



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



Faculté de Génie de la Construction
Département de génie civil.

Mémoire

de fin d'étude :
En vue d'obtention du diplôme de Master Académique en Génie Civil,
Option : Structure.

Thème :
**Caractérisation d'un béton gonflant en utilisant un
scléromètre.**



Dirigé par :

Mr. Mehaddene Rachid

Réalisé par :

Melle. Nekmouche Ouarda

Promotion 2011-2012

Remerciements :

Au terme de ce travail, je saisis cette occasion pour exprimer mes vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

La première personne que je tiens à remercier est mon promoteur Mr **MEHADDENE RACHID**, pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité. Je le remercie aussi pour sa gentillesse et sa disponibilité.

Un immense merci à mon très cher frère Amine pour son aide, son encouragement et ses nombreux conseils, qui m'ont été très précieux.

Je tiens à remercier très chaleureusement le responsable du laboratoire de technologie des matériaux M^r MAMOU Mohand pour les moyens qu'il a mis à ma disposition ainsi que M^r BOUHERRAOUA Rachid pour son aide dans la réalisation de la partie expérimentale.

Je remercie vivement tous les enseignants qui ont contribué à ma formation ainsi que les responsables de la bibliothèque qui ont facilité ma recherche bibliographique.

Mes sincères remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

La liste ne serait pas complète sans citer tous mes amis (es) et ma famille qui ont su me supporter et me soutenir chacun à sa manière durant toute cette période. C'est aussi grâce à eux que cette thèse est menée à bien !

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation trouvent ici ma profonde reconnaissance.

Merci 

Dédicace :

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime jusqu'à les frontières de l'imagination : A ma chère *Mère*, mon cher *Père*, sans eux, je n'aurais pas abouti à ce stade d'étude, que Dieu puisse m'aider à les honorer, les servir et à aller au-delà de leurs espérances et qu'il leur prête encore une longue vie de paix, santé et de bonheur.

Je dédie ce modeste travail à :

La mémoire de mes très chers frères *Achour et Mebarek*, que dieu les gardent dans son vaste paradis.

Mon frère *Amine* que j'adore beaucoup pour sa patience, sa disponibilité et son aide, sans oublier mon beau frère *Djamel*

Mes sœurs que j'aime beaucoup *Nawal, Letitia, Anaïs, Zitouna* et sa petite fille *Maylis*.

Mes grands parents.

Mon oncle *Madjid*, que j'aime beaucoup, pour son encouragement.

Mes tantes *Fariza* et *Karima* pour leur soutien, orientation et conseils, sans oublier leurs mari *Messaoud* et *Mohand*.

Mes cousins et cousines : *Manel, Sabil, Madjid* et *Said*.

Toute la famille *NEZMOURTE*.

Tous mes ami(e)s en particulier *Nouara, Nacira, Capet, Lynda* et *Madiha*.

Et pour tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.

Hekmouche Ouarda

Résumé :

L'utilisation d'essais d'auscultation au scléromètre sur les matériaux de construction, en particulier sur le béton, date de plusieurs décennies. Le scléromètre, appliqué sur une face de la partie à ausculter, permet d'évaluer l'homogénéité du béton in situ, pour déterminer des zones de faible qualité du béton, ainsi de donner une estimation de la résistance. Ce travail consiste à comparer les résistances données par un scléromètre et celles obtenues par écrasement des éprouvettes remplies du même béton, et donc, déterminer l'erreur faite par le scléromètre. Pour cela, on a confectionné des éprouvettes cylindriques de dimension 16x32cm puis on les a conservées dans l'eau. On a fait la caractérisation par scléromètre en premier lieu, puis par compression d'une façon continue jusqu'à la rupture pour différents âges du béton (de 7 jusqu'à 45 jours).

Après la caractérisation, il ressort de l'ensemble des résultats que les essais sclérométriques, dans la détermination de la résistance à la compression d'un béton, ne peut être employée qu'à titre d'orientation vu son caractère très superficiel, la discordance qui existe souvent entre la qualité du béton à la surface et sa qualité en profondeur fait que l'essai sclérométrique ne peut, en aucun cas, remplacer les méthodes destructives ou les méthodes non destructives de profondeur, par contre, il est utilisé pour déterminer les endroits faibles de résistance d'une surface de béton in-situ, afin de faire le carottage dans des endroits précis. Il permet d'apprécier directement, avec une exactitude suffisante, la qualité du béton dans une construction ordinaire, aussi estimer son homogénéité dans les éléments structuraux d'une construction. Il permet aussi de suivre l'évolution de la qualité du béton au cours du temps.

Mots-clés : Béton, compositions, résistance, compression, scléromètre, corrélation.

Abstract:

The use of tests to auscultation hammer on construction materials, particularly concrete, dates back several decades. The hammer, applied to one surface of the part to auscultate, allows to evaluate the homogeneity of the concrete in situ, to determine areas of low quality of the concrete, and to estimate the resistance. This work is to compare the resistance provided by a hammer and those obtained by crushing the specimens filled with the same concrete, and therefore, determine the error made by the hammer. For that, we crafted cylindrical specimens of size 16x32cm and were then stored in water. It was the characterization by hammer first, followed by compression in a continuous manner until failure of the concrete for different ages (7 to 45 days).

After characterization, it is clear from all the tests results of hammer in determining the compressive strength of concrete, can be used as a guide only seen its very superficial, the discrepancy that often exists between the quality of concrete on the surface quality and depth that the trial hammer can not, under any circumstances, replace destructive methods or not-destructive methods of depth, for cons, it is used to determine the weak areas of resistance of a concrete surface in situ, in order to coring in specific locations. It allows directly assessing, with sufficient accuracy, the quality of concrete in an ordinary building, also estimating its homogeneity in the structural elements of a building. It can also monitor the quality of the concrete over time.

