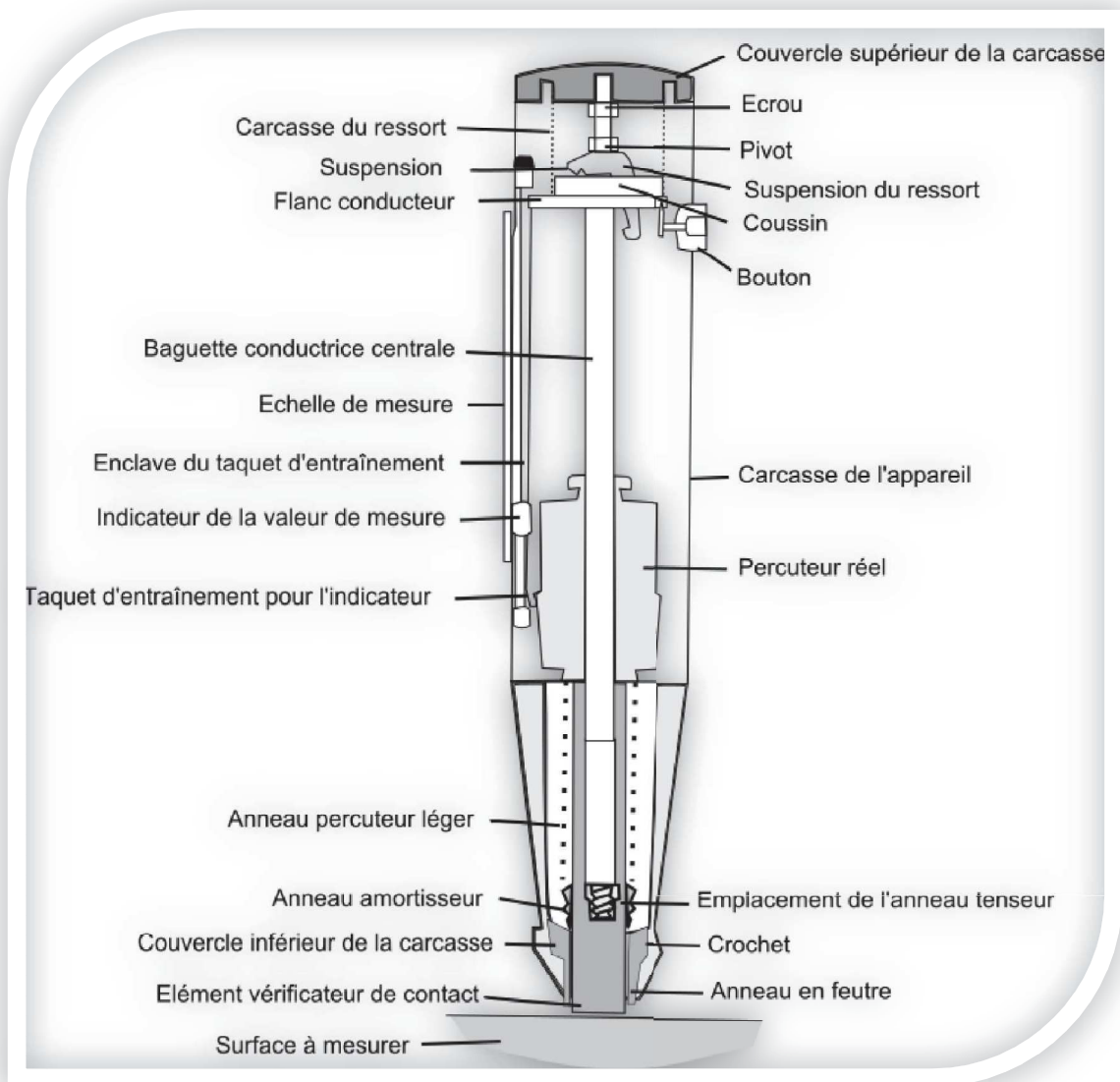


Figure 22 : Scléromètre à béton modèles N/L.



Figure 23: Scléromètre.

Il existe une relation directe entre la dureté superficielle et la résistance du béton à la compression.

A – 4 - Méthodologie :

1- Préparation de la surface :

Les mesures doivent être effectuées sur des surfaces nettes ne présentant pas de nids de gravier, des écaillages, de texture grossière, de porosité élevée ou d'armatures affleurantes. La préparation de la surface consiste à éliminer tout enduit ou peinture adhérent ou poncer si cette surface est constituée d'une couche superficielle friable. Toute trace d'eau sur la surface doit être essuyée. [23]

2- Points de mesures :

a - mesures sur ouvrage

La surface testée est divisée en zones d'au moins 400 cm^2 ($25 * 25 \text{ cm}$). La tige de percussion du scléromètre étant perpendiculaire à la surface essayée, on prend 27 mesures sur chaque zone d'essai. La distance entre 2 points de mesure est d'au moins 30 mm et aucun point ne doit se situer à moins de 30 mm de l'un des bords de la surface testée. [24]

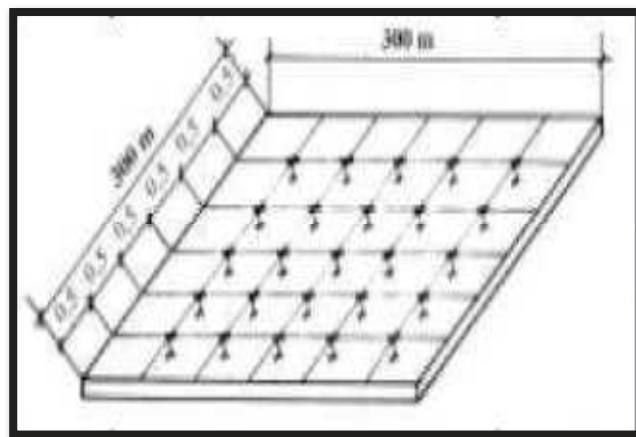


Figure 24 : Points de mesures pour un panneau (exemple dalle $3 \times 3 \text{ m}^2$).

b - mesures sur éprouvette 16 * 32 :

Les éprouvettes préalablement rectifiées conformément aux prescriptions de la norme NFP 18- 416, sont maintenues entre les plateaux d'une presse sous une contrainte de 0.5 MPa .le scléromètre étant placé perpendiculairement à l'axe de l'éprouvette, on relève 27 mesures réparties sur 3 génératrices en 27 points distincts et distants entre eux de 30 mm. Aucune mesure ne doit être située à moins de 40 mm des faces planes de l'éprouvette. [24]

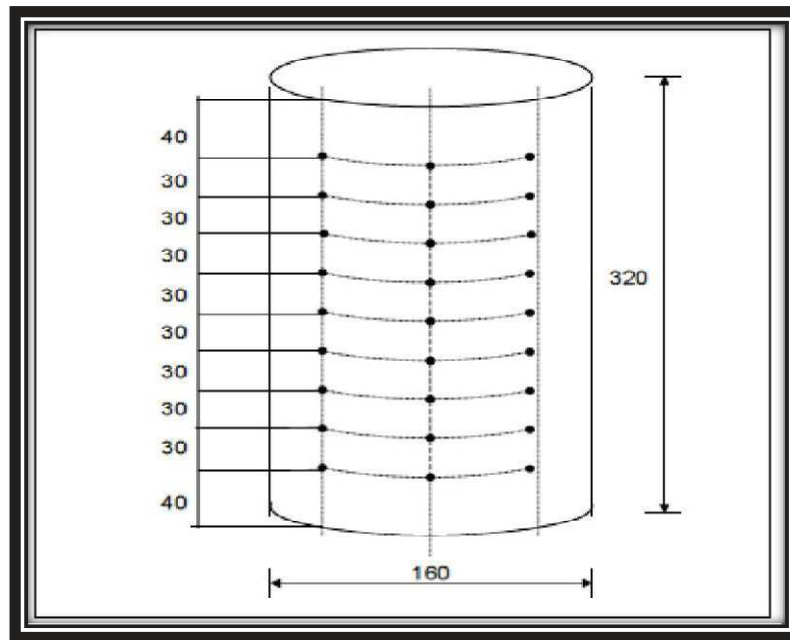


Figure 25 : Grille de mesure sur éprouvette.

Effectuer au moins 10 mesures successives dans la même zone. La surface de cette zone est équivalente à celle d'un carré d'environ 25 cm de côté. Au cours de ces mesures, il convient de ne pas effectuer l'essai à moins de 3 à 4 cm des bords de l'élément testé.

A – 5 - Méthodes de mesure de l'Indice de rebondissement :

L 'indice de rebondissement est la mesure enregistrée sur une échelle graduée fixe par rapport au bâti de l'appareil de scléromètre, après la projection d'une masselotte chargée par ressort sur une tige métallique en contact avec la surface du béton. Cette mesure est fonction de l'angle d'inclinaison de l'appareil par rapport à l'horizontal. [23]

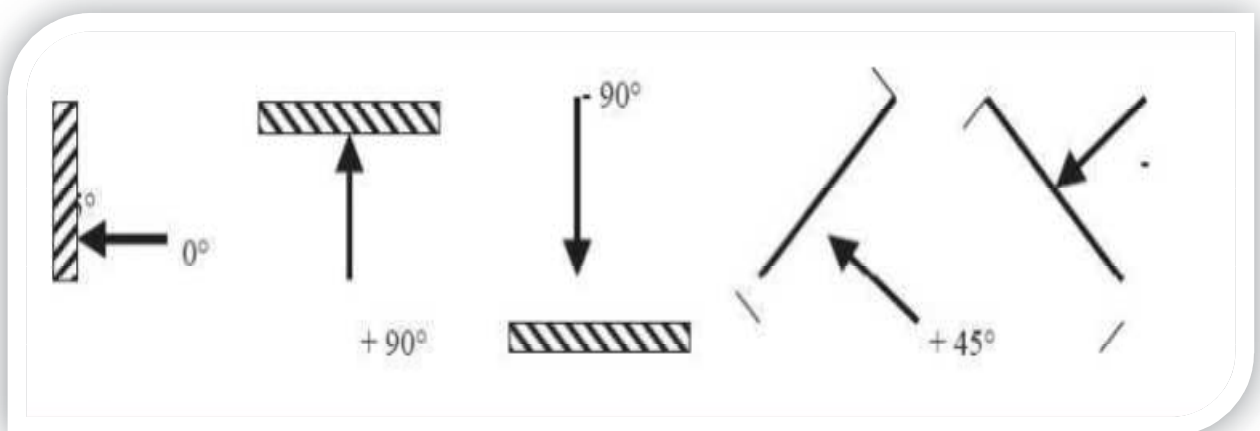


Figure 26 : Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter.

Le scléromètre doit être contrôlé par des essais d'étalonnage, car les constantes des ressorts changent après plusieurs utilisations. [23]

Deux cas peuvent se présenter :

- ✓ $28 \leq I \leq 32$ le fonctionnement de l'appareil est satisfaisant ;
- ✓ $I < 28$ ou $I > 32$ l'appareil est défectueux ; il sera procédé au nettoyage de l'appareil pour refaire une nouvelle fois la mesure de I .

A- 6 - Facteurs influençant l'essai au scléromètre : [23]

Malgré que l'essai du scléromètre soit d'un usage simple, rapide et peu coûteux pour le contrôle du béton il a certains inconvénients et présente certaines limites qui peuvent affecter considérablement sa fiabilité.

L'essai est donc affecté par différents facteurs dont les plus intéressants sont les suivants :

✓ Texture de la surface :

La texture de la surface est d'une grande importance quant à la précision des résultats. L'indice de rebondissement se trouve diminué par la rugosité de la surface, des chercheurs comme Kolek et Greene [Kolek 1958 et Greene 1954] ont recommandé de polir les surfaces avant l'essai.

✓ Dimension, forme et rigidité de l'élément à tester :

Pour des éléments de petites dimensions (poutrelle, éprouvette), tout mouvement de l'élément entraîne une diminution de la valeur de l'indice de rebondissement. Pour y remédier, l'élément à tester doit être rigidement maintenu.

✓ Age de l'élément à tester :

Zoldners et Victor [Zoldners 1957 et Victor 1963] ont démontré que pour des résistances égales ; des valeurs plus élevées de l'indice de rebondissement sont obtenus pour un béton de 7 jours que pour un béton de 28 jours.

✓ Humidité extérieure et intérieure du béton :

Le degré de saturation du béton a un effet décisif sur la valeur de l'indice de rebondissement Zoldners et Victor [Zoldners 1957 et Victor 1963] ont montré que les essais

sur des éprouvettes de béton à l'état saturé ont donné des valeurs de l'indice de rebondissement 5 points en moins que lorsque les éprouvettes ont été testées à l'état sec.

✓ **Type des granulats :**

Klieger et al. [Klieger et al. 1954] Ont démontré que pour des valeurs de la résistance à la compression égales, le béton fabriqué avec des granulats concassés donne des valeurs de l'indice de rebondissement de 7 points inférieures que pour un béton fabriqué avec des granulats naturels.

✓ **Type de ciment :**

D'après [Kolek 1969], le béton fabriqué avec un ciment alumineux a une valeur de la résistance à la compression 100% supérieure par rapport un béton fabriqué avec un ciment ordinaire, ce qui conduit nécessairement à des valeurs élevées de l'indice de rebondissement.

✓ **Carbonatation de la surface du béton :**

La surface de carbonatation affecte sérieusement les essais au scléromètre. Dans des vieux bétons, l'épaisseur de la surface de carbonatation peut atteindre quelques millimètres ; dans ce cas les valeurs de l'indice de rebondissement peuvent être 50% supérieures que pour une surface de béton sans carbonatation.

B - Les ultrasons :

B – 1 - introduction :

Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

Ultrason c'est un essai non destructif très important qui nous permet de détecter à la fois plusieurs caractéristiques du béton durci, tels que : le degré de compacité, l'homogénéité, la résistance à la compression, le taux de fissuration, ...etc. [25]

B – 2 – Historique :

Les méthodes acoustiques sont avec l'inspection visuelle, les plus anciennes formes du contrôle non destructif. Le son est un moyen de détecter la présence des vides, fissures ou délaminations.

En 1920, le scientifique russe Sergei Y. Sokolov de l'institut électrotechnique de Leningrad, en ce qui était l'URSS s'est proposé d'abord d'utiliser la vitesse de l'onde ultrasonique (UPV) pour trouver les défauts dans les objets métalliques. Cependant ce n'est qu'en 1942 qu'un réel progrès a été réalisé par Firestone à l'université de Michigan et indépendamment par Sproule en Angleterre [NDT ressources center].

Après la seconde guerre mondiale, s'en est suivie une rapide évolution dans l'instrumentation du contrôle non destructif ; l'objectif principal étant la détection des défauts. En réponse à ce besoin des techniques de plus en plus sophistiquées utilisant les ultrasons ; courant de Foucault, radiographie... sont apparues.

C'est au début des années 1970 avec l'amélioration de la technologie, l'apparition de la mécanique de rupture et le développement de nouvelles lois pour prédire le taux d'évolution des fissures dans le béton sous chargement cyclique (fatigue) qu'un réel et majeur changement se produit dans le domaine du NDT.

L'essai ultrasonique peut être effectué sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminé. [22]



Figure 27 : Essai Ultrasons.

- La vitesse de l'impulsion V est donnée par la relation :

$$V = \frac{l}{t}$$

B – 3 - Principe :

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. D'après LESLIE et CHEESMAN, l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée.

- Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables sont utilisées dans le récepteur JONS.R ET FACAOARU (1969).
- La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques. [23]

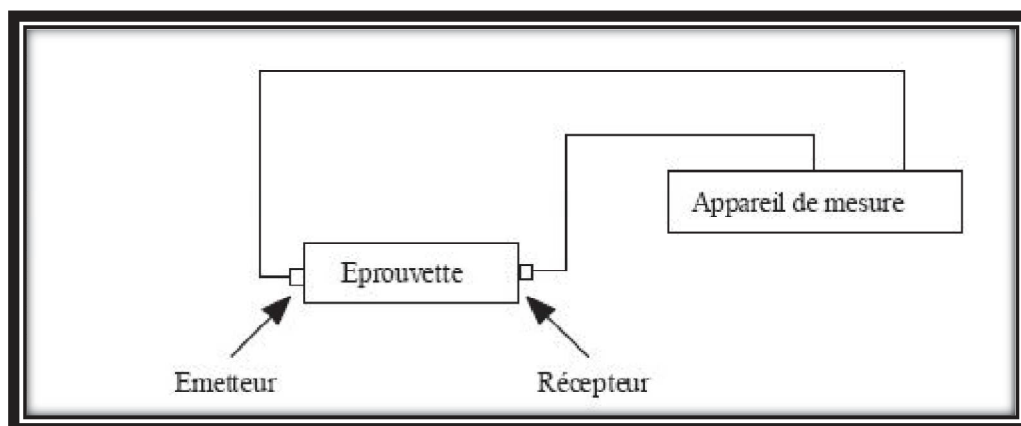


Figure 28 : Appareil de mesure.

B - 4 - Appareillage :

L'appareillage est constitué d'un générateur d'impulsions électriques, d'une paire de transducteurs, d'un amplificateur et d'un dispositif électronique de mesure de temps permettant de mesurer la durée écoulée entre le départ d'une impulsion générée par le transducteur-émetteur et son arrivée au transducteur-récepteur. Un barreau de calibrage est fourni pour permettre d'obtenir une ligne de référence du mesurage de la vitesse.

-Il existe deux sortes d'appareils électroniques de mesure du temps :

- ✓ Un oscilloscope sur lequel le premier front de l'impulsion est visualisé par rapport une échelle de temps appropriée.

- ✓ Un compteur avec affichage numérique direct.

Dispositif expérimental utilisé dans notre cas : C372-01 Appareil à ultrason TICO comprenant :

- Affichage **LCD** avec mémoire non volatile d'une capacité de 25 mesures.
- Plage de mesure 0.1 à 6553.5 μ s, résolution 0.1 μ s, impulsion de tension 1 kV, taux d'impulsion 1/s, avec 4 batteries
- 1.5V, 2 transducteurs 54 kHz,
- câble,
- barre étalon,
- sortie RS 232 pour PC, pâte d'accouplement.
- Coffret. Dimension 325x295x105 mm, poids 2.2 kg.



Figure 29 : Appareil de mesure.

Qualité du béton	Vitesse de propagation (m/s)		
Excellente	Supérieure	à	4575
Bonne	3660	à	4575
Douteuse	3050	à	3660
Mauvaise	2135	à	3600
Très mauvaise	Inferieure	à	2135

Tableau 18 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions.

B – 5 - Mode Opérateur :**a - Travaux préparatoires :**

- Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera fixé.
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériaux d'interposition comme la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol. [23]

b - Points de mesures :

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage à tester. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, etc.) les points de mesures sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0.5m. Le cas des petits éléments (poteaux, poutres, etc.), les mesures se font en six points. [23]

c - Distances minimales entre points de mesures :

On recommande une distance minimale de parcours de 400 mm pour les mesures en surface. [25]

d - Étalonnage de l'appareil :

L'ultrason doit toujours être contrôlé par des essais d'étalonnage avant chaque utilisation. L'étalonnage consiste à vérifier le temps de propagation à travers la tige étalon dont le temps est connu à l'avance. Il faut ajuster l'ultrason dans le cas où le temps mesuré ne correspond pas à celui marqué sur la tige étalon. [23]

e - Manières de mesure :

Il existe 3 méthodes pour conduire l'essai ultrasonique :

1- mesures en transparence (directe) :

Des ondes sonores longitudinales à travers un élément. L'émetteur et le récepteur sont placés sur les deux faces opposées de l'élément à ausculter. C'est la méthode la plus employée car il y a un maximum d'énergie de l'impulsion est transmise puis reçue donc c'est la méthode la plus satisfaisante. Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. [23]

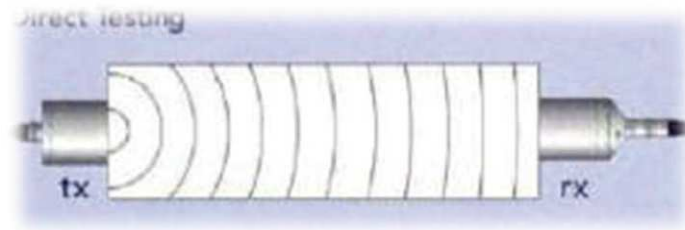


Figure 30 : Méthode en transparence (directe).

2 - mesures en surface (indirecte) :

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur.

L'émetteur est maintenu en un point fixe, le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance.

Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant.[23]

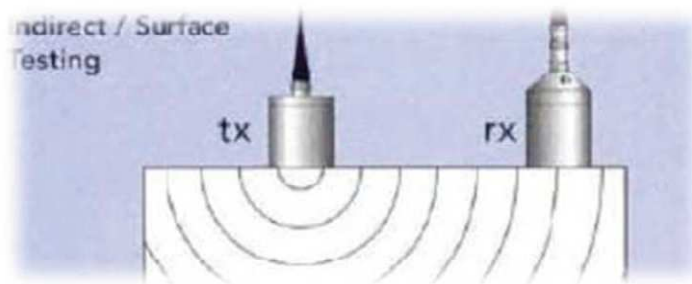


Figure 31: Méthode en surface (indirecte).

3 – la mesure en semi-directe :

L'émetteur et le récepteur sur deux faces perpendiculaires. On a recours à cette méthode lorsque l'ensemble de la structure n'est pas accessible. La distance séparant les 2 transducteurs ne doit pas être trop grande pour que l'onde ne s'atténue pas trop ce qui ne pas faciliter la détection du signal de l'impulsion.

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les éléments de structure ou on ne peut pas utiliser les 2 autres manières.
[23]

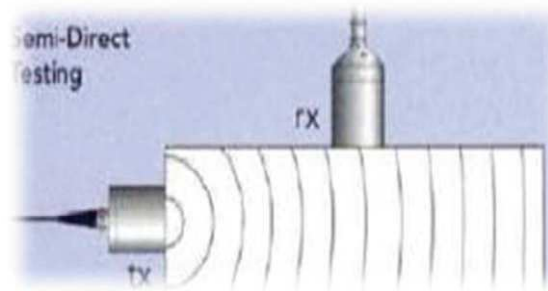


Figure 32 : Méthode semi-directe.