Keywords: Concrete, composition, resistance, compression, hammer, correlation.

Le sommaire :

Introduction générale	2
------------------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les essais non destructifs

I.1- Introduction.....	5
I.2- But des essais.....	6
I.3 -Avantages et inconvénients de ces essais.....	6
I.4 -Les différents types d'essai non destructif.....	7
I.4.1- Les essais par ultrasons.....	7
I.4.1.1-Généralités.....	7
I.4.1.2-But de l'essai.....	7
I.4.1.3-Principe de l'essai.....	7
I.4.1.4-Description de l'appareil.....	7
I.4.1.5-Processus d'utilisation.....	8
I.4.1.6-Relation vitesse du son-résistance.....	10
I.4.1.7-Facteurs influant la vitesse du son.....	12
I.4.1.8-Avantages et inconvénients d'un ultrason.....	12
I.4.2-Les essais par scléromètre.....	13
I.4.2.1-Généralités.....	13
I.4.2.2-Définition et description.....	13
I.4.2.3-Caractéristiques d'un scléromètre.....	14
I.4.2.4-But et principe d'utilisation.....	15
I.4.2.5-Méthodologie.....	15
1. Choix des zones d'essai.....	15
2. Choix des points d'essai.....	16
I.4.2.6-Comment interpréter les résultats sclérométriques ?.....	16
I.4.2.7-Les différents types de scléromètre.....	18
I.4.2.9-Facteurs influant sur la valeur de l'indice sclérométrique.....	22
I.4.2.8-Combinaison scléromètre-carottage.....	23
I.4.2.10-Avantages et limites d'un scléromètre.....	23
I.5- Conclusion.....	24

Chapitre II : Présentation du matériau

II.1-Généralités.....	26
II.2- Les constituants du béton.....	26
II.2.1-Les ciments.....	27

II.2.1.1-Introduction.....	27
II.2.1.2-Principe de production du ciment portland.....	27
II.2.1.3-Constituants principaux et additions.....	28
• Constituants du clinker.....	28
• Les autres constituants.....	29
II.2.1.4-Catégorie du ciment.....	30
a. En fonction de leurs composition.....	30
b. En fonction de leur résistance normale.....	30
II.2.2 -Les granulats.....	30
❖ Classification des granulats.....	31
a. Les granulats naturels.....	31
1-Les granulats de roches meubles.....	33
2-Les granulats de roches massives.....	33
✓ Production des granulats.....	34
b. Les granulats artificiels.....	35
c. Les granulats recyclés.....	36
II.2.3- L'eau de gâchage.....	36
II.2.4 -Les adjuvants.....	36
II.2.4.1-Les fluidifiants.....	37
II.2.4.2-Les retardateurs de prise.....	37
II.2.4.3-Les accélérateurs de prise.....	38
II.2.4.4-Les entraineurs d'air.....	39
II.2.4.5-Les hydrofuges.....	40
II.2.5-Les additions minérales.....	40
II.3-Propriétés essentielles des bétons.....	40
II.4-Les types du béton.....	40
II.5-Critères de classification des bétons.....	41
II.5.1-L'ouvrabilité.....	41
II.5.2-La dimension maximale des granulats.....	42
II.5.3-La résistance mécanique du béton.....	42
II.5.4-Autres critères.....	43

II.6-Formulation du béton.....	43
II.6.1 -Les méthodes de formulation du béton.....	44
a. La méthode de Bolomey.....	44
b. La méthode de Faury.....	44
c. La méthode de Dreux_Gorrisse.....	45
II.6.2- Composition du béton utilisé.....	47
II.7-Conclusion.....	48
Chapitre III : Elaboration des essais et exploitation des résultats	
III.1- Introduction.....	50
III.2- Confection du béton.....	50
III.2.1-Formulation du béton utilisé.....	50
III.2.2-Préparation de la gâchée.....	51
III.2.3- Confection des éprouvettes.....	52
III.3- Caractérisation des éprouvettes en utilisant un scléromètre.....	53
III.4-Caractérisation des éprouvettes par écrasement.....	56
III.5-Comparaison des résultats obtenus par scléromètre avec ceux d'écrasement	59
III.6- Comparaison des résultats sclérométriques avec un essai non destructif en utilisant un ultrason.....	60
III.7-Conclusion.....	63
Conclusion générale et perspectives.....	65

Introduction générale :

Depuis toujours, l'homme utilise des matériaux naturels pour la construction de son habitat et l'aménagement de son environnement. Après s'être abrités dans des cavernes et avoir construit en branchages, en peaux d'animaux, en terre,.... les bâtisseurs utilisèrent des pierres dures pour édifier des bâtiments plus importants. Les pyramides, temples, châteaux et maisons témoignent le génie constructeur de nos ancêtres.

Le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction malléable au moment de le mettre en place et résistant ensuite

Le béton a été évolué avec le développement du ciment surtout à la fin du 19ème siècle, d'ailleurs il est aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé au monde, il a mérité sa place par ses 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.

Le béton a sa place dans les bâtiments d'habitation (logements, écoles, hôpitaux, etc.) aussi bien que dans les constructions liées à l'activité professionnelle (usines, ateliers, commerces, bureaux) ou dans des réalisations diverses (socio-culturelles, sportives ou de loisir, etc.), donc il est utilisé par tout et pour tous types de construction.

La fabrication du béton est facile et nécessite peu d'entretien, elle est faite sur tout le territoire en quantités presque illimitées à partir des matériaux naturels (ciments, granulats, eau et d'éventuels adjuvants), il est résistant, durable et entièrement recyclable.

En plus de sa résistance et sa durabilité, le béton acquiert de nouvelles propriétés lorsqu'il est associé à des armatures, ce qui fait un matériau à possibilités immenses soit le béton armé ou le béton précontraint.

Selon sa composition, ses additifs et selon les conditions de sa préparation (température, ...etc.) ou de son coulage ou selon les contraintes qu'il a subies (attaques chimiques, séismes, vibrations, chocs thermiques, etc.), le béton vieillit dans le temps.

Donc, il est bien vrai malheureusement, que lorsqu'on utilise du béton sans contrôle, on court quelque dangers quelles que soient les dispositions et la composition du béton prises pour avoir une résistance donnée alors, il est toujours nécessaire de contrôler ce béton, en faisant des essais soit destructifs ou non destructifs.

La méthode normalisée utilisée pour évaluer la qualité du béton dans les bâtiments ou les ouvrages comprend les essais de résistance à la compression, à la flexion et à la traction effectués sur des éprouvettes coulées au même moment. Les principaux désavantages de cette méthode sont les suivants:

Introduction générale

- Les résultats ne sont pas obtenus immédiatement ;
- Le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage car le cure ou le compactage peuvent être différents;

- Les propriétés de résistance d'une éprouvette de béton dépendent de sa grosseur et de sa forme.

Bien qu'il ne soit pas possible d'effectuer une mesure directe des propriétés de résistance du béton d'un ouvrage pour la simple raison que la détermination de la résistance entraîne des contraintes destructives, 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 méthodes non destructives. Ces propriétés physiques du béton comprennent la dureté, la résistance à la pénétration des projectiles, la capacité de rebondissement et la capacité de transmettre les impulsions ultrasoniques et les rayons X et gamma.

Le carottage est le procédé le plus souvent utilisé pour récupérer un échantillon de béton pour la détermination des propriétés d'une structure.

L'absence des moyens pour faire un carottage ou bien pour sa difficulté en présence des armatures empêche de faire des essais destructifs qui définie les résistances du béton, pour cela, on fait appelle à des essais non destructifs pour caractériser ces bétons et surtout pour déterminer leurs qualité, on peut utiliser pour ces essais deux appareils soit l'ultrason ou le scléromètre qu'on va utiliser dans notre étude.

Ce travail consiste à faire une étude comparative entre les résistances d'un béton soumis à la compression (écrasement des éprouvettes) et les résistances d'un même béton données par un scléromètre et un ultrason, et donc, évaluer la fiabilité de ces appareils.

Ce présent mémoire est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre dont on parle des essais non destructifs, leurs avantages et leurs inconvénients ainsi de l'appareil utilisé pour la caractérisation qui est le scléromètre.

Le deuxième chapitre qui consiste des généralités sur le béton et ses constituants.

Le troisième chapitre caractérise les différentes étapes pour la confection des éprouvettes et présentations des résultats des essais expérimentaux destructif et non destructif effectués au laboratoire, on a fait par la suite l'interprétation et discussion de ces résultats obtenus par scléromètre en les comparants aux résultats d'écrasement et aux résultats obtenus par un ultrason.

On termine le travail par une conclusion générale et des perspectives.

I.1-Introduction:

Suite aux constats et expertises effectués sur des structures en béton armé après toute catastrophe naturelle (séisme, ex el Asnam 1980 et Boumerdès 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 la construction.

La qualité du béton mis en place est loin d'être inférieure à celle officiellement mentionnée par les essais d'écrasement au laboratoire et cette différence est due essentiellement à différents facteurs:

- L'échantillon est non représentatif,
- La non qualification de la main d'œuvre,
- 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,
- L'absence de contrôle strict et continu.

Pour assurer une bonne qualité du béton utilisé dans les ouvrages, il y a lieu de développer des méthodes qui vérifient les propriétés du béton in-situ. Pour cela, plusieurs méthodes non destructives sont mises en point pour leur importance particulière.

L'application de ces méthodes se fait à l'aide des appareils comme l'ultrason et le scléromètre.

- L'ultrason est un appareil qui mesure la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers le béton, il peut nous renseigner sur l'homogénéité du béton, l'estimation du module élastique, l'estimation de la profondeur des fissures et de la résistance en compression (qui est le facteur étudié dans ce projet).
- L'utilisation d'essais d'auscultation au scléromètre sur les matériaux de construction, en particulier sur le béton, date de plusieurs décennies. Le scléromètre, appliqué sur une face de la partie à ausculter, permet d'évaluer l'homogénéité du béton in situ, donc déterminé des zones de faible qualité du béton.

Les méthodes d'essai non destructives des ouvrages en béton simple, en béton armé ou en béton précontraint sont particulièrement intéressantes tant pour la proportion élevée de ces constructions dans l'ensemble des ouvrages, que pour l'importance que représente le contrôle de la qualité directement sur la construction.

I.2-Définition et but de ces essais :

Une définition des contrôles non destructifs plus proche de la réalité industrielle consiste donc à dire qu'il s'agit de « qualifier, sans nécessairement quantifier, l'état d'un produit, sans altération de ses caractéristiques par rapport à des normes de recette » autrement dit c'est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au court de la production, soit en court d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances.

Le contrôle non destructif du béton peut être défini comme la méthode d'essai utilisée pour examiner les propriétés du béton utilisé dans la structure réelle.

Ces essais sont réalisés in situ, sur des structures qui existent. Une caractéristique importante de test non-destructif, c'est que l'endroit où l'essai est fait peut être utilisé pour ré-analyse.