B – 6 - Facteurs affectants la vitesse de propagation : [23]

Plusieurs facteurs peuvent affecter la vitesse de propagation qu'ils soient liés aux propriétés du béton ou autres.

✓ Dimension et type des granulats, granulométrie, teneur :

Plusieurs chercheurs ont montré que la vitesse d'impulsion est très affectée par le type et la teneur en granulats. Jones [18] a rapporté que pour une même composition de béton et une même résistance à la compression, le béton composé avec de granulats arrondis a la plus faible vitesse de propagation, les granulats concassés par contre donnent une valeur plus élevée de la vitesse de propagation.

Des résultats de recherches additionnels [Jones 1962, Bullock 1959 and Kaplan 1959] ont montré que pour la même valeur de résistance à la compression, les bétons ayant les plus grandes teneurs en granulats donnent les valeurs les plus élevées de la vitesse de propagation.

✓ Type de ciment :

Le type de ciment n'a pas d'influence directe sur la vitesse de propagation [Jones 1954]. Le taux d'hydratation diffère d'un ciment à un autre et ceci influence la vitesse de propagation.

Comme le degré d'hydratation augmente, le module d'élasticité augmente aussi, ainsi que la vitesse de propagation.

✓ Le rapport eau/ciment :

Kaplan [Kaplan 1959] dans son travail de recherches, a démontré que lorsque le rapport e/c augmente, la résistance du béton à la compression et la valeur de la vitesse de la propagation correspondante diminue en supposant la même composition de béton.

✓ Les adjuvants :

Les entraîneurs d'air n'ont pas vraiment une influence sur la relation entre la vitesse de propagation et la résistance à la compression du béton [Jones 1954]. D'autres adjuvants vont influencer approximativement la vitesse de propagation de la même manière que le taux d'hydratation. L'addition du chlorure de calcium par exemple réduit le temps de durcissement du béton et fait augmenter la valeur de la vitesse de propagation.

✓ L'âge du béton :

Le phénomène est similaire à celui du développement de la résistance à la compression du béton. Jones [18] a montré que la vitesse de propagation augmente très rapidement au début puis se stabilise. La vitesse de propagation atteint plus vite sa valeur maximale que la résistance. Il conclut que les erreurs expérimentales font qu'il est impossible d'évaluer avec précision la valeur de la résistance à la compression avec précision.

✓ Positionnement du transducteur :

La nature du contact du transducteur par rapport à la surface de l'élément à tester a une grande influence sur la valeur des vitesses de propagation ; un contact impropre peut mener à des lectures erronées de la vitesse de propagation.

✓ Température du béton :

Au-delà de l'intervalle des températures comprises entre 5 à 20°C ; l'influence de la température est très importante [Jones et al. 1969] des rectifications doivent être faites comme cela est recommandé dans les normes BS 1881 Part 203, 1986.

✓ L'humidité et condition de cure du béton :

La valeur de la vitesse de propagation pour un béton saturé est plus élevée que pour un béton qui durcit à l'air. Néanmoins l'influence de l'humidité est moins importante sur les bétons à hautes résistances que pour les bétons avec des résistances normales.

✓ Distance entre les transducteurs :

Théoriquement la distance de trajet de l'onde et sa fréquence ne doivent pas le temps de propagation, donc pas d'effet sur la vitesse de propagation du fait de la nature de non-homogénéité du béton [Jones. 1962].

RILEM 24 [RILEM. 1972] recommande les distances optimales entre transducteurs suivantes :

- 100 mm – pour un béton dont la plus grande dimension des granulats est 30 mm.
- 150 mm – Pour un béton dont la plus grande dimension des granulats est 45 mm.

✓ **Niveau de contrainte :**

La valeur de la vitesse de propagation n'est généralement pas affectée par le niveau de contraintes que subit l'élément à tester ; seulement quand le béton est sujet à de très grandes contraintes avec des cycles répétés, des fissures se développent ce qui va réduire la valeur de la vitesse de propagation.

✓ **Présence de barres de renfort :**

L'un des facteurs les plus importants influençant la vitesse d'impulsion est la présence de barres de renfort.

La vitesse de propagation de l'acier est 1.4 à 1.7 fois celle du plein béton. Alors il est préférable quand il est possible, d'éviter de tester à l'endroit de présence des barres de renfort. Lorsque ceci est inévitable il faut alors corriger en affectant de facteurs de correction ; qui sont recommandés par la RILEM 23 [RILEM. 1972] et les British standards.

II - 3 – 1- 3 - Déformation des bétons :

La résistance mécanique et la déformation sont des caractéristiques importantes du béton, car elles jouent un grand rôle non pas seulement pour la stabilité, mais aussi la durabilité des ouvrages. Lorsque le béton est soumis à l'action d'une charge rapidement croissante, il se comporte comme un matériau fragile. D'une part, sa rupture n'est pas précédée de déformations importantes et d'autre part, sa résistance à la traction est beaucoup plus faible que sa résistance à la compression. La résistance à la traction s'annule même complètement si des fissures de retrait se sont développées. [26]

a – Fluage :

Le fluage du béton est caractérisé par l'évolution dans le temps des déformations du matériau ou de la structure due à l'application d'un chargement mécanique extérieur par définition constant. Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge modérée de longue durée, le béton se comporte alors comme un matériau viscoélastique. La déformation instantanée élastique qu'il subit au moment de l'application de la charge est en effet suivie d'une

déformation dite différée évoluant lentement, et qui aurait tendance à se stabiliser à longue échéance (après quelques années voire quelques dizaines d'années). [26]

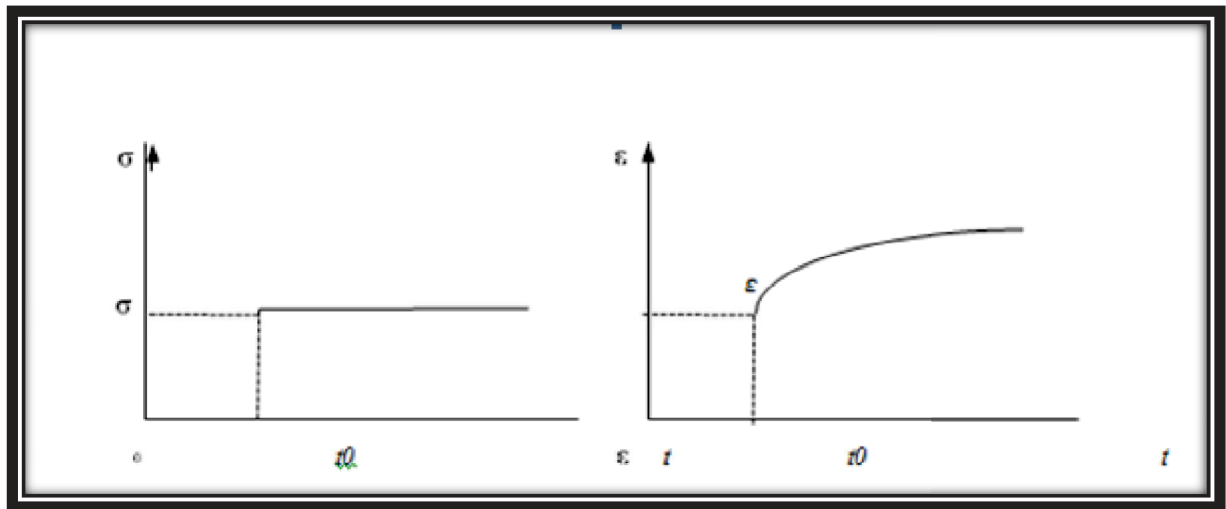


Figure 33: représentation schématique du résultat d'un essai uniaxial de fluage.

b - Élasticité du béton :

Le module de Yong noté E est donné généralement en mégapascal (MPa), il est défini comme le rapport entre une contrainte appliquée perpendiculairement à une surface, l'élongation subie par le matériau. Le module d'Yong correspond donc à la contrainte qui engendrerait un allongement de 100% de longueur initiale du matériau. [27]

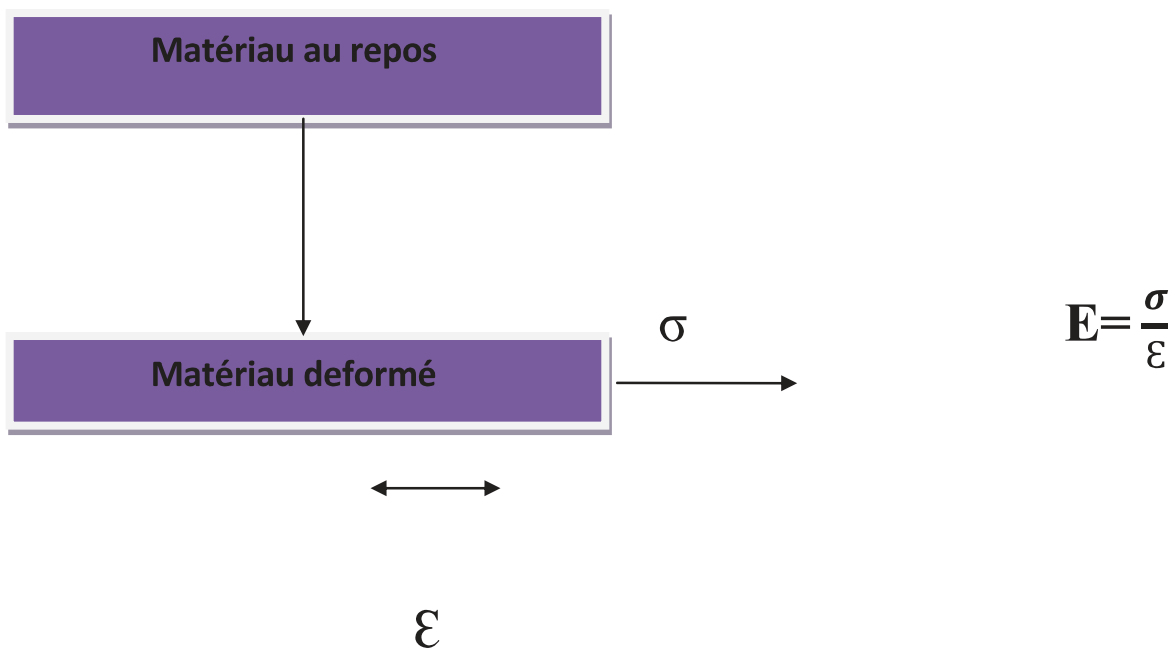


Figure 34 : Module d'élasticité.

C - Effet «Poisson» :

Le coefficient de poisson correspond au rétrécissement de la section d'un matériau soumis à une traction. On définit le coefficient de Poisson comme étant le rapport entre la déformation relative transversale et la déformation relative axiale. Il permet de relier les déformations les unes aux autres. En effet le coefficient de Poisson relie le module de cisaillement et le module de Young. [28]

La valeur de coefficient de Poisson, varie de 0,15 à 0,30. Il est d'autant plus élevé qu'on le béton est plus jeune ou moins résistant

D - Retrait du béton :

C'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment, on peut l'assimiler à l'effet d'un abaissement de température entraînant un raccourcissement. Pendant les périodes de prise et de durcissement le béton peut subir des déformations résultantes de plusieurs types du retrait.

Le retrait dû à plusieurs paramètres tels que : le type et le dosage du ciment, la cure, le rapport E/C, l'utilisation, dosage et type des ajouts cimentaires...etc. [29]

E- Durabilité des bétons :

Est généralement utilisé pour caractériser de façon très générale la résistance d'un béton face à l'attaque d'un agent agressif physique ou chimique (**Moranville, Regourd, 1982**), et aussi aux contraintes mécaniques (fluage). La durabilité du béton dépend des facteurs qu'il n'est pas toujours aisé d'isoler : condition de mise en œuvre, compositions des différents constituants (ciment, granulats, eau, adjuvants), âge du béton, conditions climatiques et le milieu dans lequel le béton est exploité. [30]

Les facteurs influençant la durabilité peuvent être internes aux bétons comme la porosité, perméabilité et diffusivité, la fissuration, les ions chlore (présent dans certains accélérateurs et eau de gâchage), réactions alcalis granulats, les ions sulfates (oxydations des pyrites contenues dans certains granulats calcaires), ou externes les ambiances hivernales (la répétition des cycles de gel dégel, l'action des sels de déverglaçage, formation de sels gonflants), les ambiances chimiquement agressives notamment le dioxyde de carbone, les eaux de pluies de neiges, les eaux souterraines, l'eau de mer, les acides, les bases ainsi que toutes les solutions résultant de la dissolution de sels ou de gaz. [30]



Chapitre III



III – 1 - INTRODUCTION :

L'appellation « **Béton Prêt à l'Emploi** » (**BPE**) est réservée au béton préparé en usine dans des installations fixes (centrales) et transporté jusqu'au lieu d'utilisation dans des camions malaxeurs (bétonnières portées), ou dans des camions bennes pour certains bétons fermes. Donc, le **BPE** est un béton qui, peut directement être utilisé sur le chantier, et peut posséder des caractéristiques bien spécifiques. [31]

III – 2 - L'origine et le développement du BPE :

Les premières centrales de BPE sont apparues au début du siècle aux États-Unis et en Allemagne, seulement en 1933 en France. Il fallut en fait attendre 1963 pour assister au début de l'essor du **BPE** en France (24 centrales), plus de dix ans après l'Allemagne et l'Angleterre dont l'expérience a été largement mise à profit. [31]

III - 3 --Définition de béton prêt a l'emploi :

Le « béton Prêt à L'emploi » appelé couramment « **BPE** » est un mélange de gravillons > 3-4 mm (ou 4/8 ; 8/15 ; 15-25 mm), de sable 0/3-4 mm, de ciment, d'additifs et d'eau. Les dosages de ces éléments sont déterminés en fonction du type de béton à produire.

La densité du béton **BPE** peut varier entre 2,1 et 2,4 t/m³ en fonction des types et classes de bétons. En générale, le **BPE** est un mélange à un dosage précis de ciment, de granulats (sable et gravier), d'eau et adjuvants, dont tous les composants sont dosés dans une installation fixe appelée centrale, puis malaxé pour être livrés aux clients utilisateurs avant début de prise, prêt à être mis en place sans autre traitement préalable. [32]

III – 4 - Fabrication du béton :

Le **BPE** est produit dans des centrales à béton fixes ou semi-mobiles quise composent de zones de stockage (trémies ou box à granulats et sables), d'équipements de pesage et de dosage (granulats, sable, ciment, additifs, eau), de silos à ciment, de tapis d'alimentation ou de skip élévateur, de malaxeurs destinés à mélanger les matières premières dans les proportions voulues et à charger le mélange, devenu du béton, dans les camions toupies. La plupart des installations de production de béton sont situées à proximité des lieux de consommation du béton dans la mesure où, compte tenu des temps de prise, le béton préparé en centrale doit être livré sur le lieu de mise en œuvre dans un délai maximum d'une heure et

demie. Le rayon d'action d'une centrale est généralement compris entre 20 et 30 km, en fonction des conditions de circulation de la zone. Le dosage de l'eau en particulier doit être très précis et le malaxage doit être continu et homogène.

-La durée normée de malaxage est de 35 secondes pour le **BPE** et de 55 secondes pour un béton **BPE** avec plus de deux adjuvants. [32]

-La fabrication industrielle du béton BPE pourrait se résumer en quelques étapes relativement simples :

A - La réception et le stockage :

Une centrale utilise généralement deux ou trois types de ciments stockés dans des silos de grande capacité. Les granulats (sables et gravillons) sont stockés par catégorie pour éviter tout mélange. Les adjuvants sont stockés en cuves pour un dosage précis. [31]

B - Le dosage :

C'est un poste clé, conçu pour une fabrication automatique à partir de compositions programmées du béton. Le dosage pondéral des granulats et du ciment atteint une précision de l'ordre de 2 à 3 %. Après détermination de la teneur en eau des granulats et des matières en suspension dans le cas d'utilisation d'eau de recyclage grâce à des sondes électro- niques, le dosage de l'eau d'appoint est effectué de manière également pondérale. [31]

C - Le malaxage :

Le malaxage des constituants dans des malaxeurs à poste fixe est une garantie de régularité des bétons. Les malaxeurs sont généralement à axe vertical, ce qui assure un brassage efficace des constituants ; la gâchée est déversée directement dans les camions de livraison. [33]

D - Le poste de commande :

Les centrales sont commandées depuis un poste qui est le cerveau de la fabrication, de façon :

-soit automatique (cas le plus général aujourd'hui) : l'opérateur sélectionne la composition programmée dans la mémoire de l'ordinateur et inscrit le volume à fabriquer ; les dosages et le

malaxage se font alors automatiquement ;

-soit semi-automatique : le dosage des constituants est affiché par l'opérateur ; le cycle de fabrication se déroule alors automatiquement. [31]

E - Le laboratoire et les contrôles :

❖ Le laboratoire :

Le laboratoire permet d'effectuer les essais sur les matières premières et sur les bétons à l'état frais ou durci. C'est la garantie du suivi des fabrications pour l'utilisateur ; les résultats des contrôles usuels peuvent être fournis aux clients. En outre, des contrôles supplémentaires, ou des essais pour une étude préalable de béton, peuvent être effectués à la demande. [31]



Figure 35: Centrale à béton semi-mobile avec malaxeur à double DKX 4.00
(Russie).

La fabrication du **BPE** est soumise aux conditions de la norme : **NF EN 206-1**

➤ Il existe trois types de produits dans cette norme :

- les Bétons à Propriétés Spécifiées (les plus courants) – **BPS**.
- les Bétons à Composition Prescrite – **BCP**.
- les Bétons à Composition Prescrite dans une norme – **BCPN**.

Les constituants des bétons doivent être conformes aux normes qui les concernent (**NF EN 12620** et **XP P 18-545** pour les granulats et sables ; **NF EN 1008** pour l'eau ; **NF EN 934-2** pour les adjuvants) et le ciment doit être certifié **CE + NF** (**NF EN 197-1**).

➤ Les **BPS** sont soumis aux conditions suivantes:

- La conformité à la norme **NF EN 206-1**.
- La classe d'exposition.
- La classe de résistance à la compression.
- La classe de chlorure spécifiant la teneur maximale en ions chlore rapportée à la masse de ciment
- La dimension maximale des granulats. [32]

III – 5 - Description de la chaîne de production :

La fabrication du béton est une opération destinée à donner à un ensemble de constituants regroupés entre eux, des propriétés adaptées à diverses exigences, propriétés qui peuvent être explicites (consistance, résistance mécanique ...) ou implicites parce que relevant des règles de l'art (compacité, homogénéité,...). [33]

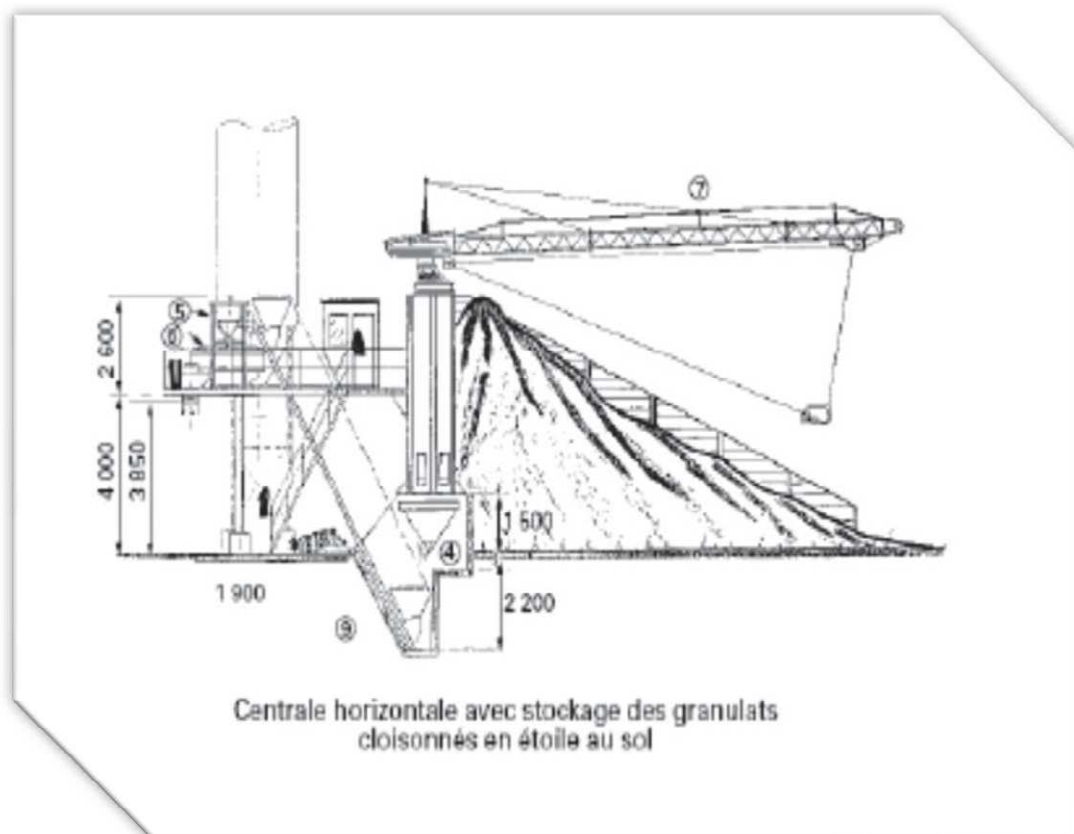


Figure 36: Centrale horizontale avec stockage des granulats cloisonnés en étoile au sol.