Les méthodes non destructives sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance. Ces propriétés physiques comprennent la porosité, la dureté, la résistance à la pénétration des projectiles, la capacité de rebondissement et de transmettre les impulsions ultrasoniques et les rayons X et gamma.

I.3-Avantages et inconvénients de ces essais :

Les avantages de ces essais par rapport aux autres essais peuvent être résumés dans le caractère non destructif. On peut obtenir des informations dans des domaines inaccessibles aux méthodes classiques, économiser les matériaux, du temps et des outils d'essais, par la possibilité de faire les essais sur le matériau dans l'ouvrage même ou sur une seule éprouvettes un nombre pratiquement infini de fois, due à la rapidité de l'exécution de ce type d'essais. Elles permettent aussi de contrôler l'ensemble d'une structure. Le rythme auquel elles progressent nous donne cependant la certitude que le moment de leur substitution aux méthodes destructives n'est pas très lointain.

Le principal désavantage des méthodes d'essais non destructives réside dans le fait qu'au stade actuel, elles ne peuvent pas fournir au constructeur des données suffisamment précises pour remplacer totalement les méthodes destructives ou, au moins, dans les principaux domaines d'application. Elles ne permettent pas toujours de déterminer l'origine des désordres.

I.4-Les différents types d'essais non destructifs :

On distingue plusieurs types d'essais non destructifs, les plus fréquemment utilisés pour le béton sont la capacité de rebondissement et la transmission des impulsions ultrasoniques :

I.4.1-Les essais par ultrason :

I.4.1.1-Généralités :

Le contrôle non destructif par ultrasons est une technique qui est très proche du contrôle échographique utilisé en médical. C'est un outil idéal pour établir si le béton est uniforme. Il peut être utilisé sur les deux structures existantes et celles en cours de construction. Il consiste à envoyer une onde ultrasonore à l'aide des transducteurs dans un matériau qui peut être métallique, composite, plastique ou céramique et à recueillir la présence ou l'absence de signaux de réflexions sur des discontinuités internes de la matière (fissure, porosité...etc.). Il s'agit d'une technique capable de localiser et de dimensionner les défauts internes. Elle peut être utilisée en manuel ou en mode automatisé.

I.4.1.2-But de l'essai :

L'appareil d'auscultation dynamique est utilisé pour mesurer la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques à travers le béton. Par cette méthode, il est possible d'obtenir, de manière non destructive, des informations sur :

- L'uniformité et l'homogénéité du béton.
- Présence des fissures ou des cavités.
- La détérioration due au feu.
- La détermination du module d'élasticité dynamique.
- Evaluer la résistance du béton.

I.4.1.3-Principe de l'essai :

L'appareil génère des impulsions ultrasoniques qui sont transmises au béton par un transducteur mis en contact avec la zone à évaluer. Le temps de propagation à travers le béton est mesuré par des circuits électroniques de mesure, et visualisé sur un afficheur digital.

I.4.1.4-Description de l'appareil :

Les caractéristiques de conception fondamentales de tous les unités disponibles dans le commerce sont très semblables, constitué d'un générateur d'impulsions et un récepteur d'impulsions.

Chapitre I : Généralités sur les essais non destructifs

L'ultrason utilisé dans cette étude est de type 58-E0048, il comprend :

- Le testeur ultrasonique 58-E0048.
- Une tête de transmission et une de réception (54Khz).
- Deux câbles de connexion.
- Un barreau de calibrage.
- Un flacon de gel contact (gel de paraffine) pour assurer un bon contact du béton avec les transducteurs.
- Deux piles alcalines 1,5V type « D ».



Figure I.1 : Appareil d'ultrason.

I.4.1.5-Processus d'utilisation :

Cet appareil peut être utilisé après la mise en place des piles en connectant les deux transducteurs, qui peuvent être indifféremment émetteur ou récepteur, avec les deux câbles.

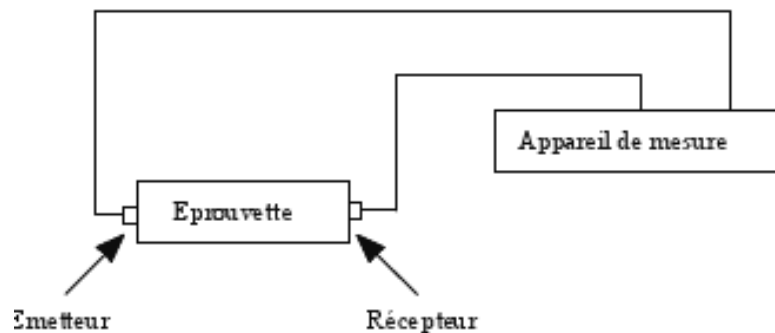


Figure I.2 : Mise en place des transducteurs sur l'éprouvette.