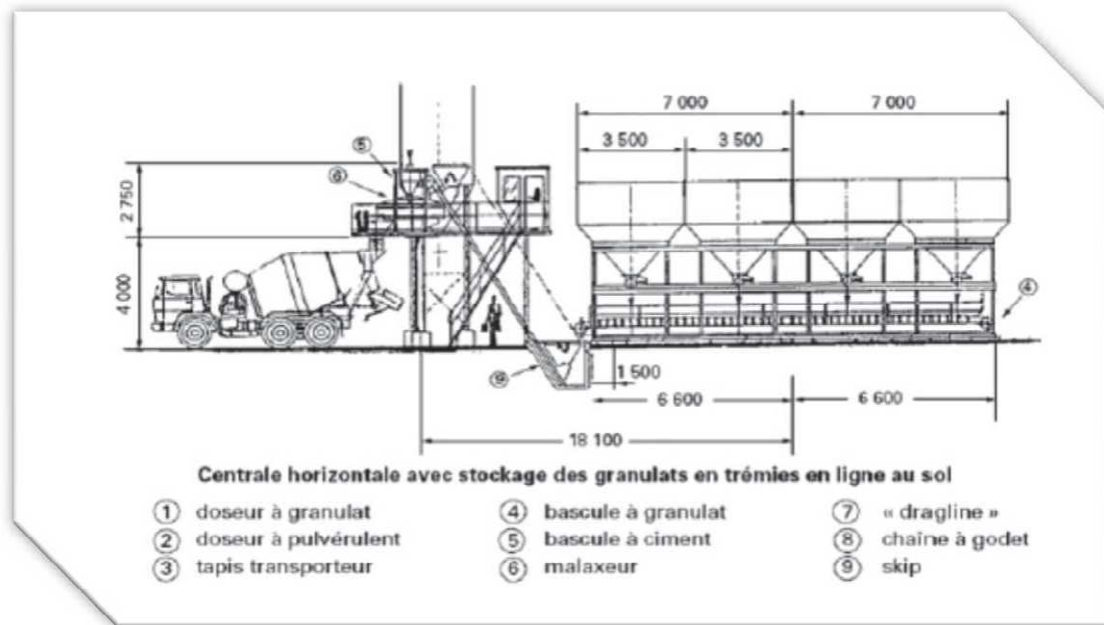


Figure 37 : Centrale horizontale avec stockage des granulats en trémies en ligne au sol.

➤ Les éléments constitutifs de la chaîne de fabrication des bétons sont:

✓ le **stockage**, il permet de conserver les propriétés des constituants et de mettre ces derniers dans les meilleures conditions pour satisfaire les opérations de dosage. Les constituants doivent être stockés et manipulés de façon à ce que leurs propriétés ne changent pas de façon significative, en raison du climat par exemple, ou de leur mélange ou encore d'une contamination, et de façon à ce que leur conformité à leur norme respective soit maintenue. Les compartiments de stockage doivent être clairement identifiés de façon à éviter des erreurs sur les constituants à utiliser. Les instructions particulières des fournisseurs de constituants doivent être prises en compte. Les moyens nécessaires au prélèvement d'échantillons représentatifs sur les tas, silos ou trémies doivent exister. [33]

✓ le **dosage**, il détermine les quantités de chacun des constituants pour que, conjointement, ils développent les caractéristiques attendues pour le béton ; la vidange des bascules doit être régulée en débit pour respecter les meilleures conditions de remplissage du malaxeur. Les performances de l'équipement de dosage doivent être telles que dans des conditions de fonctionnement réelles les précisions puissent être atteintes en permanence. Pour tout béton à réaliser, une procédure de dosage documentée doit être disponible sur les lieux du dosage détaillant le type et la quantité des constituants. Les ciments, granulats et additions sous la forme de poudres doivent être dosés en masse ; d'autres méthodes sont admises dans la mesure où la tolérance de dosage requise peut être respectée et que ceci est

enregistré. L'eau de gâchage, les adjuvants et les additions liquides peuvent être dosés en masse ou en volume. [33]

✓ le **malaxage**, il rapproche les constituants et les distribue dans le mélange conformément aux indications de la formule ; il n'agira bien entendu que sur ce qui est introduit dans le malaxeur et ne pourra pas corriger les effets d'un mauvais dosage (même si quelquefois il peut les atténuer) Les malaxeurs doivent être capables d'assurer un mélange homogène des constituants et une consistance homogène du béton pour un temps de malaxage et une capacité de malaxage donnés. Comme le montre la description des différentes fonctions, on constate que les trois opérations n'ont aucun caractère d'indépendance. Aussi le fonctionnement de chacun des matériels devra être commandé en référence au fonctionnement de l'équipement précédent et faire de telle sorte qu'il prépare le travail du matériel suivant.

La centrale à béton possède pour cela un automatisme qui aide le conducteur de la centrale. L'automatisme prend en compte les caractéristiques physiques des constituants (teneur en eau des granulats, teneur en fines de l'eau de récupération, etc.), commande les actionneurs (casque, tapis convoyeur, etc.), asservit les actions (dosage fins, dosage en eau efficace, etc.), vérifie les résultats atteints (respect des dosages, temps de malaxage, etc.) et surveille le fonctionnement des divers équipements. [33]

III - 6- Comportement des constituants au cours de la fabrication :

Si le fonctionnement des matériels a une forte influence sur la qualité du mélange, il en est de même du comportement des matériaux La régularité de production est liée à la régularité d'écoulement de tous les constituants et du béton. Les constituants n'ont pas tous la même aptitude à s'écouler. Sans viser obligatoirement l'état le plus favorable à l'écoulement, il faut rechercher sa constance quitte à équiper les matériels de moyens créant les conditions d'un bon écoulement lorsque cela est nécessaire. Deux objectifs doivent être recherchés en permanence pour permettre cette régularité d'écoulement. [33]

- Le premier est de mettre les constituants dans un état physique compatible avec un écoulement. C'est le rôle des moyens de stockage, les autres opérations de transfert, vers les doseurs puis vers le malaxeur, étant de durées suffisamment faibles pour que d'éventuelles variations ne soient pas observables si des dispositions particulières ne les provoquent pas. [33]

- Le second est d'équiper les matériels d'appareillage favorisant l'écoulement lorsque

celui-ci est difficile. Ces appareillages sont des vibreurs, des canons à air, des diviseurs de flux de matériaux ou encore des dispositifs d'extraction forcée. [33]

Exemple : les exemples qui suivent montrent les diverses origines possibles de modification de l'état ou de la constitution du mélange : [33]

- ✓ la modification de la teneur en eau des granulats lorsque les tapis convoyeurs ou les matériels de transfert ne sont pas protégés des pluies ou des quantités d'eau stagnant dans les récipients.
- ✓ la modification de la granularité d'un granulat (ségrégation par projection) lorsqu'un obstacle se trouve placé dans le flux de ce matériau.
- ✓ le freinage d'un matériau du fait d'une insuffisance de propreté d'une goulotte ou d'une paroi de trémie ou de l'encrassement d'un élément de translation (vis à ciment en particulier).
- ✓ l'apport brutal de fines lié à une accumulation en un point particulier de la chaîne.
- ✓ la hauteur de chute libre du béton trop importante.

III – 7 - L'approvisionnement, le stockage et le dosage des constituants :

Le choix des constituants qui vont être utilisés pour réaliser un béton déterminé repose sur deux exigences principales: l'une, d'ordre technique, dépend des caractéristiques visées (résistance, granulométrie, coloration, etc.) ; l'autre, d'ordre économique, tient compte en particulier de la proximité des fournisseurs par rapport au chantier, des coûts compétitifs... Approvisionnés par route, rail ou voie d'eau, les constituants du béton doivent faire l'objet d'un stockage compatible avec les besoins du chantier, en évitant aussi bien les ruptures de stock que les sur stockages. Les constituants utilisés doivent toujours être de qualité et conformes aux normes en vigueur. [33]

III – 7 – 1 - Le stockage du ciment :

Une fois qu'ont été choisis le ciment adapté à l'ouvrage à réaliser (CEM I, CEM II...), sa classe de résistance (32,5, 42,5) et éventuellement sa résistance à certains milieux : travaux à la mer, en eaux à haute teneur en sulfates , on veillera à son stockage soigné sur le chantier. Si plusieurs types de ciment sont nécessaires au chantier, leur stockage sera séparé pour éviter erreurs et mélange. Pour les grands chantiers, le ciment livré en vrac par camion-citerne est

stocké dans des silos verticaux de forme cylindrique d'une capacité supérieure ou égale à 100 tonnes. [33]

III – 7 – 2 - Le stockage des granulats :

Il convient d'éviter tout mélange entre des granulats de natures, d'origines ou de classes granulaires différentes. Pour éviter la pollution des granulats par de la terre ou des déchets, le stockage se fait sur une aire aménagée. La propreté des sables, notamment, est un facteur de qualité indispensable du béton. L'aire de réception des granulats doit permettre un écoulement correct des eaux. Celui-ci est souvent obtenu grâce à la réalisation d'une aire bétonnée, légèrement inclinée.

III – 7 – 3 - Le stockage des adjuvants :

Les adjuvants sont stockés en bidons ou en containers fermés, bien identifiés. Les précautions concernant le stockage par temps froid, ainsi que les dates limites d'emploi doivent être scrupuleusement respectées. [33]

III – 7 – 4 - Le dosage des constituants :

Le ciment est acheminé du silo à la trémie de dosage par des vis sans fin (vis d'Archimède) qui assurent un débit régulier et à l'abri de l'humidité ambiante. Le dosage pondéral (nettement préférable au dosage en volume) est soit mécanique, la trémie emplie de ciment, portée par un fléau analogue à une balance romaine déclenche l'arrêt de l'arrivée de ciment lorsque le poids requis est atteint, soit électronique le fléau classique est remplacé par un barreau dont la déformation est mesurée par une jauge de contrainte. En ce qui concerne les granulats, ils sont repris par skip ou dragline et acheminés jusqu'à la doseuse par bande ou tapis. Pour obtenir une composition de béton définie et constante, la teneur en eau des granulats doit être mesurée régulièrement. Le dosage en eau de gâchage sera effectué, déduction faite de l'apport d'eau contenue dans les granulats. L'eau est dosée par compteur volumétrique ou pompe doseuse. [33]

III – 7 – 5 - Le malaxage des constituants :

Le malaxage est une phase importante de la fabrication du béton, car il va conditionner la qualité de son homogénéité. Pour assurer la réussite de cette opération, il faut choisir un matériel adapté et déterminer un temps de malaxage suffisant. Le choix d'un malaxeur dépend de sa capacité de

production, de son aptitude à malaxer différents types de mélanges (secs, plastiques, etc.) pour donner des bétons réguliers. Ces appareils assurent une homogénéité du mélange supérieure à celle obtenue avec les bétonnières, grâce au déplacement relatif des composants à l'intérieur du mélange. Ce déplacement est provoqué par des trains de palettes ou de planétaires dont l'axe est excentré par rapport à celui de la cuve, qui est elle-même fixe ou tournante. La plupart des malaxeurs sont à axes verticaux. Le béton subit un puissant effet de brassage à la fois dans le sens vertical et dans le sens horizontal. Ce type de matériel est le mieux adapté à l'obtention de bétons homogènes. [33]

III – 7– 6 -Les paramètres du malaxage :

Une fois déterminé l'appareil adapté au béton à réaliser, le malaxage, pour être efficace, doit prendre en compte certains paramètres : l'ordre d'introduction des composants ; la vitesse de rotation de la cuve ; le temps de malaxage.

L'ordre d'introduction idéal est parfois difficile à réaliser du fait du remplissage discontinu de la cuve par skip ou chargeur, qui ne facilite pas une introduction simultanée et progressive des constituants. Avec un malaxeur, on considère comme préférable d'introduire les granulats puis le ciment, malaxer à sec et enfin introduire l'eau. Les adjuvants sont ajoutés soit préalablement dans une partie de l'eau de gâchage (cas des réducteurs d'eau-plastifiant) ou après l'ajout d'eau total pour les superplastifiants. La vitesse de rotation des appareils est de l'ordre de 20 à 30 tours/mn, et diminue avec le diamètre de la cuve. Le temps de malaxage est de l'ordre de 45 secondes. En revanche, les bétons très fermes ou riches en éléments fins. [33]

III – 7 – 7-Les services :

La livraison est faite par camions adaptés, pour des quantités correspondant strictement aux besoins. Des pompes ou des camions équipés de tapis permettent de faciliter la mise en place du béton. [33]

Type de camion	Volume	Caractéristiques	Distance de chargement	Pour quel usage ?	Image
Camion toupie	De 4 à 10 m ³	-Largeur : 2.5 m -Longueur : 10m -Hauteur : 4m -PTAC : de 26 à 32T	-De 0 à 3 m à l'aide de la goulotte de déchargement	Pour un chantier facile d'accès	
Camion tapis	De 4 à 7 m ³	-Largeur : 2.5m -Longueur : 10m -Hauteur : 4 m -PTAC : de 26 à 32T	-Horizontalement de 10 à 16m -Amplitude : jusqu'à 8 m de haut	Pour des zones où l'accès est difficile	
Camion pompe	Absence de cuve à béton	-Vérins de stabilisation de 4 à 8 m -Largeur : 2.5m -Longueur : 10m -Hauteur : 4m -PTAC : de 26 à 32T	-Horizontalement : de 12 à 48m -Verticalement : de 16 à 52 m	Pour des chantiers où l'accès est impossible par des moyens habituels	
Camion malaxeur (mixo - pompe ou pumi)	De 4 à 6 m ³	-Largeur : 2.5m -Longueur : 10m -Hauteur : 4m -PTAC : de 26 à 32T	-Horizontalement : de 12 à 20 m -Verticalement : De 16 à 24 m	Pour des chantiers à l'accès difficile	

Fig 38 : Camion toupie

Fig 39 : Camion tapis

Fig 40 : Camion pompe

Fig 41 : Camion malaxeur

Tableau 19 : les différents camions transportent le BPE.

III – 8 -L’usage de BPE

A - Dans le secteur routier :

Contrairement aux idées reçues, le béton a une importance fondamentale dans les Travaux Publics. Il offre des solutions viables, durables et écologiques.

Le béton coloré : De plus en plus souvent rencontré, il occupe une place fondamentale pour la délimitation des espaces de circulation. Cette coloration est obtenue en général par l'utilisation de pigments ou de résines colorées. On peut aussi utiliser la coloration de certains granulats pour modifier la couleur du béton mais la teinte obtenue est en générale moins vive. [34]

B - Dans les tunnels :

Qui n'en a pas déjà eu assez du changement vif de luminosité à la sortie d'un tunnel ? Et que dire de la consommation en électricité à cause du nombre de lampes nécessaires pour pouvoir éclairer convenablement les tunnels. [34]

Encore une fois, il existe des variantes en béton répondant à ces problèmes : les bétons polymères permettent, de par leur couleur claire, d'augmenter la luminosité et donc de réduire les dépenses sur le long terme en électricité. En plus d'allier confort visuel avec aspect environnementaux, ces bétons, confectionnés par un mélange de granulats de quartz, sont relativement résistants et supportent donc très bien le trafic des véhicules lourds. De plus, il y a très peu de risques que la chaussée se déforme avec ce type de béton. [34]

C-Pour la réalisation de dalles :

En général, pour tout ce qui concerne la réalisation de dalle ou de semelle, on utilise du béton armé. Son emploi est soumis à des normes assez strictes rédigées dans l'Eurocode 2 (EC2). Mais petit à petit, l'apparition d'un **BEP** beaucoup moins difficile à mettre en œuvre fait son apparition. Ce béton peut être composé au choix de 3 types de fibres : des fibres métalliques (acier, inox ou fonte), des fibres organiques (polyamide, carbone, etc...) ou bien de fibre minérales (verre, mica, etc...). Chaque type de fibre sera adapté à un usage particulier. Avec les fibres minérales, il sera par exemple possible de réaliser des éléments beaucoup plus fins. Bien que la mise en œuvre de ce béton soit bien plus simple et rapide, il ne faut pas oublier que le prix de ce béton est plus élevé que celui du béton armé . [34]

III – 9 - Les avantages du BPE :

Parmi les avantages apportés par la fabrication du béton en centrale **BPE** il faut souligner [31]

a) - Les avantages techniques :

En fonction des exigences du chantier, le **BPE** peut mettre au point et livrer les bétons les mieux adaptés, dont les caractéristiques font l'objet d'un suivi grâce à des contrôles de laboratoire, qui permettent de s'assurer également de la conformité des constituants. L'automatisation très poussée des centrales et la précision des dosages contribuent à la régularité et à la qualité des produits livrés.

b) - Les avantages sociaux :

Le **BPE** évite les manutentions pénibles nécessaires au chargement des bétonnières de chantier.

c) - Les avantages économiques :

Le **BPE** évite le gaspillage et l'immobilisation de stocks sur le chantier, réduisant les investissements en matériel et en hommes. Par la ponctualité des livraisons et grâce aux délais courts, la productivité des chantiers se trouve améliorée.

d) - La simplification de l'organisation du chantier :

Les manutentions de constituants sont supprimées ; les variations de cadences de bétonnage sont mieux absorbées grâce à la souplesse des livraisons du béton. L'emprise des chantiers sur la voirie est réduite.

III – 10 - Les inconvénients :

Est sa livraison ; le béton est un produit liquide qui doit être utilisé quand il est frais, car après 1h de brassage le béton commencer à se séparer, il est donc crucial que la livraison soit parfaitement orchestrée avec les préparatifs de chantier.



Partie pratique



❖ METHODOLOGIE ET OBJECTIF DU TRAVAIL PRATIQUE :

L'objectif de notre travail consiste à procéder un diagnostic général sur le contrôle du béton en amont par des éprouvettes normalisées (16/32), et on avale par prélèvement des carottes, ainsi que l'influence des **POLYCARBOXYLATES** sur les paramètres de **CND** et **CD**.

Et pour cela, dans cette partie ; nous exposons les différents étapes que nous avons suivis pour réaliser ce travail. Les calculs de formulation sont effectués selon les règles de l'art, et les essais sur béton à l'état frais et durci sont aussi réalisés selon les normes.

Donc ; on a réparti notre travaille à 4 parties :

En premier lieu, nous avons procédé à la caractérisation de toutes les matières utilisées à savoir :

- Le sable (**KADDARA** et **BOUSSAADA**).
- Les graviers (**SETIF**).
- Le ciment (**CEM II / A 42.5 MATINE de LAFARGE**).
- **SUPERPLASTIFIANT** /haut réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi et béton autoplaçant **TOMPO 445 (SIKA)**.

La deuxième partie du travail est consacrée à la formulation d'un **BT** et un **BPE**, selon la méthode de **DREUX GORISSE** ; et la caractérisation du béton à l'état frai et durci.

La troisième partie, présente la méthodologie de prélèvement des carottes, et la caractérisation des éprouvettes normalisées et ces carottes qui est effectué par 2 méthodes destructif (écrasement) et non destructif (scléromètre et ultrason), ainsi que l'influence de **POLYCARBOXYLATE** sur les paramètres de **CND** et **CD**.

Finalement, par une étude comparative entre le **CD** et le **CND**, puis on a terminé par la présentation et l'interprétation des résultats, une conclusion générale et des recommandations.

- I - CARACTERISATIONS DES MATIERES PREMIERES :

Dans cette partie nous exposons les différentes caractéristiques des constituants entrant dans la composition du béton ; car la connaissance de leurs caractéristiques est impérative à toute recherche, puisque chacune pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude.

I-1-CIMENT :

A- Les caractéristiques physiques du ciment :

Caractéristiques	Résultats	Unités
Consistance normale	27.6	%
Début de prise « Dp »	150	Min
Fin de prise « Fp »	245	Min
Masse spécifique	3.03	g/ cm ³
Expansion	0	Mm
Surface spécifique (SSB)	4458	cm ²

Tableau 20 : essais physiques du ciment « MATINE 42.5 R ».

✓ Remarque :

-La consistance normale de la pate de ciment (27.6%) obtenues est conforme à la norme ou les valeurs sont généralement comprises entre 25 et 28.5. De même, un temps de prise est prescrit par la norme pour les ciments de classe 42.5.

- La masse spécifique du ciment varie entre 2.9 et 3.2 g/cm³ critère qui est compatible à la valeur obtenue.

-la SSB varie de 4150-5250 g/cm³, critère qu'est vérifié pour l'échantillon analysé.

B- Les caractéristiques mécaniques du ciment :

Echéance en jours	Flexion (MPa)	Compression (MPa)
2 Jours	3.60	26.3
7 Jours	6.48	38..1
28 Jours	8.25	52.3

Tableau 21: essais mécaniques du ciment « MATINE 42.5 R ».

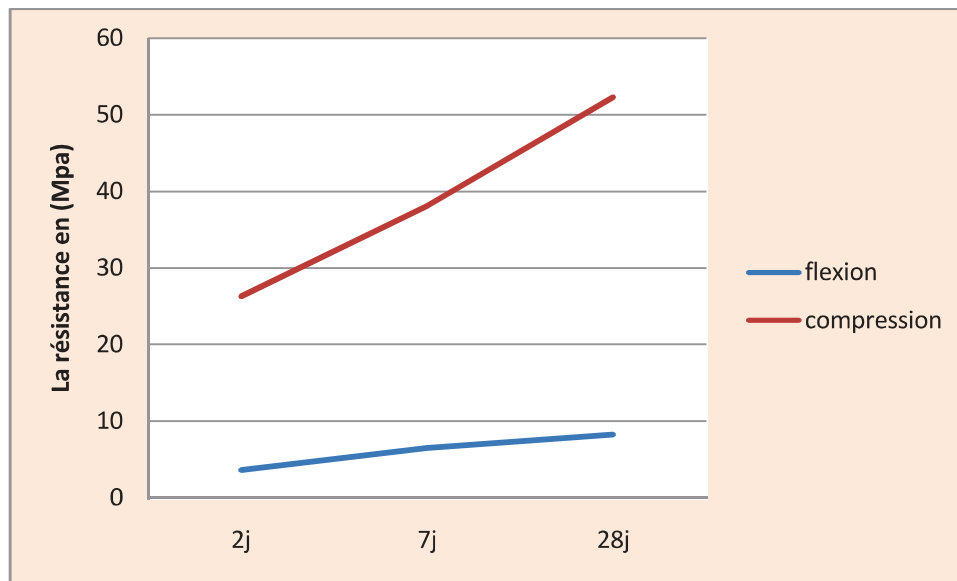


Figure 42: Essais de compression et flexion.