Chapitre I : Généralités sur les essais non destructifs

Mettre l'appareil en marche à l'aide de l'interrupteur. Après quelques secondes l'appareil est prêt à être utilisé. Il mesure le temps de propagation d'une onde ultrasonique traversant le béton afin de déterminer, par la suite, la vitesse de propagation de ces ondes qui nous renseigne sur la résistance du matériau à l'aide d'une courbe normalisée. (Figure I.3)

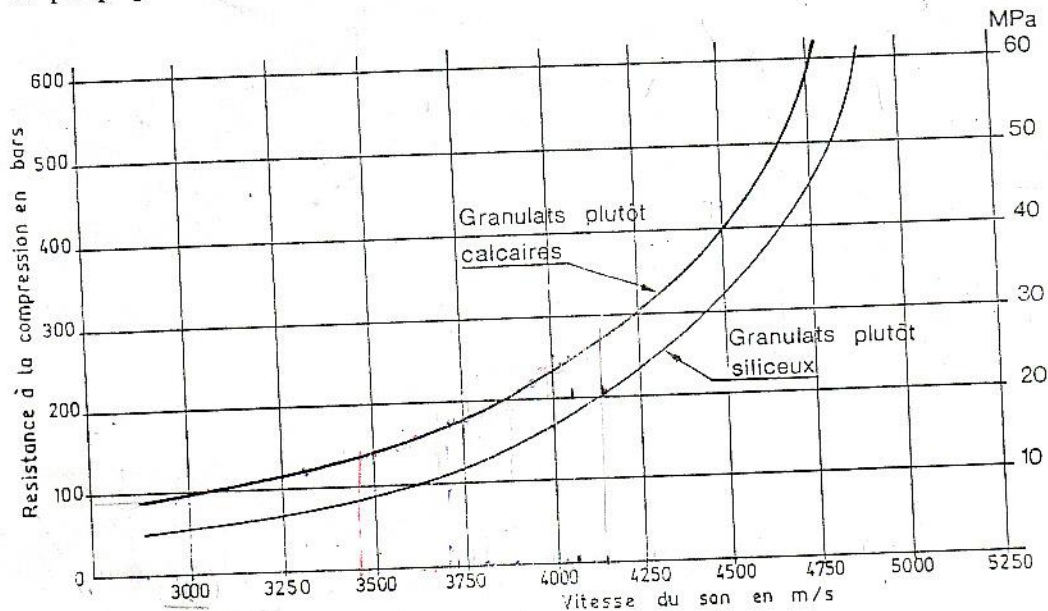


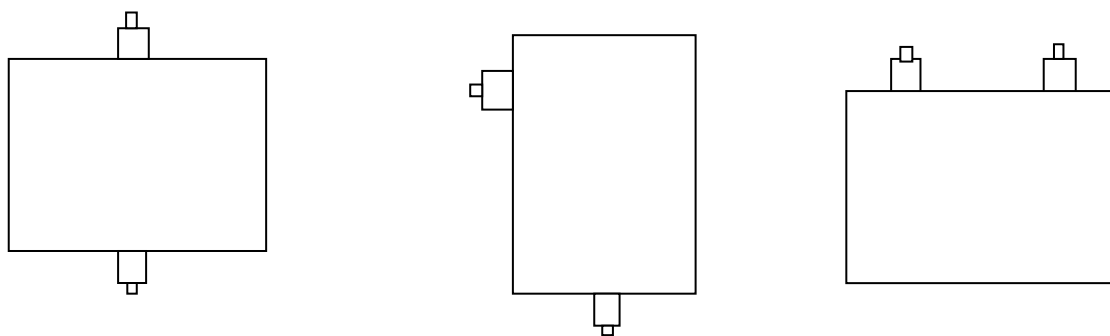
Figure I.3 : Courbe vitesse du son-résistance pour un essai ultrasonique.

La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, et une substance de gel contact qui peut être remplacée par la graisse est indispensable.

Il est possible de faire des mesures de vitesse de propagation en plaçant les deux transducteurs en opposition (transmission directe, Figure I.4.A), adjacents (transmission semi-directe, Figure I.4.B), ou sur le même plan (transmission indirecte ou de surface, Figure I.4.C).

La transmission indirecte est la moins précise et ne devrait être utilisée que lorsqu'une seule face du béton est accessible, ou lorsque la qualité de la surface du béton est d'intérêt par rapport à la qualité globale.

La transmission semi-directe consiste à placer les transducteurs sur des faces opposées mais pas directement en alignement. Cette transmission est utilisée que lorsque la transmission directe ne peut être mise en œuvre.



A-Transmission directe.

B-Transmission semi-directe.

C-Transmission indirecte

Figure I.4 : Types de propagation d'ondes

Le parcours doit être préférentiellement d'au moins 30 cm de façon à prévenir toute erreur occasionnée par l'hétérogénéité du béton, La distance de parcours de l'impulsion dépend de la nature de transmission :

En transmission directe, la longueur de parcours est la distance entre les deux transducteurs.

En transmission semi-directe, il est généralement suffisant de déterminer la distance de centre à centre des transducteurs

En transmission indirecte, il y a une certaine incertitude par rapport à la longueur exacte de la distance du parcours, liée à la dimension des surfaces de transducteur en contact avec le béton. Il est dès lors souhaitable d'effectuer une série de mesures à différents espacements de transducteurs afin d'éliminer cette incertitude.

La vitesse de propagation sera calculée en transmission directe et semi-directe selon la formule suivante :

$$V=L/T$$

Avec : V : vitesse de propagation de l'onde,

L : distance parcourue par l'onde,

T : temps de propagation de l'onde.

I.4.1.6-Relation vitesse du son-résistance :

D'une façon générale, la résistance augmente avec la vitesse du son. Cette dernière est fonction également de la nature des granulats employés. Mais c'est à nouveau une question de compacité et les granulats poreux ou légers en particulier, procurent pour une même résistance à la compression, une vitesse plus faible.

Chapitre I : Généralités sur les essais non destructifs

1-La vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques est directement liée à la résistance du béton. D'autres paramètres interviennent dans le calcul tel que le coefficient de poisson pouvant varier de 0,15 et 0,30 et la densité du béton.

2-Une présence de vides dans le béton (trous, fissures, ou nids de gravier) gênerait la transmission des ondes soniques donc diminuerait sensiblement la vitesse de propagation et par conséquent, pourrait affecter négativement les valeurs de résistance.