✓ **Remarque :**

Les résistances en compression et en flexion obtenues à **2, 7 et 28 jours** sont conformes aux exigences de la norme **NA 234**.

C- Les caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment:

Nous avons utilisé dans cette étude un ciment portland composé (**CEM II /B**) CPG « **MATINE** » de class **42.5 R** répond à la norme **NA 442, de LAFARGE** ; les détails de ces compositions chimique et minéralogique sont présentés dans les tableaux. Les analyses ont été réalisées au laboratoire de **CETIM**.

C-1- La composition chimique du ciment :

Tableau 22: Composition chimique du ciment (%) CPJ (MATINE 42.5 R).

Elément chimique	Teneur	Unité
SiO ₂	15.71	%
Al ₂ O ₃	4.15	%
Fe ₂ O ₃	2.52	%
CaO	60.71	%
MgO	2.39	%
K ₂ O	0.59	%
Na ₂ O	0.18	%
SO ₃	1.79	%
CaO libre	1.424	%
Cl ⁻	0.025	%
R Ins	2.82	%
PF	11.630	%

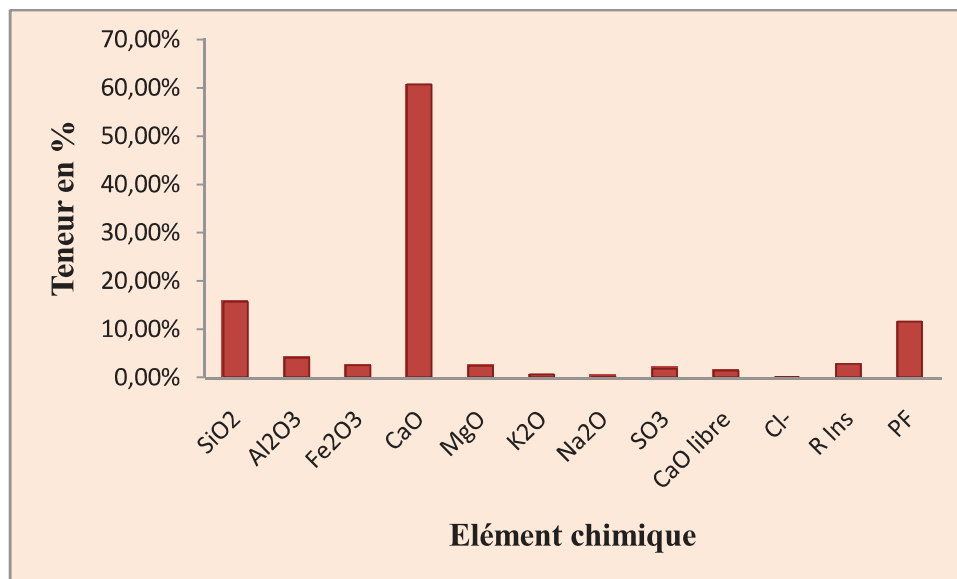


Figure 43 : La composition chimique du ciment (MATINE 42.5 R).

C-2- La composition minéralogique du ciment :

Tableau 23 : composition minéralogique du ciment (%) CPJ (MATINE 42.5 R).

Phase	Eléments	Teneur	Unité
Clinker	C_3S	55	%
	C_2S	21	%
	C_3A	7	%
	C_4AF	11	%
	CaO	01	%
Régulateur de prise	Gypse	05	%
Ajout	Calcaire (L)	24	%

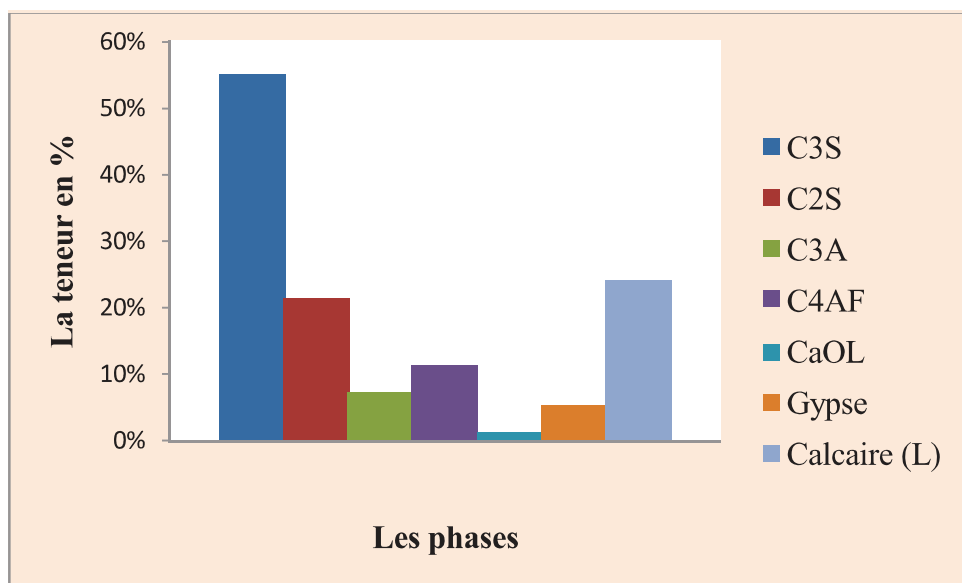


Figure 44: La composition minéralogique du ciment (MATINE 42.5 R).

❖ CONCLUSION :

Les résultats des essais montrent que le ciment est conforme aux exigences de sa classe, ce type de ciment est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

I-2- L'eau de gâchage :

Nous avons utilisé l'eau distribuée par le réseau du service public de la ville de **BOUMERDES**.

I-3- Les agrégats :

Les granulats utilisés proviennent de carrières de la région de **SETIF**, et **BOUSSAADA** et **KADDARA**. Ce choix est dicté par le fait que ce sont les granulats disponibles. Ces granulats concassés sont commercialisés en tant que classes granulaires : sable **KADDARA**, **BOUSSAADA** et gravillons de classes **3/8, 8/16, 16/25**.

I-3-1- LE SABLE :

Les sables que nous avons utilisés sont :

A- Sable concassé grossier de **KADDARA** (S_1).

B- Sable concassé fin de **BOUSSAADA** (S_2).

-3-1-1- Caractéristiques physiques des sables :

A- Sable de **KADDARA** (S_1) :

Caractéristiques		Résultats				Unités
Humidité		0.40				%
Absorption		2.78				%
Masse volumique réelle		1.42				g/cm ³
Masse volumique imbibé		1.46				g/cm ³
Equivalent de sable	Essais	H 1 (V) mm	H 2 (P) mm	E.S	MOY	%
	I	118	85	72.03	71.98	
	II	114	82	71.92		
Bleu de méthylène		0.45				g/cm ³
Pois spécifique		2.6				g/cm ³

Tableau 24 : Caractéristiques physiques de sable de KADDARA

✓ **Remarque :**

D'après le tableau :

L'équivalent de sable selon la norme **NF EN 933 – 8** le sable de **KADDARA** est de **71.98 %**, donc est un sable propre.

-3-1-2-Analyse granulométrique de sables NF EN 933 - 1:

sable de KADDARA.			
-Masse sèche après lavage : $M_2 = 468$ g.			
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus Cumulés R_i (g)	Pourcentage refus Cumulés (%)	Pourcentage tamisats Cumulés (%)
5	0	0	100
4	33	6.6	93.4
3.15	108	21.7	78.3
2.5	189	38	62
2	233	46.8	53.2
1.25	317	63.7	36.3
1	341	68.5	31.5
0.63	387	77.7	22.3
0.5	402	80.7	19.3
0.315	425	85.3	14.7
0.25	433	86.9	13.1
0.125	454	91.1	8.9
0.08	463	93	7
0.063	466	93.6	6.4
Fond de tamis :	468	93.8	6.2
-Module de finesse du sable : $M_f = 3.8$.			

Tableau 25: Analyse granulométrique du sable de **KADDARA**.

✓ **Remarque:**

L'analyse granulométrie montre que le module de finesse du sable « S_1 » (**KADDARA**) est : **3.8** ; qui nécessite une correction à cause de sa grosseur, pour la correction on utilise un sable fin « S_2 » (**BOUSSAADA**).

B- Sable de BOUSAADA :

Caractéristiques		Résultats				Unités
Humidité		1.83				%
Absorption		0.21				%
Masse volumique réelle		1.45				g/cm ³
Masse volumique imbibé		1.46				g/cm ³
Equivalent de sable	Essais	H 1 (V) mm	H 2 (P) mm	E.S	MOY	%
	I	153	92	60.13	56.91	
	II	149	80	53.69		
Bleu de méthylène		2.08				g/cm ³
Pois spécifique		2.5				g/cm ³

Tableau 26: Caractéristiques physiques du sable de **BOUSAADA**.✓ **REMARQUE :**

D'après le tableau :

-L'équivalent de sable est **56.91 %**, selon la norme **NF EN 933 – 8** le sable de **KADDARA** est propre

B- Sable de BOUSAADA :

sable de Boussaâda			
-Masse de la prise d'essai : $M_0 = 481$ g.			
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus Cumulés Ri (g)	Pourcentage refus Cumulés (%)	Pourcentage tamisats Cumulés (%)
5	0	0	100
4	0	0	100
3.15	0	0	100
2.5	0	0	100
2	0	0	100
1.25	1	0.2	99.8
1	1	0.2	99.8
0.63	1	0.2	99.8
0.5	3	0.6	99.4
0.315	38	7.7	92.3
0.25	88	17.9	82.1
0.125	430	87.9	12.4
0.08	475	96.7	3.3
0.063	481	98	2
Fond de tamis :	481	98	2
-Module de finesse du sable : $Mf = 1.1$			

Tableau 27 : Analyse granulométrique du sable de BOUSAADA.

✓ **Remarque :**

Le sable de **BOUSSAADA** a un module de finesse : **1.1** ; est un sable fin, qui en peut l'utiliser comme un sable correcteur.

- Le **Mf** préconisé pour les bétons de qualité se situe :

$$2.2 < Mf < 2.8$$

➤ **Correction du module de finesse selon la règle d'ABRAMS :**

- Sable grossier **S1** de module de finesse **$Mf_1 = 3.8$** .
- Sable fin **S2** de module de finesse **$Mf_2 = 1.1$** .

A fin d'obtenir un mélange dont le module de finesse avoisine **Mf = 2.5**.

- Les proportions des sables comparant devant être :

Proportion de sable : $S1 = \frac{Mf - Mf_2}{Mf_1 - Mf_2} = \frac{2.5 - 1.1}{3.8 - 1.1} = 52\%$.

Proportion de sable : $S2 = \frac{Mf_1 - Mf}{Mf_1 - Mf_2} = \frac{3.8 - 2.5}{3.8 - 1.1} = 48\%$.

C - Sable corrige :

Tamis ouverture (mm)	Refus cumulé (%)			Tamisats du mélange (%)
	Sable KADDARA (52%)	Sable BOUSSAADA (48%)	Sable corrige	
5	0	0	0	100
4	3.4	0	3.4	96.6
3.15	11.3	0	11.3	88.7
2.5	19.8	0	19.8	80.2
2	24.3	0	24.3	75.7
1.25	33.1	0.1	33.2	66.8
1	35.6	0.1	35.7	64.3
0.63	40.4	0.1	40.5	59.5
0.5	42	0.3	42.3	57.7
0.315	44.4	3.7	48.1	51.9
0.25	45.2	8.6	53.8	46.2
0.125	47.4	42	89.4	10.6
0.08	48.4	46.4	94.8	5.2
0.063	48.7	47	95.7	4.3
Fond de tamis :	48.8	47	95.8	4.2
-Module de finesse du sable : Mf = 2.5				

Tableau 28 : Analyse granulométrique du sable corrigé.

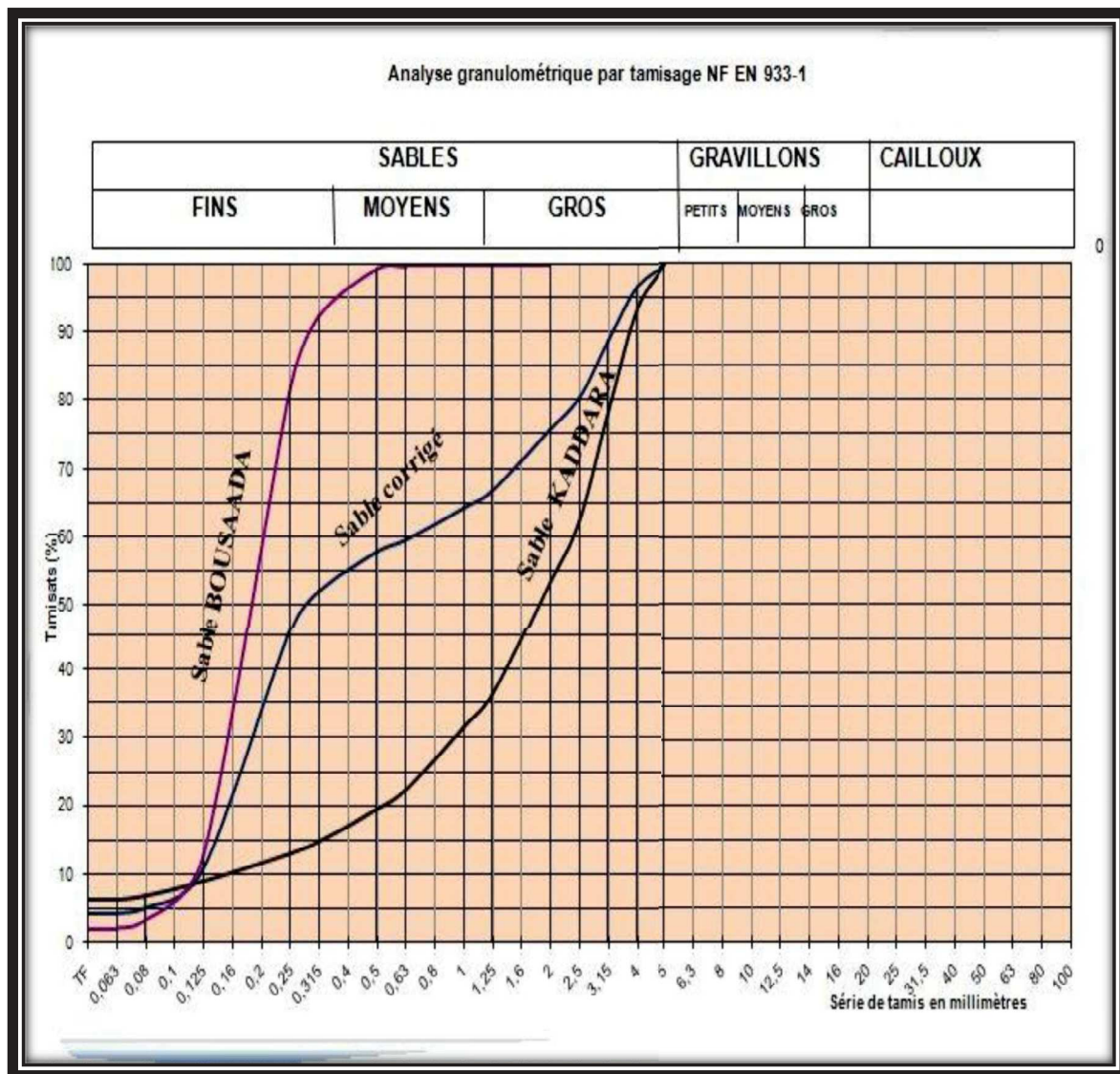


Figure 45 : Courbe d'analyse granulométrique des du sable corrigé.

❖ Conclusion :

L'analyse granulométrique ainsi que le calcul du module de finesse : **2.5**, et l'équivalent de sable montrent que le sable possède des caractéristiques lui permettant d'être utilisé pour la fabrication de béton **témoin** et **BPE**.

I-3-2-Les graviers :

Les graviers qui nous avons utilisés sont : **G1, G2, G3** du carrier du **SETIF**.

Après l'analyse de 3 graviers on a obtenu les résultats suivant :

3-2-1- Caractéristiques physiques des graviers :**➤ G 3/8 :**

caractéristiques	Résultats	Unités
Humidité	1.42	%
Absorption	0.06	%
Masse volumique réelle	2.65	g/cm ³
Masse volumique imbibé	2.65	g/cm ³
Porosité	1.68×10^{-3}	%
Pois spécifique	2.7	g/cm ³
Los Angeles (4 ; 6.3)	24.28	%
Micro deval	11.8	%

Tableau 29: Caractéristiques physiques de **G 3/8**.

4-2-2- Analyse granulométrique des graviers NF EN 933 - 1:

➤ G3/8 :

Gravier 3 / 8.			
-Masse de la prise d'essai : $M_0 = 970$ g.			
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus Cumulés Ri (g)	Pourcentage refus Cumulés (%)	Pourcentage tamisats Cumulés (%)
12.5	0	0	100
10	3	0.3	99.7
8	7	0.7	99.3
6.3	58	5.9	94.1
5	237	24	76
4	487	49.4	50.6
3.15	672	68.2	31.8
2.5	863	87.5	12.5
2	911	92.4	7.6
1.25	947	96	4
1	952	96.6	3.4
0.063	970	98.4	1.6
Fond de tamis :	970	98.4	1.6

Tableau 30: Analyse granulométrique du G 3/8.

➤ G 8/16 :

caractéristiques	Résultats	unités
Humidité	0.33	%
Absorption	0.34	%
Masse volumique réelle	2.69	g/cm^3
Masse volumique imbibé	2.70	g/cm^3
Porosité	3.64×10^{-3}	%
Pois spécifique	2.7	g/cm^3
Los Angeles (4 ; 6.3)	30	%
Micro deval	12	%

Tableau 31: Caractéristiques physiques de G 8/16.

➤ G8/16 :

Gravier 8 / 15.			
-Masse de la prise d'essai : $M_0 = 2960$ g.			
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus Cumulés Ri (g)	Pourcentage refus Cumulés (%)	Pourcentage tamisats Cumulés (%)
20	0	0	100
16	566	18.9	81.1
12.5	1622	54.2	45.8
10	2367	79.2	20.8
8	2739	91.6	8.4
6.3	2941	98.4	1.6
5	2954	98.8	1.2
4	2955	98.8	1.2
0.063	2960	99	1
Fond de tamis :	2960	99	1

Tableau 32 : Analyse granulométrique du G 8/16.

➤ G16/25 :

caractéristiques	Résultats	unités
Humidité	0.34	%
absorption	0.40	%
Masse volumique réelle	2.66	g/cm^3
Masse volumique imbibé	2.67	g/cm^3
Porosité	0.01	%
Pois spécifique	2.7	g/cm^3
Los Angeles (4 ; 6.3)	30	%
Micro deval	12	%

Tableau 33 : Caractéristiques physiques de G 16/25.

➤ G16/25 :

Gravier 16/ 25			
-Masse de la prise d'essai : $M_0 = 4970$ g.			
Tamais ouverture (mm)	Masse des refus Cumulés Ri (g)	Pourcentage refus Cumulés (%)	Pourcentage tamisats Cumulés (%)
31.5	0	0	100
25	1374	27.6	72.4
20	4061	81.5	18.5
16	4913	98.6	1.4
12.5	4955	99.4	0.6
10	4962	99.6	0.4
0.063	4970	99.7	0.3
Fond de tamis :	4970	99.7	0.3

Tableau 34 : Analyse granulométrique du G 16/25.

4 – 2 – 3-Le coefficient d'aplatissement NF EN 933 - 3:

➤ G 3/8 :

Gravier 3 / 8.				
-Masse de la prise d'essai $M_0 = 986$ g.				
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grilles à fentes		
Granulat élémentaire di/Di (mm)	Masse (Ri) du granulat élémentaire di/Di (g)	Ecartement nominal des fentes de la grille (mm)	Passant sur une grille à fente (mi) (g)	$A_i = \frac{mi}{Ri \times 100}$
10 / 12.5	3	6.3	0	0
8 / 10	4	5	0	0
6.3 / 8	51	4	4	7.84
5 / 6.3	179	3.15	17	9.50
4 / 5	250	2.5	35	14
3.15 / 4	185			
2.5 / 3.15	191			
2 / 2.5	48			
1.25 / 2	36			
1 / 1.25	5			
$M_1 = \sum Ri =$	952	$M_2 = \sum mi =$	56	
Fond de tamis :	18g			
$A = (M_2 / M_1) \times 100 = 5.88$				

Tableau 35: Coefficient d'aplatissement du G 3/8.

➤ G 8/16 :

Gravier 8 / 16				
-Masse de la prise d'essai $M_0 = 2990$ g.				
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grilles à fentes		
Granulat élémentaire d_i/D_i (mm)	Masse (R_i) du granulat élémentaire d_i/D_i (g)	Ecartement nominal des fentes de la grille (mm)	Passant sur une grille à fente (m_i) (g)	$A_i = \frac{m_i}{R_i \times 100}$
20 / 25	0	12.5	0	0
16 / 20	566	10	26	4.59
12.5 / 16	1056	8	55	5.21
10 / 12.5	745	6.3	46	6.17
8 / 10	372	5	16	4.30
6.3 / 8	202	4	4	1.98
5 / 6.3	13	3.15	0	0
4 / 5	1	2.5	0	0
$M_1 = \sum R_i =$	2955	$M_2 = \sum m_i =$	147	
Fond de tamis :	6g			
$A = (M_2 / M_1) \times 100 = 5$				

Tableau 36: Coefficient d'aplatissement du G 8/16.

➤ G 16/20 :

Gravier 16 / 25				
-Masse de la prise d'essai M ₀ = 4983 g.				
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grilles à fentes		
Granulat élémentaire di/Di (mm)	Masse (Ri) du granulat élémentaire di/Di (g)	Ecartement nominal des fentes de la grille (mm)	Passant sur une grille à fente (mi) (g)	Ai = $\frac{mi}{Ri \times 100}$
31.5 / 40	0	20	0	0
25 / 31.5	0	16	0	0
20 / 25	1374	12.5	120	8.73
16 / 20	2687	10	177	6.59
12.5 / 16	852	8	75	8.80
10 / 12.5	42	6.3	9	21.43
M ₁ = ∑ Ri =	4955	M ₂ = ∑ mi =	381	
Fond de tamis :	15g			
A = (M ₂ / M ₁) × 100 = 8				

Tableau 37: Coefficient d'aplatissement du G 16/20.

➤ Conclusion :

Les essais réalisés, sur les granulats, ont présenté de bonnes propriétés physiques, physico- chimiques et mécaniques, qui répondent en général, aux spécifications exigées par la norme **P 18-541**. Pour notre étude, ces granulats ont été utilisés en tant que tel, nous n'avons pratiqué aucun traitement (lavage) pour formuler des bétons préconisés par l'Organisme National Algérien de Contrôle Technique de la Construction (**CTC**). L'utilisation donc de ces 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. Il est toutefois raisonnable d'ajouter que, bien que les différentes propriétés des granulats puissent être examinées, il est difficile de définir la qualité des granulats autrement qu'en le comparant à celle des bétons confectionnés avec eux. Un granulat dont les propriétés paraissent satisfaisantes produira toujours un bon béton ; l'inverse n'est pas nécessairement vrai et c'est pourquoi nous devons utiliser un critère de performance du béton. Cependant, les granulats considérés comme mauvais sous plus d'un aspect ne sont pas souhaitables pour la confection d'un béton de qualité. Ceci dit, les essais sur les granulats sont d'une aide précieuse lors de leur sélection pour la fabrication des bétons.

I-5- Les adjuvants :

L'adjuvant utilisé est un **SIKA VISCOCRETE TEMPO 544 Superplastifiant /Haut réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi et béton autoplacant.**

Conforme à la norme NF EN 9346-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2. (Voir annexe A)

II-FORMULATION D'UN BETON TEMOIN ET UN BPE SELON LA METHODE DE « DREUX GORISSE » :

Cette partie est consacrée à la formulation d'un **BT** et un **BPE**, selon la méthode de « **DREUX GORISSE** » ; basée sur l'analyse granulométrique sable et différentes fractions de graviers.

II- 1-Formulation d'un béton TEMOIN :

➤ **Données de bases :**

- ✓ Résistance minimale de béton $R_{28j} = 30$ MPa.
- ✓ Le ciment utilisé est de classe de 42.5 R, et de résistance à $28j = 51.3$ MPa.
- ✓ Coefficient de compacité $G = 0.5$.
- ✓ Affaissement rechercher $Af = 9$ cm.
- ✓ $D_{max} = 25$ mm.
- ✓ Mf corrigé : 2.5.
- ✓ Granulats concassés.

➤ **Méthodologie :**

➤ **Dosage de ciment :**

$$R_{28j} = R_n + 15\% R_n.$$

$$R_{28j} = 30 + 15\% \times 30 = 34.5 \text{ MPa.}$$

$$R_c = G \times R_{28j} \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right).$$

$$C/E = \frac{R_{28j}}{(G \times R_c)} + 0.5 = \frac{34.5}{(0.5 \times 51.3)} + 0.5.$$

$$C/E = 1.8$$

D'après le rapport $C/E = 1.8$ et l'affaissement souhaité au cône d'Abrams $Af = 9$ cm, on détermine la quantité pratique sur le graphe $C/E = f(Ac)$. On trouve que le dosage en ciment est :

$$C = 375 \text{ Kg/ m}^3$$

➤ **Dosage en eau :**

On a le rapport $C/E = 1.8$, et le dosage en ciment $C = 375 \text{ Kg/ m}^3$, donc le dosage en eau sera égal :

$$E = \frac{375}{1.8} = 206 \text{ l/m}^3.$$

Il n'y a pas de correction.

1- Trace de la courbe granulaire de référence :

Sur le graphe des granulats, on trace une courbe granulaire de référence, qui passe par 3 points **O**, **A**, **B**.

- Le point « **O** » : à une ordonnée égale à 0% et une abscisse égale à la dimension « **d** » du petit granulat.

$$\text{Point « O » : } \begin{cases} x = 0.063 \text{ mm.} \\ y = 0 \text{ \%.} \end{cases}$$

- Le point « **B** » : à une ordonnée égale à 100% et une abscisse égale à la dimension « **Dmax** » du gros granulat.

➤

$$\text{Point « B »: } \begin{cases} x = D_{\max} = 25 \text{ mm.} \\ y = 100\text{ \%.} \end{cases}$$

- Le point « **A** » : à des coordonnées ainsi définies :

✓ en abscisse « **X** » :

On a : $D_{max} \leq 25 \text{ mm}$.

$$X = \frac{D_{max}}{2} = \frac{25}{2} = 12.5 \text{ mm}.$$

✓ en ordonnée « **Y** » :

$$Y = 50 - \sqrt{D_{max}} + K + K_S + K_P.$$

Avec :

K : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité de la vibration et de la forme des granulats (roulés ou concassés). Dans notre cas :

$$K = 0.$$

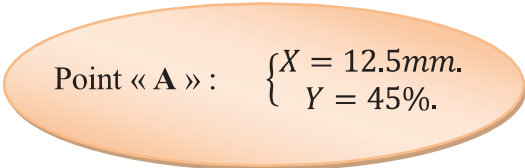
K_P = correction supplémentaire, si la qualité du béton est précisée pompable. Dans notre cas :

$$K_P \simeq 0.$$

K_S : correction supplémentaire ; **K_S = 6 × Mf -15** ; (**Mf** est le module de finesse du sable corrigé = 2.5).

$$K_S = 6 \times 2.5 - 15 = 0.$$

$$\text{Donc : } Y = 50 - \sqrt{25} = 45$$



$$\text{Point « A » : } \begin{cases} X = 12.5 \text{ mm.} \\ Y = 45\%. \end{cases}$$

2- Pourcentages des granulats dans le béton :

La courbe granulaire de référence **OAB** doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composant (2 sables, graviers **(3/8, 8/16 et 16/25)**). Nous traçons les lignes de partages entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point 5% de la courbe du second granulat et ainsi de suite. L'intersection de la courbe de référence avec les lignes de partages donne les différents pourcentages des granulats (figure).

❖ Les résultats graphiques obtenus sont :

Sable corrigé.....28%.
Gravier 3/8.....11%.
Gravier 8/16.....29%.
Gravier 16/25.....32%.

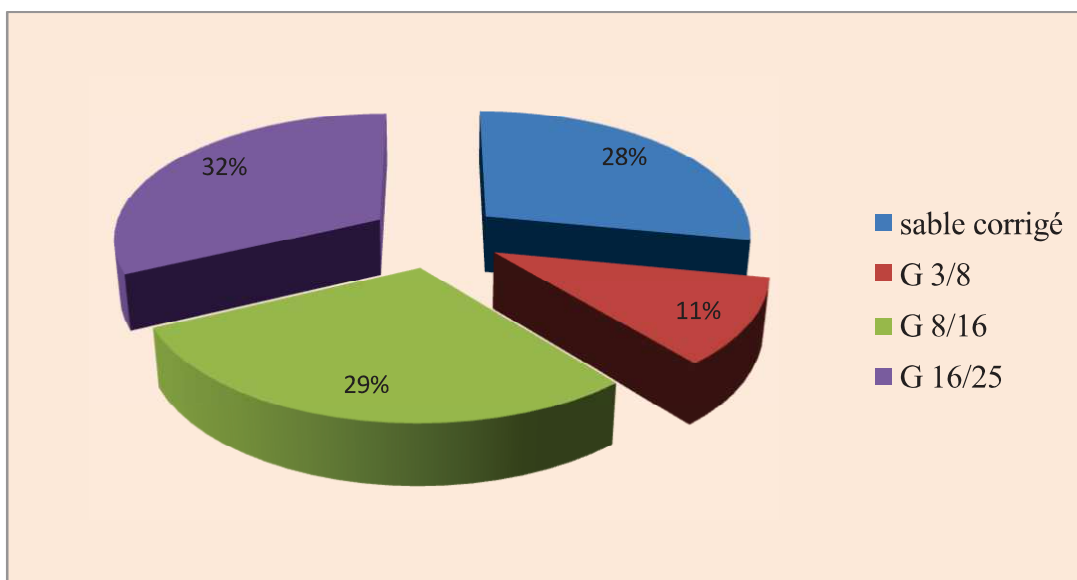


Figure 46: Pourcentage des constituants de la formulation d'un BT.

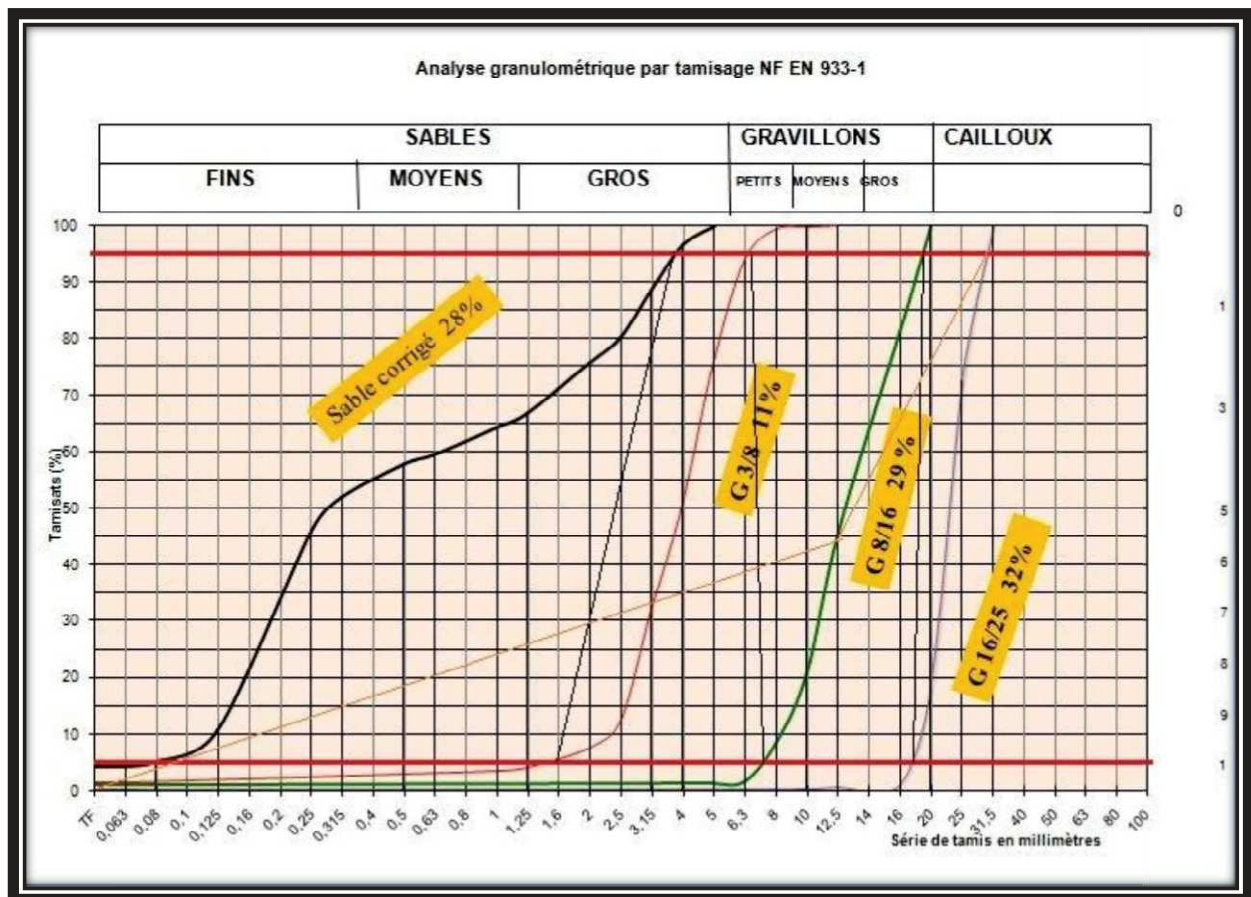


Figure 47: Courbe d'analyse granulométrique des différents granulats - BT

3-Détermination du dosage des granulats pour 1 m³ de béton :

- Volume absolu du ciment :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_c} \Leftrightarrow V_c = \frac{M}{\rho_{abs}} = \frac{375}{3.03} = 123.76 \text{ L}$$

- Volume absolu des granulats :

$$V_g = 1000 \gamma - V_c = 1000 \times 0.795 - 123.76 = 671.24 \text{ L}$$

Avec : γ coefficient de compacité donné par le tableau de l'Annexe, qui est fonction du diamètre du plus gros granulat (**D_{max}**), de la consistance et de la puissance de la vibration. Dans notre cas, on adopte pour le coefficient de compacité (**D_{max}** = 25 mm, béton plastique, vibration normale) la valeur $\gamma = 0.825 - 0.03 = 0.795$.

- **Volume de sable corrigé :**

$$V_s = V_g \times \% \text{ de sable} = 671.24 \times 28\% = 187.9 \text{ L}$$

- **Volume absolu de chaque granulat :**

Pour trouver le volume de chaque granulat il faut multiplier le volume total des granulats et le pourcentage de chaque granulat.

- Volume absolu du sable de **KADDARA** = $187.9 \times 52\% = 97.7 \text{ L}$.
- Volume absolu du sable de **BOUSSAADA** = $187.9 \times 48\% = 90.2 \text{ L}$.
- Volume absolu du gravier **3/8** = $671.24 \times 11\% = 73.8 \text{ L}$.
- Volume absolu du gravier **8/16** = $671.24 \times 29\% = 194.7 \text{ L}$.
- Volume absolu du gravier **16/25** = $671.24 \times 32\% = 214.8 \text{ L}$.

✓ **Dosage en matériaux secs :**

- Ciment = 375 Kg.
- Eau = 206 L
- Sable du kaddara = $2.6 \times 97.7 = 254 \text{ Kg}$
- Sable du boussaada = $2.5 \times 90.2 = 226 \text{ Kg}$
- Gravier 3/8 = $2.7 \times 73.8 = 199 \text{ Kg}$
- Gravier 8/16 = $2.7 \times 194.7 = 526 \text{ Kg}$
- Gravier 16/25 = $2.7 \times 214.8 = 580 \text{ Kg}$

D'où l'on obtient : $\Delta_0 = 2366 \text{ Kg/ m}^3$, qui représente la masse volumique théorique du béton frais.

$$\Delta = \frac{C+G+E}{1000} = \frac{2366}{1000} = 2.36 \text{ est la densité réelle du béton frais.}$$

❖ Composition du mélange du BT :

PRODUITS	QTES EN « Kg »
Ciment	375
Eau	198.75
Sable KADDARA	254
Sable BOUSSAADA	226
Gravier 3/8	199
Gravier 8/16	526
Gravier 16/20	580

Tableau 38: La composition du mélange de BT.

II- 2-Formulation d'un BPE :

➤ Données de bases :

- Résistance minimale de béton $R_{28j} = 30$ MPa.
- Le ciment utilisé est de classe de 42.5 R, et de résistance à $28j = 51.3$ MPa.
- Coefficient de compacité $G = 0.5$.
- Affaissement rechercher $Af = 9$ cm.
- $D_{max} = 25$ mm.

➤ Méthodologie :

On a suit les mêmes étapes sauf la quantité d'eau puisque on ajouté un adjuvant haute réducteur d'eau

➤ Dosage en eau :

On a ajouté l'eau jusqu'à $Af = 9$ cm ; Donc la quantité versé est : **190 L**

La quantité d'eau restée est : **16 L**

➤ Dosage en adjuvant :

On a utilisé 1% d'adjuvant ; et $C = 375$ Kg

$E/C = 0.50$; Donc : le dosage en adjuvant est : 3.75 Kg.

Donc :

$$Y = 50 - \sqrt{25} + 9 = 54$$

Point « A » : $\begin{cases} X = 12.5mm. \\ Y = 54 \%. \end{cases}$

Les résultats graphiques obtenus sont :

Sable corrigé.....35%.

Gravier 3/8.....13%.

Gravier 8/16.....26%.

Gravier 16/25.....26%.

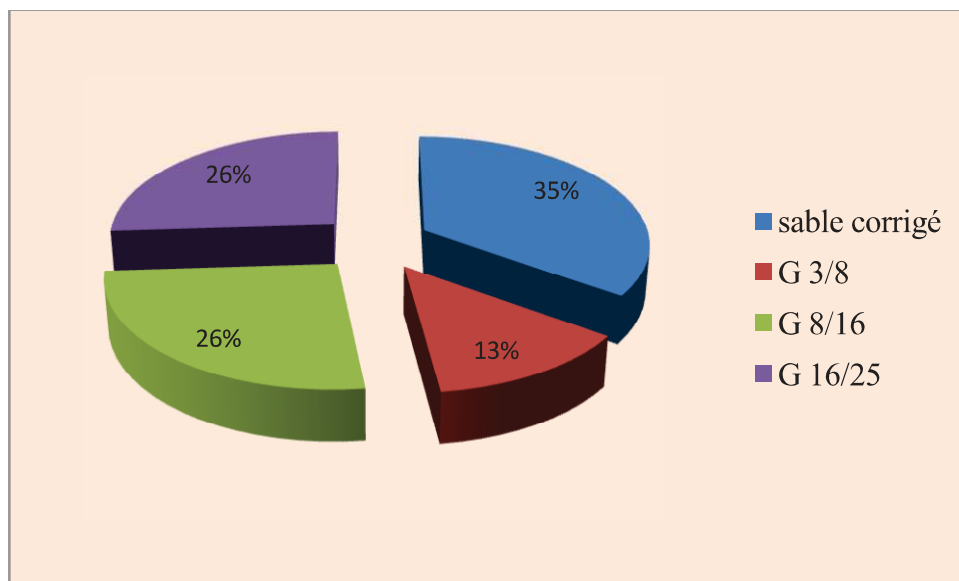


Figure 48 : Pourcentage des constituants de la formulation d'un BPE.

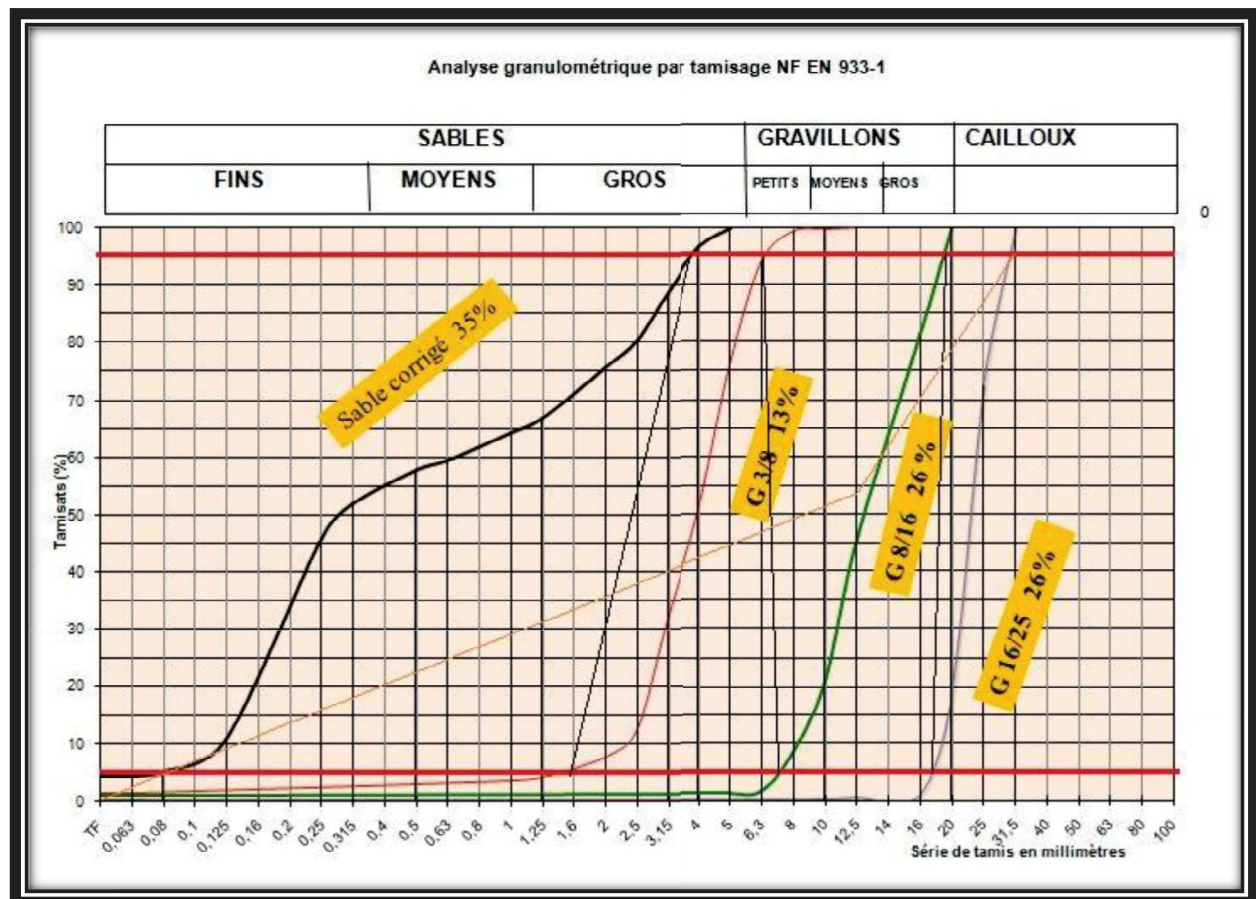


Figure 49 : Courbe d'analyse granulométrique des différents granulats - BPE

1-Détermination du dosage des granulats pour 1m³ de béton :

➤ Volume absolu du ciment :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_c} \Leftrightarrow V_c = \frac{M}{\rho_{abs}} = \frac{375}{3.03} = 123.76 \text{ L}$$

➤ Volume absolu des granulats :

$$V_g = 1000 \gamma - V_c = 1000 \times 0.795 - 123.76 = 671.24 \text{ L}$$

Avec : γ coefficient de compacité donné par le tableau de l'Annexe, qui est fonction du diamètre du plus gros granulat (**Dmax**), de la consistance et de la puissance de la vibration.