3-La présence d'armature dans le béton perturbe la vitesse de propagation. Il est donc souhaitable voire indispensable de choisir un parcours d'ondes le moins influencé possible par des armatures.

4- Habituellement, si de grandes différences dans la vitesse d'impulsion se trouvent dans une structure sans aucune raison apparente, il ya de fortes raisons de présumer que le béton défectueux ou détérioré est présent.

5- Hautes mesures de vitesse d'impulsions sont généralement indicatives de béton de bonne qualité.

6-Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau; entre 5 et 30°C (41 et 86°F), la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température.

En règle générale, le degré de dommage est lié à une réduction de la vitesse d'impulsion. Des fissures peuvent également être détectées. Un grand soin doit être exercé, dans l'utilisation de mesures de vitesse d'impulsion, car il est souvent difficile d'interpréter les résultats.

Le tableau ci-dessous récapitule la qualité du béton selon la vitesse du son :

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
< 2000	Très mauvais

Tableau I.1: Estimation de la qualité du béton selon la vitesse du son.

I.4.1.7-Facteurs influant la vitesse du son :

La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers un béton, d'une composition donnée, est influencée par les facteurs suivants :

- L'état de surface du béton ;
- La température du béton ;
- La longueur de la trajectoire de l'impulsion ;
- La présence d'armature ;
- L'humidité du béton ;
- Les dimensions de l'élément testé ;
- L'âge du béton.

I.4.1.8-Avantages et inconvénients d'un ultrason:

L'ultrason est un appareil:

- De très bonne précision de la détection (localisation et longueur du défaut),
- Sans danger,
- A privilégier si accessibilité d'un seul côté,
- Associé aux fortes épaisseurs,
- Meilleure sensibilité de contrôle pour les défauts filiformes (fissures, tapures, criques,...) d'orientation aléatoire,
- Résultat du contrôle en temps.

Néanmoins, l'ultrason présente aussi des inconvénients :

- Identification incertaine des défauts : classement en défauts volumiques ou défauts non volumiques (ou plans),
- Pas adapté aux faibles épaisseurs,
- Phase d'étalonnage importante,
- Subjectivité de l'interprétation de l'opérateur,
- Pas de trace du contrôle (hors PV).

Chapitre I : Généralités sur les essais non destructifs

En résumé, les essais d'auscultation dynamique à l'ultrason sont très efficaces pour contrôler la qualité du béton, et particulièrement pour évaluer l'homogénéité et détecter les fissures et les imperfections. Ces essais ne sont toutefois pas aussi efficaces pour évaluer la résistance de ce dernier à cause du grand nombre de variables influençant la relation entre la résistance et la vitesse de propagation des impulsions.

C'est une méthode qui requiert un assez haut niveau technique des opérateurs et qui est promise à un très bel avenir.

I.4.2-Les essais par scléromètre (norme P18-417) :

I.4.2.1-Généralités :

L'utilisation d'essais sclérométriques sur matériaux de construction, en particulier sur béton, date de plusieurs décennies. Le scléromètre est utilisé pour déterminer la dureté de surface du béton et il est l'un des instruments les plus répandus dans le domaine des contrôles non destructifs (CND) de la force de compression du béton. C'est la méthode la plus rapide et la plus économique pour évaluer la qualité et la résistance du béton.

Les scléromètres sont disponibles en version analogique ou digitale.

I.4.2.2-Définition et description :

Le scléromètre à béton a été introduit au début des années 1950. Il s'agit de l'appareil de mesures non destructives couramment utilisé pour évaluer rapidement l'état d'une structure. Au fil des années, son application s'est étendue aux tests de roche et aux tests de dureté de bobine de papier.

Il se présente sous forme d'un manchon cylindrique à l'intérieur duquel coulisse une tige de 10 à 20mm de diamètre. Sur la face cylindrique du scléromètre il y a :

- Une règle de mesure avec index.
- Un bouton poussoir à l'opposé de la règle de mesure.
- Un abaque permettant le calcul de la résistance du béton en fonction du rebond de la bille.

Sur une des extrémités du scléromètre il y a une sonde.

I.4.2.3-Caractéristiques du scléromètre :

Les constituants d'un scléromètre sont :

1. Élément vérificateur de contact (la sonde)
2. Surface à mesurer
3. Carcasse de l'appareil
4. Indicateur de la valeur de mesure
5. Echelle de mesure
6. Bouton
7. Baguette conductrice central
8. Flanc conducteur
9. Couvercle inférieur de la carcasse
10. Crochet
11. Couvercle supérieur de la carcasse
12. Carcasse du ressort
13. Suspension du ressort
14. Percuteur réel
15. Anneau amortisseur
16. Anneau percuteur léger
17. Emplacement de l'anneau tenseur
18. Anneau en feutre
19. Pivot
20. Ecrou
21. Taquet d'entraînement pour l'indicateur
22. Enclave du taquet d'entraînement
23. Suspension
24. Fixation de la suspension (coussin)