Dans notre cas, on adopte pour le coefficient de compacité ($D_{\max} = 25$ mm, béton plastique, vibration normale) la valeur $\gamma = 0.825 - 0.03 = 0.795$.

➤ **Volume de sable corrigé :**

$$V_s = V_g \times \% \text{ de sable} = 671.24 \times 35\% = 234.93 \text{ L}$$

➤ **Volume absolu de chaque granulat :**

Pour trouver le volume de chaque granulat il faut multiplier le volume total des granulats et le pourcentage de chaque granulat.

- Volume absolu du sable de **KADDARA** = $234.93 \times 52\% = 122.16 \text{ L}$
- Volume absolu du sable de **BOUSSAADA** = $234.93 \times 48\% = 112.77 \text{ L}$
- Volume absolu du gravier 3/8 = $671.24 \times 13\% = 87.26 \text{ L}$
- Volume absolu du gravier 8/16 = $671.24 \times 26\% = 174.52 \text{ L}$
- Volume absolu du gravier 16/25 = $671.24 \times 26\% = 174.52 \text{ L}$

➤ **Dosage en matériaux secs :**

- Ciment = 375 Kg.
- Eau = 190 L.
- Adjuvant = 3.75 Kg.
- Sable du **KADDARA** = $2.6 \times 122.16 = 317.62 \text{ Kg}$.
- Sable du **BOUSSAADA** = $2.5 \times 112.77 = 281.93 \text{ Kg}$.
- Gravier 3/8 = $2.7 \times 87.26 = 236 \text{ Kg}$.
- Gravier 8/16 = $2.7 \times 174.52 = 471 \text{ Kg}$.
- Gravier 16/25 = $2.7 \times 174.52 = 471 \text{ Kg}$.

D'où l'on obtient : $\Delta_0 = 2346.3 \text{ Kg/ m}^3$, qui représente la masse volumique théorique du béton frais.

$$\Delta = \frac{C+G+E}{1000} = \frac{2346.3}{1000} = 2.35 \text{ est la densité réelle du béton frais.}$$

❖ COMPOSITION DU MELANGE DU BPE :

PROUDUITS	QTES EN « Kg »
Ciment	375
Eau	190
Sable KADDARA	317.62
Sable BOUSSAADA	281.93
Gravier 3/8	236
Gravier 8/16	471
Gravier 16/20	471
Adjuvant	3.75

Tableau 38: la composition du mélange de BPE.

II -3 -Caractérisation du béton à l'état frai :

A- Affaissement au cône d'ABRAMS :

L'essai est effectué selon la norme NF EN 12350-2 ; le tableau si dessous représente l'affaissement de 2 formulations :

BT	BPE
9.5 cm	10 cm

Tableau 39: L'affaissement au cône d'ABRAMS du BT et BPE.

✓ **Remarque :** donc notre béton est plastique.



Figure 50 : Affaissement au cône D'ABRAMS.

II – 4- Caractérisation du béton à l'état durci :

A-Propriétés physico-chimiques du béton :

Types du béton	masse volumique (Kg/ m ³)
BT	2347.740
BPE	2427.68

Tableau 40 : La masse volumique du béton à 28 jours.

✓ Remarque :

D'après les résultats, la masse volumique du **BPE** est supérieure de **3.29%** par rapport au **BT**, et cela est traduit par l'existence du vide et dans le béton témoin (non adjuvanté).

III- METHODOLOGIE DE PRELEVEMENT DES CAROTTES ET LA CARACTERISATION DES EPROUVETTES NORMALISEES ET CES CAROTTES PAR CD ET CND :

Cette partie est basée sur le côté expérimental comprenant des essais non destructifs ; (scléromètre, ultrason) sur site et des essais destructifs (mécaniques) sur des éprouvettes coulées au même moment que les 4 planchers ainsi que sur des carottes prélevées sur ces planchers.

Il est important de signaler que les essais sont réalisés suivant les normes européennes respectives :

EN -12504-2 scléromètre.

EN – 12504-4 / NA 5027.....ultrason.

EN- 12504-1 :Carottes - prélèvements, examens des essais en compression.

EN - 206-1.....Essais mécaniques sur éprouvettes et carottes et suivant les instructions des fabricants des différents équipements d'essais.

III -1-La méthodologie de prélèvement des carottes pour BT et BPE :

- Repérer la zone dans laquelle doit se faire le sondage.
- Implanter le point de sondage.
- Choisir le diamètre du carottier.
- Fixer la colonne au support Perçage du support.
- mise en place d'une goupille dans le trou préalablement réalisé.
- vissage d'une tige filetée dans la goupille.
- positionnement de la colonne sur la tige filetée.
- serrage au boulon.
- Accrocher la carotteuse à la colonne.
- Relier la bombonne d'eau à la carotteuse.
- Mettre sous pression l'eau.
- Ouvrir l'arrivée d'eau.
- Démarrer la machine.
- Carotter à la vitesse préconisée.



Figure 51 : Essai de carottage.

III -2 -La caractérisation des éprouvettes normalisée et les carottes:

Après avoir rectifié les carottes pour obtenir préférentiellement un élancement de 2 (c'est que $H = 2 D$), il est possible de procéder à des essais de résistance à la compression avec une presse adéquate.



Figure 52: Rectification des carottes.

III - Les méthodes destructives et non destructives :**III – 1- Les méthodes non destructives :****A - Essai ultrason :****➤ Mode opératoire :**

- Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera fixé,
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériaux d'interposition comme la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol. (Dans notre cas c'était de la graisse).
- la manière de mesure de nos éprouvettes est la mesure en transparence (directe).

**Figure 53 : Essai ultrason.**

- Estimation de la résistance du béton selon RILEM :

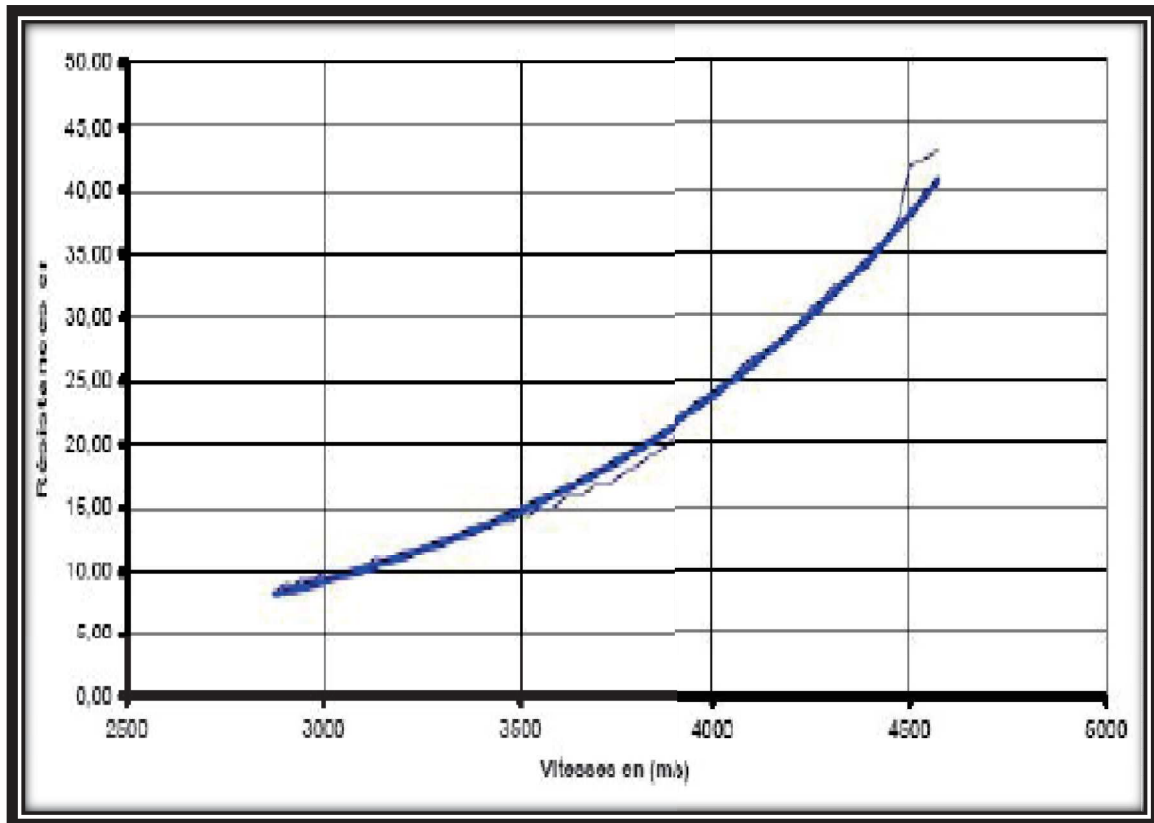


Figure 54 : Courbe RILEM.

➤ Pour les éprouvettes normalisées :

Eprouvettes		T(μ s)	V (m/s)	Rc (v) (MPa)
BT	EP ₁	68.4	4678	38.46
	EP ₂	68.9	4644	38.18
	EP ₃	68.8	4651	38.24
La moyenne			4658	38.29
BPE	EP ₁	64.5	4961	40.79
	EP ₂	64.8	4938	40.60
	EP ₃	64.6	4953	40.72
La moyenne			4951	40.70

Tableau 41: Résultats de l'essai d'ultrason- Eprouvettes (16/32).

✓ Remarque :

La vitesse ultrasonique du BPE est supérieure de 5.92% par rapport au BT.

➤ Pour les carottes (65/130) :

Nombre	BT			BPE		
	T(μ s)	V (m/s)	Rc (v) (MPa)	T(μ s)	V (m/s)	Rc (v) (MPa)
1	33.68	3860	27.25	29.89	4349	30.70
2	33.94	3830	27.04	30.57	4253	30.02
3	33.42	3890	27.46	30.62	4246	29.97
4	33.16	3920	27.67	33.09	3929	27.73
5	34.30	3790	26.75	31.59	4115	29.05
6	33.59	3870	27.32	32.70	3976	28.07
7	33.42	3890	27.46	31.65	4108	28.99
8	34.85	3730	26.33	30.76	4226	29.83
9	34.39	3780	26.68	32.61	3987	30
10	34.39	3780	26.68	31.87	4079	28.79
MOY	33.91	3834	27.06	31.54	4126.8	29.32

Tableau 42 : Résultats de l'essai d'ultrason- Carottes (65/130).

✓ Remarque :

Vitesse du son en m/s	Appréciation de la qualité
> 4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	médiocre

Dans notre cas les vitesses ultrasoniques sont entre 3500 et 4500 m/s : donc la qualité de notre béton est bonne.

-La vitesse ultrasonique du **BPE** est supérieure de **7.09%** par rapport de **BT**.

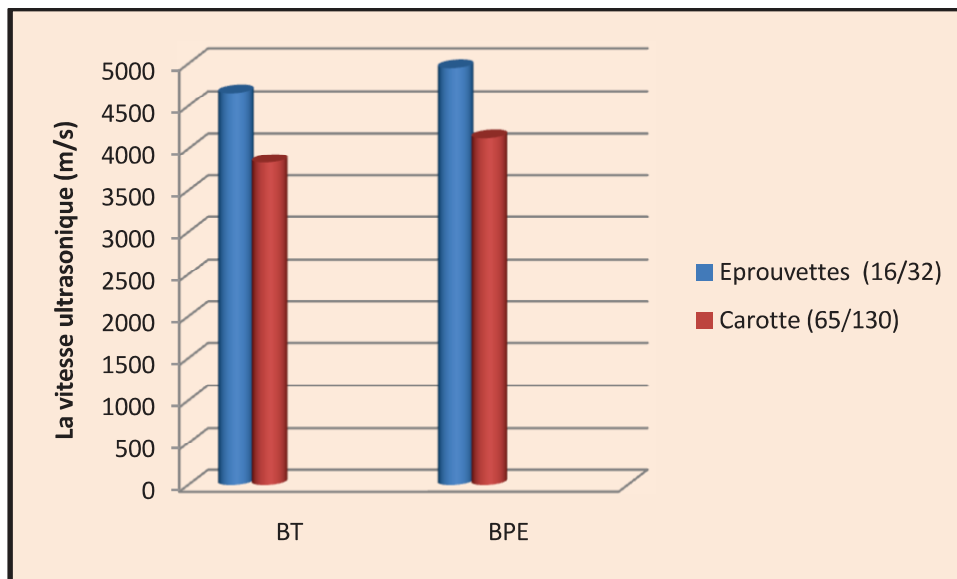


Figure 55 : Comparaison entre le **BT** et **BPE** selon la vitesse ultrasonique (m/s).

B -ESSAI SCLEROMETRE :

➤ **MODE OPERATOIRE :**

- **Préparation de la surface :**

Les mesures doivent être effectuées sur des surfaces nettes ne présentant pas des nids de gravier, des écaillages, une texture grossière, une porosité élevée.

La préparation de la surface consiste à éliminer tout enduit ou peinture adhérent ou poncer si cette surface est constituée d'une couche superficielle friable. Toute trace d'eau sur la surface doit être essuyée.

-Placer la sonde à l'endroit de la mesure,

-L'essai s'effectue avec l'appareil placé en position perpendiculaire à une surface lisse.

-Amener la tige au contact du béton et presser l'appareil dans le sens de l'effort exercé.

-Mesurer le rebondissement de la masselotte en observant la nouvelle position prise par l'index devant l'échelle graduée.

-Effectuer au moins 10 mesures successives dans la même zone. La surface de cette zone est équivalente à celle d'un carré d'environ 25 cm de côté. Au cours de ces mesures, il convient de ne pas effectuer l'essai à moins de 3 à 4 cm des bords de l'élément testé.

Les éprouvettes doivent être maintenues entre les plateaux de la presse sous une contrainte de 0.5 MPa. Les mesures au scléromètre ne peuvent être effectuées qu'après 48h de la sortie des éprouvettes de leur ambiance de conservation.

Il est à noter que pour notre cas l'orientation du scléromètre était perpendiculaire à l'éprouvette $\alpha = 0^\circ$

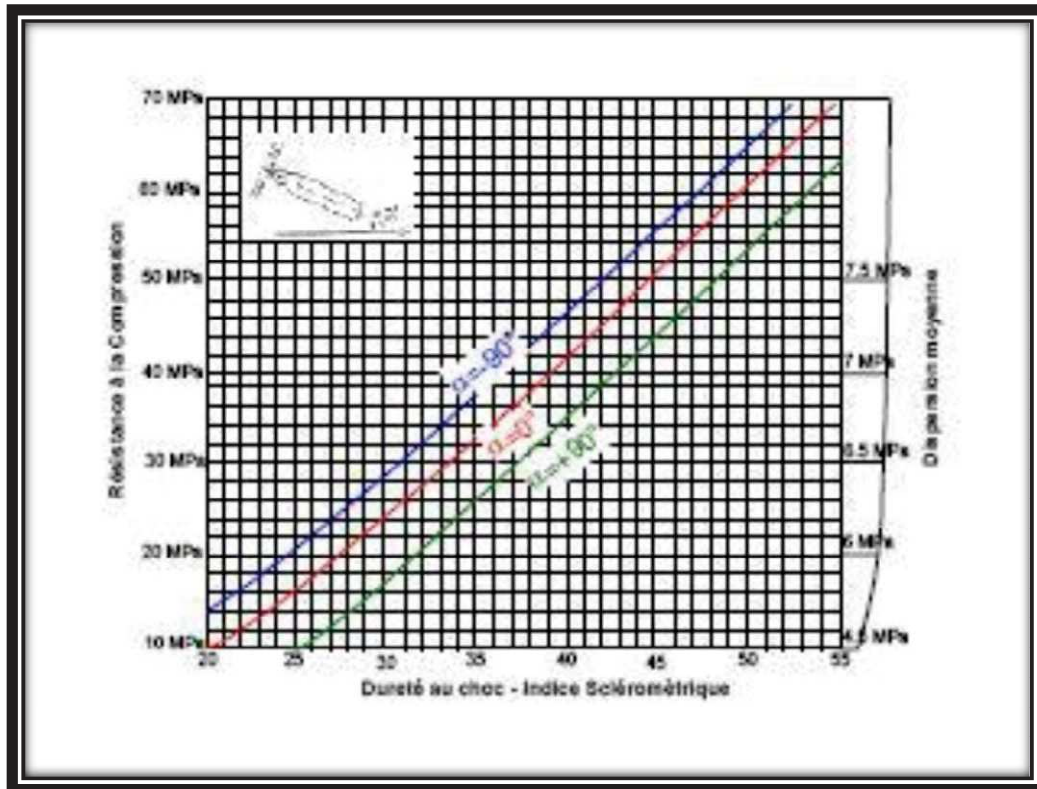


Figure 56 : Resistance à la compression en fonction de la dureté au choc.



Figure 57: Essai scléromètre.

✓ POUR LES EPROUVETTES NORMALISEES :

BT						BPE					
EP1		EP2		EP3		EP1		EP2		EP3	
I	Rc(i)	I	Rc(i)	I	Rc(i)	I	Rc(i)	I	Rc(i)	I	Rc(i)
35	26	36	28	35	26	38	32	36	28	42	40
37	30	37	30	35	26	36	28	43	42	36	28
36	28	36	28	37	30	37	30	39	34	37	30
36	28	38	32	37	30	38	32	41	38	36	28
36	28	37	30	36	28	38	32	40	36	36	28
35	26	36	28	36	28	40	36	38	32	41	38
38	32	36	28	37	30	35	26	40	36	38	32
37	30	36	28	38	32	39	34	36	28	37	30
38	32	36	28	38	32	40	36	38	32	40	36
37	30	35	26	35	26	38	32	37	30	38	32
Moy	29	Moy	28.6	Moy	28.8	Moy	31.8	Moy	33.6	Moy	32.2
Moy du la R en (MPa)	28.8					32.53					

Tableau 43: Résultats de l'essai scléromètre – Eprouvettes (16/32).

✓ Remarque :

L'indice de rebondissement du **BPE** est supérieur de **11.46%** de celle de **BT**.

✓ Pour les carottes (65/130) :

Nombre	BT		BPE	
	I (indice)	Rc (i) (MPa)	I (indice)	Rc (i) (MPa)
1	26	13	30	19
2	25	12	28	16
3	27	14	28	16
4	28	16	22	9
5	24	11	26	13
6	26	13	24	11
7	27	14	25	12
8	22	9	28	16
9	24	11	22	9
10	23	10	25	12
MOY	25.2	12.3	25.8	13.3

Tableau 44 : Résultats de l'essai scléromètre – Carottes (65/130).

✓ Remarque :

L'indice de rebondissement du **BPE** est supérieur de **2.33 %** de celle de **BT**.

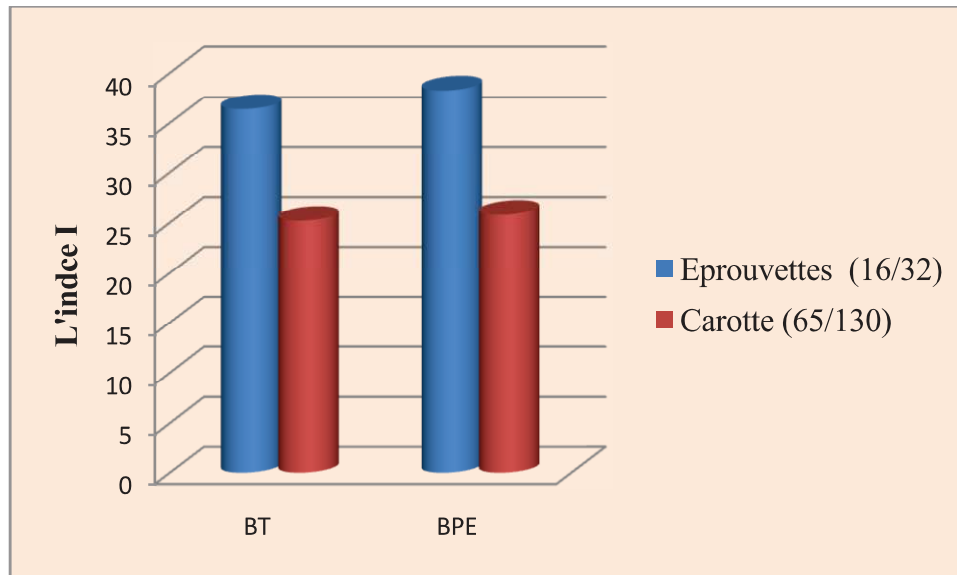


Figure 58 : comparaison entre le **BT** et **BPE** selon l'indice sclérométrique.

C- Essais de compression sur les éprouvettes normalisées et les carottes et exploitation des résultats :

La résistance maximale en compression **R_c** (MPa) est l'une des propriétés les plus importantes du béton. L'évaluation de la résistance à la compression est réalisée sur un béton de 28 jours par un test de compression uni-axial. Les éprouvettes cylindriques et les carottes sont alors préparées pour passer dans la presse pour être écrasées.