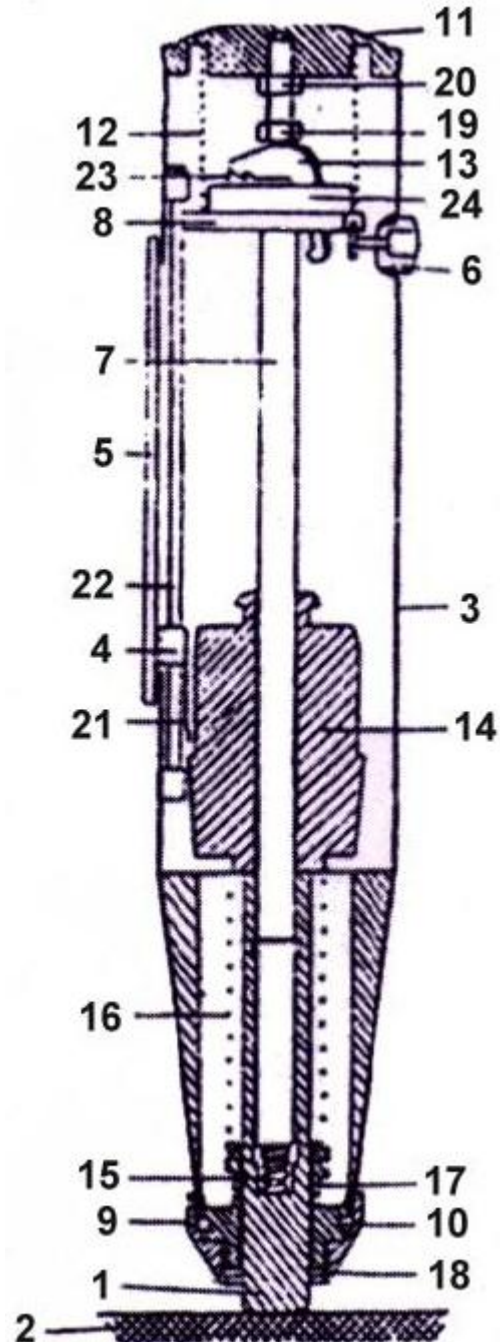


Figure 5 : Coupe longitudinale d'un scléromètre.

I.4.2.4-But et principe d'utilisation :

La mesure de dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité, elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité du béton d'un ouvrage, tester l'homogénéité du béton in situ pour déterminer des zones de faible qualité, et d'obtenir une estimation rapide de la résistance du béton d'un ouvrage sans procéder à des prélèvements de béton durcit par carottage.

Le principe de cet appareil est basé sur le principe de Schmidt qui consiste à placer la tige contre la surface à tester, en appuyant fortement sur le manchon, on fait pénétrer la tige dans l'ouvrage, jusqu'au moment où un déclic se produit, libérant une masse qui frappe la tige contre la surface.

Un index donne alors la mesure de l'essai sur une règle graduée placée sur le manchon extérieur, ces valeurs sont appelées indices sclérométriques. Faire l'essai plusieurs fois sur la même surface.

Après avoir lu les indices sclérométriques, il faut calculer la moyenne arithmétique, puis déterminer la résistance en se reportant aux graphiques ou aux tableaux dessinés sur le manchon qui varient d'un appareil à un autre.

I.4.2.5-Méthodologie:

Le scléromètre peut être utilisé en laboratoire comme sur chantier. Dans tous les cas, il doit être correctement étalonné pour avoir des résultats précis et définir l'indice sclérométriques I_s minimum correspondant au seuil de résistance garanti. L'étalonnage peut être effectué avec des éprouvettes cylindriques constituées du même ciment et des mêmes granulats que ceux utilisés pour l'ouvrage.

1. Choix des zones d'essai :

On doit éviter la face de coulée ou la face opposée, faire l'essai, sur des surfaces lisses. La zone choisie doit être représentative et comprendre les régions fortement sollicitées et les régions soupçonnées être faible dans l'élément.

Pour avoir une idée correcte de la valeur de résistance du béton, il est nécessaire de réaliser un nombre important de mesures. Il est recommandé de définir sur la surface à essayer des zones d'environ 400cm^2 , soit des carrés de 20×20 cm, d'éliminer toute peinture ou enduit adhérent susceptible de fausser les mesures, qui pourrait s'y trouver et d'opérer environ de 20 à 27 mesures par zone, la distance entre deux points de mesures étant 2 à 3cm.

Chapitre I : Généralités sur les essais non destructifs

La surface à tester doit être débarrassée de tout film avec une ponceuse par conséquent la surface d'un béton âgé devra être poncée jusqu'à 10mm de profondeur.

Notre essai donne des résultats valables si l'on considère la moyenne d'un assez grand nombre de points (une douzaine environ) puisqu'on a à tester des éprouvettes dont la surface est limitée.

2. Choix des points d'essai :

On doit éviter les régions proches des arêtes de l'élément (au moins 5cm pour les coffrages en bois et 3 cm pour les coffrages en acier).

La distance entre deux points d'essai doit être d'au moins 2cm, pour éviter l'influence du compactage superficiel dû au coup du scléromètre.

Ne pas faire d'essai dans les pores visibles à la surface du béton ou sur les gros granulats (gravier ≥ 7 mm).

Le mode opératoire de l'essai est le suivant :

- Placer la sonde à l'endroit de la mesure,
- Presser l'appareil contre l'élément à ausculter jusqu'au déclenchement de la projection de la bille,
- Presser le bouton poussoir,
- Tout en maintenant le bouton poussoir enfoncé, relâcher la presse exercée sur la sonde,
- La sonde reste bloquée, relâcher le bouton poussoir,
- Noter l'indice sclérométriques,
- Effectuer cette mesure plusieurs fois sur la zone d'ouvrage testé.

I.4.2.6-Comment interpréter les résultats obtenus par scléromètre?