➤ Mode opératoire :

- Faire le surfaçage au mortier de soufre.
- Positionnement des éprouvettes sur la machine d'essai.
- Les plateaux de la machine d'essai doivent être nettoyés.
- L'éprouvette est placée sur la machine d'essai avec une erreur de positionnement inférieure à 1 % de son diamètre.
- La vitesse de montée en charge est comprise entre 0,4 et 0,8 MPa /s.

- La régularité de montée en charge est considérée comme satisfaite, pour les commandes manuelles ou automatiques, si dans l'intervalle de 10 à 90 % de la charge de rupture, la vitesse respecte la tolérance de 10 % de la valeur visée.
- La résistance obtenue doit être enregistrée.



Figure 59: Essai de compression.

✓ Pour les éprouvettes normalisées :

Rc	BT			BPE		
	EP 1	EP 2	EP 3	EP 1	EP 2	EP 3
Rc (MPa)	31.5	30.42	31.65	36.53	35.72	37.18
Moy	31.19			36.48		

Tableau 45 : Résultats de l'essai Compression – Eprouvtes (16/32).

✓ Remarque :

La résistance à la compression du **BPE** est supérieure de **14.50 %** de celle de **BT**.

✓ Pour les carottes :

	BT	BPE
Nombre	Rc (MPa)	Rc (MPa)
1	13	19.8
2	12.5	14.8
3	14.6	13.9
4	15.8	8.1
5	12.7	16.3
6	13.5	12.9
7	9.2	15.7
8	9.6	17.6
9	16.5	11.8
10	12.5	15.9
MOY	12.99	14.68

Tableau 46: Résultats de l'essai Compression – Carottes (65/130).

✓ Remarque :

La résistance à la compression du **BPE** est supérieure de **11.51 %** par rapport de **BT**.

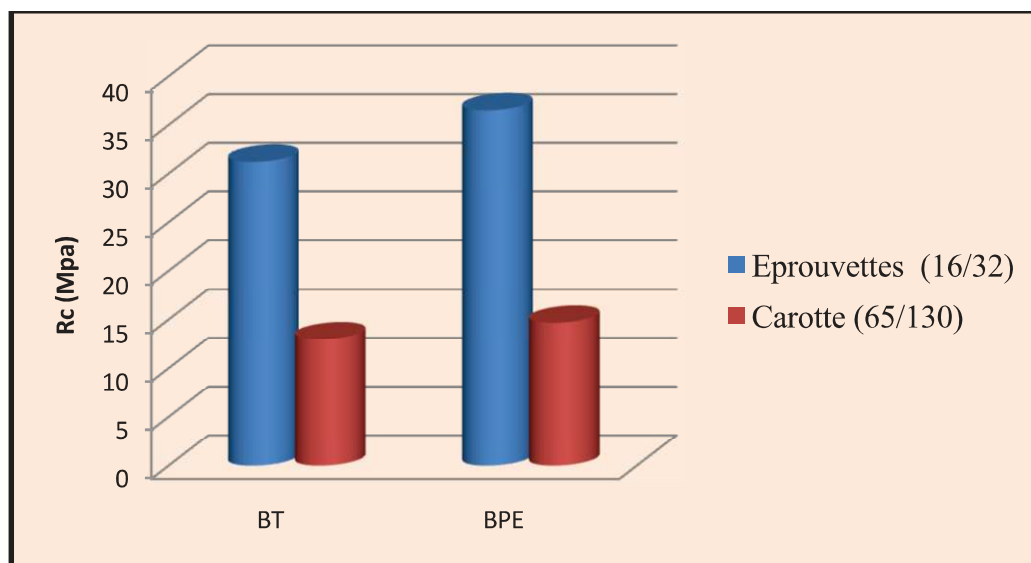


Figure 60: Comparaison entre le **BT** et **BPE** selon la résistance à la compression (MPa).

III – 1 -L'INFLUENCE DE POLYCARBOXYLATE SUR LES PARAMETRES DE CND ET CD :

III- 1-1 -Essais CND :

A - Essai Scléromètre :

✓ Pour le BT :

	Rc(i) (16/32)	Rc(i) (65/130)	Rapport
EP 01	29	12.3	0.42
EP 02	28.6		0.43
EP 03	28.8		0.42

Tableau 47: Rapport entre la Rc (I) des carottes (65/130) et les éprouvettes (16/32)

✓ Pour le BPE :

	Rc(i) (16/32)	Rc(i) (65/130)	Rapport
EP 01	31.8	13.3	0.41
EP 02	33.6		0.39
EP 03	32.2		0.41

Tableau 48: Rapport entre la Rc (I) des carottes (65/130) et les éprouvettes (16/32)

✓ Remarque :

D'après le tableau on a remarqué que les rapports sont proches c-a-d : l'utilisation de **POLYCARBOXYLATE** n'influe pas sur le rapport sclérométrique entre les carottes (65/130) et les éprouvettes (16/130).

B - Essai ultrason :

✓ Pour le BT :

	Rc(v) (16/32)	Rc(v) (65/130)	Rapport
EP 01	38.46	27.06	0.70
EP 02	38.18		0.71
EP 03	38.24		0.71

Tableau 49 : Rapport entre la Rc (v) des carottes (65/130) et les éprouvettes (16/32)

✓ Pour le BPE :

	Rc (v) (16/32)	Rc (v) (65/130)	Rapport
EP 01	40.79	29.32	0.72
EP 02	40.60		0.72
EP 03	40.72		0.72

Tableau 50: Rapport entre la Rc (v) des carottes (65/130) et les éprouvettes (16/32)

✓ Remarque :

D'après le tableau on a remarqué que les rapports sont proches, donc ; l'utilisation de **POLYCARBOXYLATE** n'influe pas sur le rapport ultrasonore entre les carottes (65/130) et les éprouvettes (16/130).

III- 1- 2 -Essais CD :**A - Essai de compression :**

✓ Pour BT :

	Rc (16/32)	Rc (65/130)	Rapport
EP 01	31.5	12.99	0.41
EP 02	30.42		0.41
EP 03	31.65		0.43

Tableau 51: Rapport entre la Rc des carottes (65/130) et éprouvettes (16/32)

✓ Pour BPE :

	Rc (16/32)	Rc (65/130)	Rapport
EP 01	36.53	14.68	0.40
EP 02	35.72		0.41
EP 03	37.18		0.39

Tableau 52: Rapport entre la Rc des carottes (65/130) et les éprouvettes (16/32)

✓ Remarque :

Les rapports sont proches, donc l'utilisation de **POLYCARBOXYLATE** n'influe pas sur le rapport de résistance à la compression entre les carottes (65/130) et les éprouvettes (16/130).

III- 2-Tableau récapitulatif et comparatif :

Ce tableau résume tous les résultats obtenus par le **CD** et le **CND**, pour le **BT** et **BPE**.

		Rc (I)	Rc (v)	Rc
BT	Eprouvettes (16/32)	28.8	38.29	31.79
	Carotte (65/130)	12.3	27.06	12.99
BPE	Eprouvettes (16/32)	32.58	40.7	36.48
	Carotte (65/130)	13.3	29.32	14.68

Tableau 53: Récapitulatif.

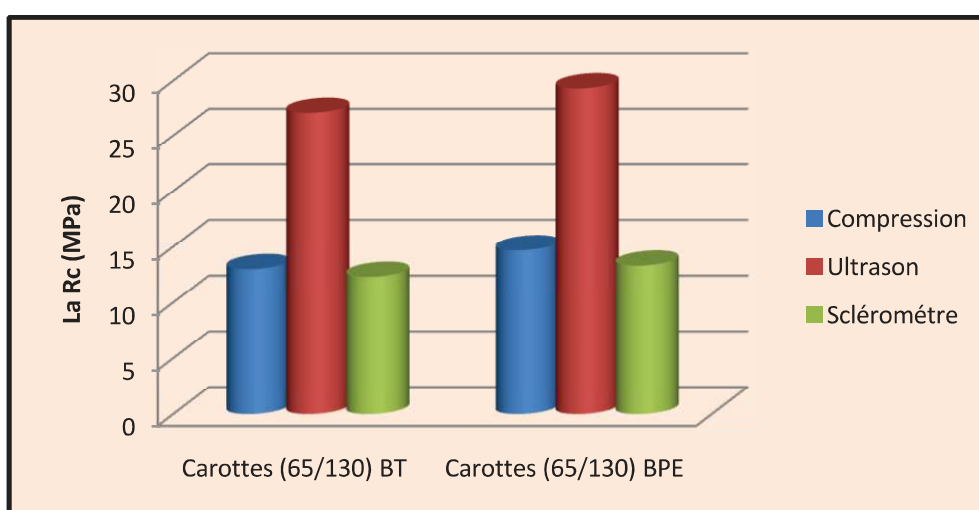


Figure 61: Comparaison entre le **CD** et **CND** – Carottes (65/130) -BT

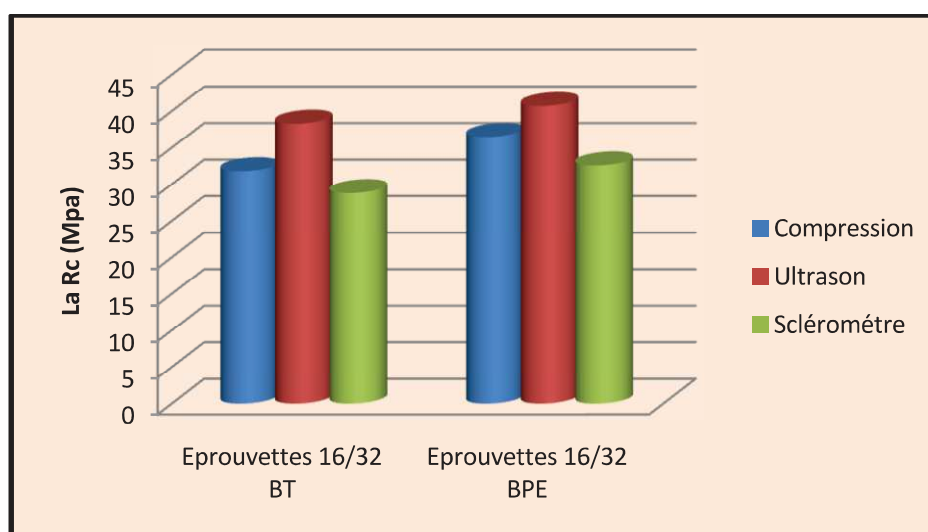


Figure 62: Comparaison entre le **CD** et **CND** – Eprouvettes (16/32) -BPE

III- Interprétation des résultats :

Ce tableau résume tous les résultats obtenus pour le **CD** et **CND**, et celui là pour un **BT** et **BPE**.

Ce que' on peut remarque c'est que :

Pour les carottes **(65/130)** la résistance calculée par l'indice sclérométrique est plus proche à celle trouvé par compression, par contre une grande bifurcation entre la résistance calculer par l'ultrason et celle de la compression, pour les 2 bétons témoin et prêt à l'emploi; ce là est expliqué par les considérations suivantes :

- 1- Le contrôle par scléromètre basé sur le rebondissement des éprouvettes fixées donc il ne dépende pas de la forme.
- 2- La résistance calculé par ultrason basé essentiellement sur le temps de parcours qui fortement influencer par les dimensions, et par les formules de calcule qui sont données en fonction des paramètres expérimentales et déférents approches soit logarithmiques, exponentiel ou polynomial.

Ce qui concerne les éprouvettes **(16/32)** la résistance donné par l'ultrason est plus proche que celle de compression, pour les 2 bétons témoin et prêt à l'emploi et cela est expliqué par la précision de corrélation de **RILEM** utilisé dans notre travail.

D'après les tableaux **(47, 48, 49, 50,51, 52)**, l'utilisation des **POLYCARBOXYLATES** n'influe pas sur les paramètres de **CD** et **CND** entre les carottes **(65/130)** et les éprouvettes **(16/32)**.



Conclusion générale



Conclusion générale

Nous avons essayé dans ce travail de comprendre pourquoi et comment les méthodes non destructives (scléromètre et l'ultrason) peuvent être utilisées afin d'évaluer la résistance à la compression du béton sur site.

- Les lieux de prélèvement des carottes ne représentent pas réellement l'ensemble du béton, car le plus souvent effectués au hasard ; car difficilement réalisable et l'application sur chantier de telles méthodes non destructives pourra nous renseigner sur la qualité du béton et il sera préférable pour un bon suivi de qualité-contrôle du béton.

-L'utilisation des **POLYCARBOXYLATES** n'influe pas sur les paramètres de **CD** et **CND** entre les carottes et les éprouvettes normalisées.

-Le contrôle par scléromètre ne dépend pas de la forme (éprouvette ou bien carotte).

-Le contrôle par ultrason influencer par les formules de calcul qui sont données en fonction des paramètres expérimentaux et différentes approches, soit logarithmique, exponentiel ou polynômiale, c-a-d : est influencé par la forme et les dimensions et les lois de calcul, et ces lois ne sont pas applicables pour les carottes car cette technique est fortement influencée par les dimensions des éprouvettes.

-L'essai au scléromètre est comparatif, il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués. L'essai peut aussi être utilisé pour vérifier si la valeur de l'indice de rebondissement a atteint la valeur désirée correspondant à la résistance du béton, ce qui peut aider à décider du moment où l'on peut mettre la structure en service.

-Une application particulière de l'essai au scléromètre consiste à évaluer la résistance à l'abrasion des planchers de béton, qui dépend largement de la dureté de surface.

- L'essai au ultrason peut être utilisée autant sur les ouvrages complétés que sur ceux en construction; c'est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton.

En conclusion nous pouvons dire que les essais non destructive sont plus adaptés aux conditions de mesures sur site ; très pratique ; rapide et avec un cout raisonnable.

Une fois que des relations sont établies entre les valeurs des résistances des éprouvettes **(16/32)** issues des essais mécaniques et les mesures issues des essais non

destructifs (le scléromètre et les ultrasons), l'évaluation de la résistance du béton apparaît donc plus fiable.

Les données fournies par ces essais ne sont pas très faciles à interpréter, le béton étant un matériau très complexe. Par conséquent, les essais ne sauraient remplacer les essais normalisés de résistance à la compression. Ils fournissent des données sur les ouvrages réels que des essais normaux ne sauraient fournir, et sont d'une grande valeur lors du bétonnage en hiver pour garantir la sécurité et permettre de déterminer à partir de quel moment les coffrages peuvent être enlevés.

Ces essais non destructifs sont aussi excellents pour permettre d'estimer la résistance relative du béton dans les différentes parties d'un même ouvrage. Lorsqu'ils sont correctement effectués, ils constituent un élément très important parmi tous les moyens qui permettent de tester et d'évaluer le béton et les ouvrages en béton.

❖ En termes de recommandation :

L'avenir de l'évaluation de la résistance du béton en utilisant le **CD** et le **CND**, reste à développée. Sur la base d'une bonne compréhension des phénomènes mis en jeu, des résultats très positifs seront certainement obtenus. Un prochain défi sera de définir et de valider les procédures optimales pour évaluer les structures de taille réelle. Mieux prendre en compte cette question complexe nécessite des travaux supplémentaires, afin de recueillir des données expérimentales sur la variabilité du matériau et l'erreur de mesure. Il sera également possible d'utiliser des méthodes de **CND** pour estimer Les valeurs des différentes caractéristiques des propriétés des matériaux, dont les experts auront le plus besoin pour toute réévaluation structurelle d'un ouvrage en béton.

❖ En termes de perspective, on propose les axes de recherches suivants :

- Utilisation et variation des types des adjuvants.
- Utilisation des différents diamètres des carottes.
- Utilisation de **CND** et **CD** dans différents milieux agressifs.

Notre étude est de ce fait une modeste contribution à la recherche dans ce domaine de l'application des essais non destructifs et destructifs.

L'objectif est de l'adapter à notre environnement de construction et pouvoir la banaliser mais pour cela il est nécessaire d'essayer de la maîtriser et d'en connaître les failles éventuelles en menant encore plus de recherches dans ce domaine, d'où notre étude qui n'est autre qu'une modeste contribution à notre niveau.



Partie annexe



ANNEXE « A »

MATINE

Ciment pour béton exigeant CEM 2 /B 42.5 N NA 442

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (Ca O) à fonction basique et la silice (SiO₂) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al₂ O₃) et le fer (Fe₂O₃). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500 °C. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme **NA 442**, **EN 197-1** et à la norme **NF P 15-301/94**.

-Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

1-Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles).
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport.etc).
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de dessalement, etc.).
- Secteur industriel.

2-Analyses et caractérisation :

-Analyses chimiques :

Perte au feu (%), (NA 5042) :	7.50-12.00
Résidus insolubles (%), (NA 5042) :	0.7-2.00

Teneur en sulfates SO_3 (%), (NA 5042) :	2.00-2.70
Teneur en oxyde de magnésium Mg O (%) :	1.00-2.20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042) :	0.01-0.05
Teneur équivalent en alcalis (%) :	0.3-0.75

-Composition hypothétique du clinker (Bogue) :

Silicates tricalciques C_3S (%) :	58-64
Silicatés bicalciques C_2S (%) :	12-18
Aluminates tricalciques C_3A (%) :	6.00-8.00
Aluminoferrites tetracalciques C_4AF (%) :	10.00-12.00

-Propriétés physiques :

Consistance normale de la pate de ciment (%) :	25-28.50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231) :	4150-5250
Retrait à 28 jours en $\mu\text{m} / \text{m}$:	< 1000
Expansion en mm :	0.3-2.5

-Temps de prise à 20°C (NA 230) :

Début de prise (min)	140-195
Fin de prise (min)	195-290

-Résistance à la compression (NA 234) :

02 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

SIKA VISCOCRETE TEMPO 544

Superplastifiant /Haut réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi et béton autoplacant.

Conforme à la norme NF EN 9346-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.

1 -Présentation :

TOMPO 544 est un superplastifiant / haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de polycarboxylates modifiés.

2 -Domaines d'application :

TOMPO 544 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplacants transportés sur de longues distances et pompés.

Dans les bétons autoplacants TOMPO 544 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

Bétons avec des granulats concassés (même avec taux d'absorption très élevé).

3-Caractères généraux :

TOMPO 544 est un superplastifiant très puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Longue rhéologie (>2h30).
- Robustesse à la ségrégation.
- Qualité de parement.

4-Classification 3R :

Rhéologie	Résistances initiales	Réduction D'eau
5	4	4

5 -Agréments, essais de laboratoire : PV CNERIB : DTEM / 150 / 2015

6-Caractéristiques : Liquide marron.

7-Conditionnement :

-Futs de 200 Kg.

-CP de 1000 L.

-Vrac.

8-Stockage :

Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30°C.

TOMPO 544 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine.

En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

9-Conservation : 1an en emballage intact.

10-Données techniques :

-Densité 1.07 ± 0.01

-pH 5 ± 1

-Teneur en $\text{Na}_2\text{O Eq}$ $\leq 1\%$

-Teneur en ion Cl^- $\leq 0.1\%$

-Extrait sec $32 \pm 1.2\%$

11-Conditions d'application (dosage) :

Plage d'utilisation recommandée : 0.5 à 3% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Plage d'utilisation usuelle : 0.6 à 1.5% du poids du ciment ou du liant.

12 -Mise en œuvre :

TOMPO 544 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

ANNEXE « B »

Le carottage (NF EN 12504-1)

1-PRINCIPE :

Les carottes extraites au moyen d'un carottier sont soigneusement examinées, leurs extrémités sont préparées par rectification ou par surfaçage, puis testées en compression.

2-Appareillage :

- ✓ Carottier.
- ✓ Machine d'essai en compression.
- ✓ Balance ou matériel équivalent.
- ✓ Calibre et/ou règles.
- ✓ Gabarit.
- ✓ Équerres et gabarits (ou autres instruments).



3-La méthodologie de prélèvement des carottes :

- Repérer la zone dans laquelle doit se faire le sondage
- Implanter le point de sondage

- Choisir le diamètre du carottier
- Fixer la colonne au support Perçage du support,
- mise en place d'une goupille dans le trou préalablement réalisé,
- vissage d'une tige filetée dans la goupille,
- positionnement de la colonne sur la tige filetée,
- serrage au boulon
- Accrocher la carotteuse à la colonne
- Relier la bombonne d'eau à la carotteuse
- Mettre sous pression l'eau :
- Ouvrir l'arrivée d'eau
- Démarrer la machine
- Carotter à la vitesse préconisée



Essai ultrason (NF EN 12504-4 /NA 5027)

1-Principe de la mesure :

La mesure est définie dans la norme **EN 12504-4**. Elle consiste à déterminer le temps de parcours dans le béton d'une onde ultrasonique produite par un transducteur électroacoustique.

2-Appareillage :

Un générateur d'impulsions électriques est associé à 2 transducteurs de 20 kHz à 150 kHz (émetteur et récepteur) et d'un amplificateur de signal. Un dispositif électronique permet de mesurer le temps écoulé entre le départ de l'impulsion au niveau du transducteur émetteur et son arrivée au transducteur-récepteur.



3-Mode opératoire :

- Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera fixé,
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériaux d'interposition comme la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol. (Dans notre cas c'était de la graisse).



Essais scléromètre (NF EN 12504 – 02)

1-Principe :

Une masse propulsée par un ressort projette une tige de percussion au contact de la surface, le résultat de l'essai est exprimé par la mesure de la distance de rebondissement de la tige.

2-Appareillage :

Scléromètre, constitué d'un marteau en acier comprimé par un ressort qui, après libération, projette une tige de percussion en acier au contact de la surface de béton. La vitesse de déplacement du marteau produite par le ressort doit être constante et reproductible. Le rebondissement du marteau en acier par rapport à la tige de percussion en acier doit être mesuré sur une échelle linéaire solidaire du bâti de l'instrument.

3-Mode opératoire :

- **Préparation de la surface :**

Les mesures doivent être effectuées sur des surfaces nettes ne présentant pas des nids de gravier, des écaillages, une texture grossière, une porosité élevée.

La préparation de la surface consiste à éliminer tout enduit ou peinture adhérent ou poncer si cette surface est constituée d'une couche superficielle friable. Toute trace d'eau sur la surface doit être essuyée.

-Placer la sonde à l'endroit de la mesure,

-L'essai s'effectue avec l'appareil placé en position perpendiculaire à une surface lisse.

-Amener la tige au contact du béton et presser l'appareil dans le sens de l'effort exercé.

-Mesurer le rebondissement de la masselotte en observant la nouvelle position prise par l'index devant l'échelle graduée.

-Effectuer au moins 10 mesures successives dans la même zone. La surface de cette zone est équivalente à celle d'un carré d'environ 25 cm de côté. Au cours de ces mesures, il convient de ne pas effectuer l'essai à moins de 3 à 4 cm des bords de l'élément testé.

Les éprouvettes doivent être maintenues entre les plateaux de la presse sous une contrainte de 0.5 MPa. Les mesures au scléromètre ne peuvent être effectuées qu'après 48h de la sortie des éprouvettes de leur ambiance de conservation.



Essai de résistance a la compression des éprouvettes

NF EN 12390 - 3

1-Principe de l'essai :

L'éprouvette, cylindrique ou cubique, moulée ou carottée, est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section soumise au chargement de l'éprouvette.

2-Matériel Nécessaire :

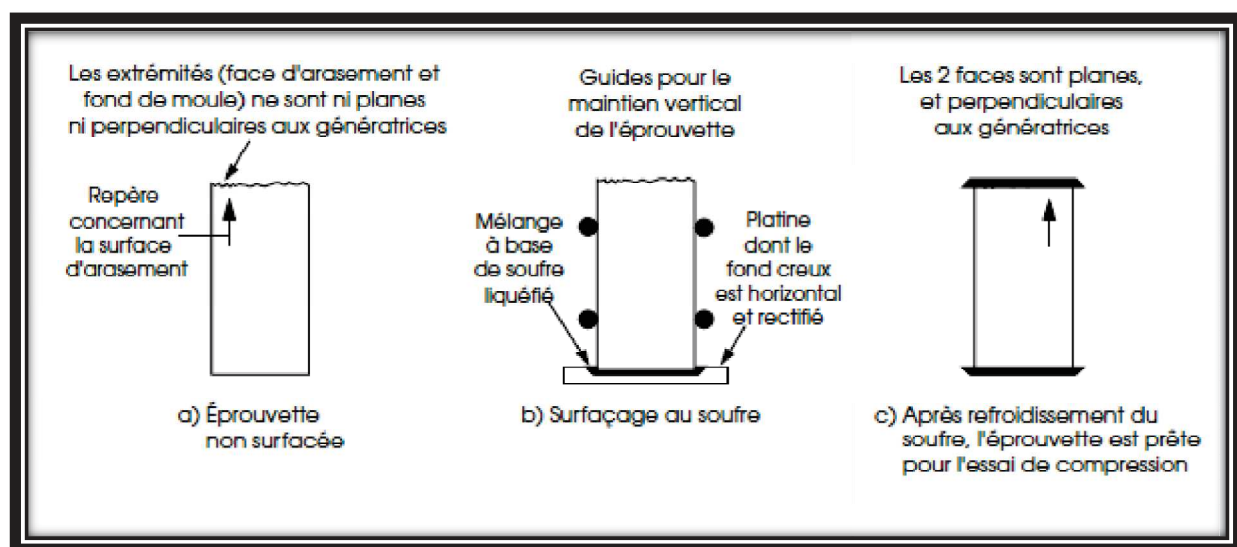
- Machine d'essai de compression conforme à l'**EN 12390-4**.
- Les machines d'essai sont répertoriées en trois classes (classe 1,2 et 3).
- Matériel de surfacage pour les éprouvettes cylindriques (moulées ou carottées).
- Balance.
- Pieds à coulisse ou mètre ruban.

3-Mode Opératoire :

3-1-Méthode de surfacage au mortier de soufre :

- Le mélange est constitué en masse de 50% de soufre et 50% de sable fin siliceux (0.125 / 0.250 mm).
- Avant surfacage, les extrémités de l'éprouvette à surfacer devront être propres et sèches.

- Le mélange est porté à une température de 120 °C à 140 °C à cette température le mélange est liquide .Toutefois, il est nécessaire de l'homogénéiser régulièrement car le sable étant plus lourd.
- Lubrifier légèrement la platine afin de faciliter le démoulage.
- Prélevé en une seule fois la quantité voulue et la verser de façon uniforme sur la platine.
- Laisser descendre l'éprouvette lentement en se servant de dispositif de guidage vertical.
- Ne pas lâcher l'éprouvette, pour éviter tout risque de projection.
- L'épaisseur de la couche de surfaçage devra être comprise entre 2 et 4 mm.
- Réaliser ces opérations rapidement par le soufre liquide, verser dans le récipient a tendance à ce solidifié rapidement.
- Après refroidissement l'éprouvette est désolidarisée du gabarit de surfaçage. on procède ensuite au surfaçage de la deuxième face.
- Afin d'assurer que le soufre et a bien adhère sur la totalité des faces, on frappe celles-ci en différents points (avec ses doigts).Si cela ne sonne pas, c'est que le surfaçage et correctement réalisé.
- Un délai minimal de 30mn doit être respecté avant de procéder aux essais de compression.



3-2-Positionnement des éprouvettes sur la machine d'essai :

- Les plateaux de la machine d'essai doivent être nettoyés. - L'éprouvette est placée sur la machine d'essai avec une erreur de positionnement inférieure à 1 % de son diamètre. - Pour les éprouvettes cylindriques, la compression est réalisée perpendiculairement au sens du coulage par contre pour les éprouvettes cubique est réalisée parallèlement au sens de coulage.

3-3-Mise en charge :

- La vitesse de montée en charge est comprise entre 0,4 et 0,8 MPa /s. - La régularité de montée en charge est considérée comme satisfaite, pour les commandes manuelles ou automatiques, si dans l'intervalle de 10 à 90 % de la charge de rupture, la vitesse respecte la tolérance de 10 % de la valeur visée. - La charge maximale obtenue doit être enregistrée.

3-4-Evaluation de type de rupture :

Toute rupture incorrecte doit être enregistrée en faisant référence à la forme de rupture donnée par les Figures 2 ou 4 de la norme.

- La résistance en compression f_c (MPa) est déduite par la formule ci-après :

$$F_c = \frac{F}{A_c} \quad (\text{MPa})$$

F : Charge maximale atteinte (N).

A_c : section de l'éprouvette (mm^2).

La résistance à la compression est arrondie à 0.1 MPa de la plus proche.



Liste des figures

Figure 01 : JOSEPH LAMBOT, barque en ciment armé, 1849.....	5
Figure 02 : Les constituants du béton.....	6
Figure 03 : les principaux composants du ciment.....	18
Figure 04 : l'eau de gâchage	26
Figure 05 : Influence du dosage en eau à un dosage de ciment fixé.....	27
Figure 06: Les différents granulats.....	29
Figure 07: les différents tamis pour l'analyse granulométrique.....	30
Figure 08: Granulats roulés.....	31
Figure 09: Granulats concassés.....	31
Figure 10 : Granulats aplatis.....	31
Figure 11: Grilles de mesure le coefficient d'aplatissement.....	32
Figure 12 : Adjuvant liquide de gauche à droite : agent anti –lessivage de retrait, réducteur d'eau, agent moussant, inhibiteur de corrosion et agent entraîneur d'air.....	38
Figure 13 : Certains appareils pour mesurer l'ouvrabilité.....	41
Figure 14 : Mesure de l'affaissement au cône d'ABRAMS.....	42
Figure 15: Principe de fonctionnement du Maniabilimètre L.C.P.C.....	43
Figure 16: Mesure de la teneur en air occlus à l'aide de l'aéromètre.....	44
Figure 17: Les essais de la compression.....	47
Figure 18: les essais de traction.....	48
Figure 19 : carottage vertical.....	49

Liste des figures

Figure 20 : Carottage horizontal.....	50
Figure 21 : Les carottes.....	53
Figure 22 : Scléromètre à béton modèles N/L.....	56
Figure 23: Scléromètre.....	56
Figure 24 : Points de mesures pour un panneau (exemple dalle $3 \times 3 \text{ m}^2$).....	57
Figure 25 : Grille de mesure sur éprouvette.....	58
Figure 26 : Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter.....	58
Figure 27 : Essai Ultrasons.....	61
Figure 28 : Appareil de mesure.....	62
Figure 29 : Appareil de mesure.....	63
Figure 30 : Méthode en transparence (directe).....	65
Figure 31: Méthode en surface (indirecte).....	65
Figure 32 : Méthode semi-directe.....	66
Figure 33: représentation schématique du résultat d'un essai uni axial de fluage.....	69
Figure 34 : Module d'élasticité.....	69
Figure 35: Centrale à béton semi-mobile avec malaxeur à double DKX 4.00.....	73
Figure 36: Centrale horizontale avec stockage des granulats cloisonnés en étoile au sol.....	74
Figure 37 : Centrale horizontale avec stockage des granulats en trémies en ligne au sol.....	75
Figure 38 : Camion toupie.....	80
Figure 39 : Camion tapis	80

Liste des figures

Figure 40 : Camion pompe.....	80
Figure 41 : Camion malaxeur.....	80
Figure 42 : Essais de compression et flexion.....	85
Figure 43 : La composition chimique du ciment (MATINE 42.5 R).....	86
Figure 44 : La composition minéralogique du ciment (MATINE 42.5 R).....	87
Figure 45 : Courbe d'analyse granulométrique des du sable corrigé.....	93
Figure 46: Pourcentage des constituants de la formulation d'un BT.....	103
Figure 47: Courbe d'analyse granulométrique des différents granulats – BT	104
Figure 48 : Pourcentage des constituants de la formulation d'un BPE.....	107
Figure 49 : Courbe d'analyse granulométrique des différents granulats – BPE	108
Figure 50 : Affaissement au cône D'ABRAMS.....	111
Figure 51 : Essai de carottage.....	113
Figure 52 : Rectification des carottes.....	113
Figure 53 : Essai ultrason.....	114
Figure 54 : Courbe RILEM	115
Figure 55 : Comparaison entre le BT et BPE selon la vitesse ultrasonique (m/s).....	117
Figure 56 : Resistance à la compression en fonction de la dureté au choc.....	118
Figure 57: Essai scléromètre.....	118
Figure 58 : comparaison entre le BT et BPE selon l'indice sclérométrique.....	120
Figure 59: Essai de compression.....	121

Liste des figures

Figure 60: Comparaison entre le **BT** et **BPE** selon la résistance à la compression (MPa)...122

Figure 61: Comparaison entre le **CD** et **CND** – Carottes **(65/130)** –**BT**.....125

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 01 : Classes d'exposition des bétons selon la norme NF EN 206-1.....	8
Tableau 02 : Classes de consistance des bétons.....	10
Tableau 03 : classes de résistance à la compression pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds.....	11
Tableau 04 : Classes de résistance à la compression pour les bétons légers.....	12
Tableau 05 : type de béton en fonction de sa masse volumique.....	13
Tableau 06 : classification de la masse volumique des bétons légers.....	13
Tableau 07 : Classes de chlorures.....	13
Tableau 08 : Classes de chlorures à respecter en fonction de l'utilisation du béton.....	14
Tableau 09 : Les valeurs limites pour les attaques chimiques des eaux de surface et souterraines.....	14
Tableau 10 : Valeurs limites spécifiées à la composition et aux propriétés du béton.....	10
Tableau 11 : Valeurs limites spécifiées pour la composition et les propriétés des produits en béton fabriqués en usine.....	16
Tableau 12 : les différents types des ciments courants.....	19
Tableau 13 : Les caractéristiques chimiques du ciment	24
Tableau 14 : classification des ciments d'après leur résistance.....	25

Liste des tableaux

Tableau 15: Classification du sable en fonction de l'E.S.....	34
Tableau 16: Valeurs Vss pour les catégories des gros granulats	34
Tableau 17: Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.....	42
Tableau 18 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions.....	63
Tableau 19 : les différents camions transportent le BPE.....	80
Tableau 20 : essais physiques du ciment « MATINE 42.5 R ».....	84
Tableau 21: essais mécaniques du ciment « MATINE 42.5 R ».....	84
Tableau 22: Composition chimique du ciment (%) CPJ (MATINE 42.5 R).....	86
Tableau 23 : composition minéralogique du ciment (%) CPJ (MATINE 42.5 R).....	87
Tableau 24 : Caractéristiques physiques de sable de KADDARA	88
Tableau 25: Analyse granulométrique du sable de KADDARA.....	89
Tableau 26: Caractéristiques physiques du sable de BOUSAADA.....	90
Tableau 27 : Analyse granulométrique du sable de BOUSAADA.....	91
Tableau 28 : Analyse granulométrique du sable corrigé.....	92
Tableau 29: Caractéristiques physiques de G 3/8.....	94
Tableau 30: Analyse granulométrique du G 3/8.....	95
Tableau 31: Caractéristiques physiques de G 8/16.....	95

Liste des tableaux

Tableau 32 : Analyse granulométrique du G 8/16.....	96
Tableau 33 : Caractéristiques physiques de G 16/25.....	96
Tableau 34 : Analyse granulométrique du G 16/25.....	97
Tableau 35: Coefficient d’aplatissement du G 3/8.....	97
Tableau 36: Coefficient d’aplatissement du G 8/16.....	98
Tableau 37: Coefficient d’aplatissement du G 16/20.....	99
Tableau 38: La composition du mélange de BT.....	106
Tableau 39: la composition du mélange de BPE.....	110
Tableau 40: L’affaissement au cône d’ABRAMS du BT et BPE.....	110
Tableau 41 : La masse volumique du béton à 28 jours.....	111
Tableau 42: Résultats de l’essai d’ultrason- Eprouvettes (16/32).....	115
Tableau 43 : Résultats de l’essai d’ultrason- Carottes (65/130).....	116
Tableau 44: Résultats de l’essai scléromètre – Eprouvettes (16/32).....	119
Tableau 45: Résultats de l’essai scléromètre – Carottes (65/130).....	119
Tableau 46 : Résultats de l’essai Compression – Eprouvettes (16/32).....	121
Tableau 47: Résultats de l’essai Compression – Carottes (65/130).....	122
Tableau 48: Rapport entre la Rc (I) des carottes (65/130) et les éprouvettes (16/32).....	123

Liste des tableaux

Tableau 49: Rapport entre la Rc (I) des carottes (65/130) et les éprouvettes (16/32).....	123
Tableau 50 : Rapport entre la Rc (v) des carottes (65/130) et les éprouvettes (16/32).....	123
Tableau 51: Rapport entre la Rc (v) des carottes (65/130) et les éprouvettes (16/32).....	124
Tableau 52: Rapport entre la Rc des carottes (65/130) et éprouvettes (16/32)	124
Tableau 53: Rapport entre la Rc des carottes (65/130) et les éprouvettes (16/32).....	124
Tableau 54: Récapitulatif.....	125

Liste des tableaux

❖ Résumé :

Le contrôle et le suivi du béton est un souci primordial dans les travaux de génie civil ; traditionnellement ; la méthode normalisée utilisée, pour évaluer la qualité du béton dans les ouvrages en béton comprend, les essais de résistance à la compression, effectués sur des éprouvettes coulées au même moment. Mais cette méthode a beaucoup d'inconvénients qui proviennent du fait que :

- ✓ Les résultats ne sont pas immédiatement disponibles.
- ✓ Le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage, les conditions de cure ou le compactage peuvent être différents.
- ✓ Les propriétés de résistance d'une éprouvette dépendent de sa grosseur et de sa forme.

Le développement de méthodes fiables d'évaluation non destructives des propriétés du béton in situ s'avèrent alors d'une importance particulière. Ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des moyens non destructifs.

Parmi les méthodes non destructives les plus populaires et habituellement utilisées du fait de leur simplicité et de leur moindre coût, pour évaluer la résistance du béton sur site sont :

- Les ultrasons.
- Le scléromètre.

Dans ce cadre notre travail s'intéresse au contrôle du béton en utilisant par des éprouvettes cylindrique (16/32), et on utilise par des carottes (65/130) ; sachant que cette technique est très souvent utilisée pour suivre l'exactitude de mise en œuvre des bétons surtout dans les coffrages complexes.

Nous intéressons aussi dans ce travail à l'influence des **POLYCARBOXYLATES** sur les paramètres de contrôle non destructif (scléromètre, ultrason) et contrôle destructif (compression). Les éprouvettes sont préparées selon les normes en vigueur, en utilisant des éprouvettes (16/32) et en utilisant des carottes (65/130) (éclatement de 2), selon la notice de la norme **12504 – 1**.

Les résultats montrent que l'utilisation des **POLYCARBOXYLATES** n'influe pas sur les paramètres de **CND** et **CD**, par contre les lois de calcul utilisées pour le **CND** par ultrason pour les éprouvettes (16/32) ne sont pas applicables pour les carottes (65/130), car cette technique est fortement influencée par les dimensions des éprouvettes normalisées.

Mots-clés : résistance à la compression – contrôle non destructif – contrôle destructif – ultrasons – scléromètre – carottes – éprouvettes – **POLYCARBOXYLATES**.

❖ Abstract :

The control and the follow-up of the concrete is a primordial concern in the works of civil engineering; traditionally, the standard method used to assess the strength of concrete in compression in concrete structures under construction includes testing compressive strength, performed on specimens cast at the same time. But this method has many drawbacks that arise because:

- ✓ The results are not immediately available.
- ✓ The concrete specimens may be different from this of the structure, for the fact that the cure or compaction may be different.
- ✓ On the other hand, the strength properties of a specimen depend on its size and shape.

The development of reliable methods for non-destructive evaluation of the properties of in situ concrete then became prove of particular importance. These methods are based on the fact that some physical properties of the concrete can be connected to the compressive strength and can be measured by nondestructive methods.

-Ultrasound.

-The rebound – hammer.

Are among the most popular and commonly used non-destructive methods to assess the compressive strength of concrete structures on-site because of their simplicity and their lower cost.

In this context, our work focuses on the control of loam concrete by cylindrical test specimens (16/32) and is swallowed by cores (65/130), knowing that this technique is very often used for monitoring the accuracy of The use of concretes especially in complex formwork We are also interested in the influence of **POLYCARBOXYLATES** on non-destructive control parameters (The rebound - hammer, Ultrasound) and destructive (compression) control. The test specimens are prepared according to the standards in force, by swallowing test specimens (16/32) and by cutting cores (65/130) (slenderness of 2) according to the instructions of the standard **12504-1**.

The results show that the use of **POLYCARBOXYLATES** does not affect **NDC** and **DC** parameters, whereas the calculation laws used for ultrasonic **NDC** for test specimens (16/32) are not applicable for cores (65/130), as this technique is strongly influenced by the dimensions of the standardized specimens.

Keywords: Compressive strength- nondestructive testing- destructive testing- Ultrasound- Rebound-Hammer- Cores- Specimen- POLYCARBOXYLATES.

❖ الملخص:

مراقبة و متابعة أعمال الخرسانة مطلب ملح في أعمال الهندسة المدنية، فعادة الطريقة المعهودة لتقييم مقاومة الخرسانة للضغط في المنشأة الخرسانية تتضمن التجارب المنجزة على عينات مصبوبة في الموقع أثناء صب الخرسانة في المنشأة إلا أن هذه الطريقة لها العديد من العيوب الناتجة عن:

- عدم إمكانية الحصول الفوري على النتائج.
- إمكانية الحصول على الخصائص الغير المطابقة لخصائص خرسانة المنشأة، ذلك لاختلاف طريقة العلاج.
- خصائص مكان حفظ و تصلب العينات و الضغط من ناحية و من ناحية أخرى فان خصائص مقاومة العينات تعتمد على شكلها و حجمها.

تطور أساليب ناجعة لتقييم غير المتلف في عين المكان لخصائص الخرسانة يثبت أنها ذات أهمية خاصة ، حيث تعتمد هذه الطرق على حقيقة الخصائص الفيزيائية للخرسانة التي يمكن أن تكون لها علاقة بالمقاومة و التي يمكن قياسها بوسائل غير متلفة للخرسانة ، من بين هذه الوسائل نجد الأكثر شيوعا و التي تستخدم عادة بسبب بساطتها و لكونها غير مكلفة و سرعة تقييمها للخرسانة في الموقع و هم :

- جهاز قياس سرعة الموجات فوق الصوتية.
- جهاز قياس الارتداد.

ضمن هذا الإطار يندمج بحثنا المتمثل في المراقبة القبلية (عينات اسطوانية نظامية 32/16) و البعدية (الجزرات 130/65) مع العلم أن هذه التقنية كثيرا ما تستخدم لمراقبة دقة تنفيذ ملموسة خصوصا في أشكاله المعقدة ، كما أننا مهتمون في هذا العمل بتأثير POLYCARBOXYLATES على خصائص المراقبة الغير متلفة (جهاز قياس الارتداد، قياس سرعة الموجات فوق الصوتية) و خصائص المراقبة المتلفة (الضغط) .

العينات و الجزرات حضرت وفقا للمعايير المعمول بها القبلية و البعدية ($H/D = 2$) وفقا للمعيار 12504-1. النتائج المحصل عليها أثبتت أن استعمال POLYCARBOXYLATES لا تؤثر إطلاقا على النسب الموجودة بين قيم القياسات المحصل عليها في الجزرات و قيم القياسات للعينات النظامية و من جهة أخرى أثبتت هذه الدراسة أن قوانين الحساب المستخدمة لأجل المراقبة الغير متلفة بواسطة جهاز الموجات فوق الصوتية من اجل العينات النظامية ليست قابلة للتطبيق على الجزرات ، لان هذه التقنية تتأثر بصفة كبيرة بأبعاد العينات النظامية .

الكلمات المفتاحية : شدة الضغط ، المراقبة الغير المتلفة ، مراقبة متلفة ، جهاز قياس سرعة الموجات فوق الصوتية ، جهاز قياس الارتداد ، الجزرات ، العينات النظامية .