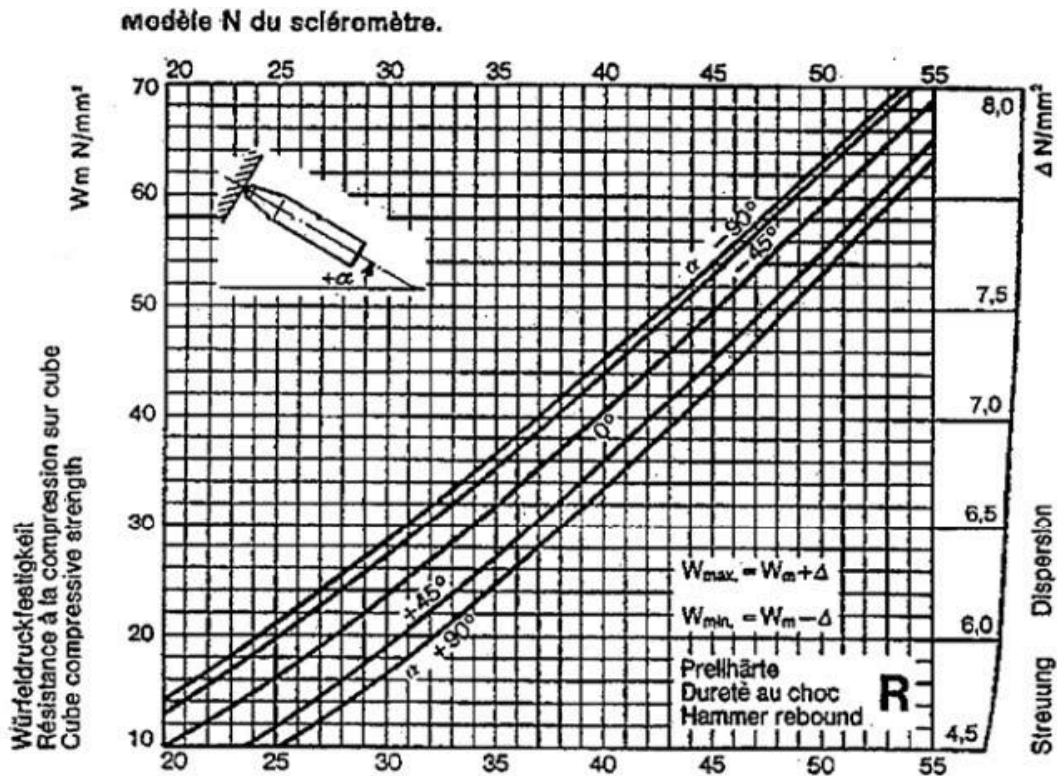
L'indice sclérométriques d'une éprouvette est la moyenne des douzes mesures, effectuées sur l'éprouvette ou sur la zone d'ouvrage testé.

Les valeurs faibles correspondent généralement à des impacts effectués sur des zones poreuses, alors que les valeurs très élevées correspondent à des impacts réalisés sur de grands agrégats.

Chapitre I : Généralités sur les essais non destructifs

Chaque appareil est livré avec des abaques, qui donnent la relation entre cet indice et la résistance en compression du béton. Par report de l'indice sclérométriques sur l'abaque de la norme et en considérant l'inclinaison du scléromètre, on obtient la résistance en compression de l'éprouvette ou du béton de l'ouvrage.

L'appareil le plus connu est le scléromètre de Schmidt dont les courbes de transformation pour le type N sont données ci-après.



Les courbes sont valables pour des bétons au ciment Portland compacts avec matériau sable-gravier résistant. Age de 14 à 56 jours. Surface du béton lisse et sèche.

W_m = valeur la plus probable de la résistance à la compression sur cube. Les limites de dispersion $W_{max.}$ et $W_{min.}$ sont définies ainsi: elles comprennent 80% de la totalité des essais.

Figure I.6: Abaque déterminant la dureté du béton (20)

Remarque :

On remarque que les abaques donnés ci-dessus indiquent les valeurs de résistance pour un cube. Pour déterminer les résistances d'un cylindre, il suffit de multiplier ces résistances par un coefficient de corrélation qui vaut 0,85.

$$\text{Résistance d'un cylindre} = \text{résistance d'un cube} \times 0,85.$$

I.4.2.7-Les différents types de scléromètre :

Le scléromètre à béton a été développé par Ernst O. Schmidt et introduit au début des années 1950.

Il existe deux modèles de scléromètre, l'un étant simplement manuel, l'autre enregistreur, on choisi le modèle à utiliser selon la capacité, les options et les domaines d'utilisation. Le dernier modèle de la famille des scléromètres est le Silver Schmidt, le scléromètre à rebond le plus avancé.

1) Original Schmidt série N/L :

Les scléromètres à rebond sont disponibles avec différentes énergies d'impact pour permettre aux clients de tester un large choix de matériaux et de types de structures.

La plage de mesure de ce type de scléromètre est 10 à 70 Mpa. La valeur de rebond est directement lue de l'échelle. Les applications types sont le test d'uniformité, l'identification des zones où la qualité du béton est médiocre et l'évaluation de la résistance à la compression. L'Original Schmidt type L est l'option idéale pour tester les éléments à parois minces dont l'épaisseur est comprise entre 50 et 100 mm ou pour analyser les petits composants. Il sert également à examiner les composants en simili-pierre qui sont sensibles aux impacts. En mécanique des roches, l'Original Schmidt type L est généralement utilisé pour la classification des roches.



Figure I.7: Scléromètre original Schmidt série N/L

2) Original Schmidt série NR/LR :

C'est une version éprouvée avec valeurs d'impact enregistrées sur du papier nominatif pour un contrôle plus facile. Simplifie grandement le calcul de la valeur de rebond et le contrôle de l'uniformité de l'objet testé.

Chapitre I : Généralités sur les essais non destructifs

La plage de mesure de ce type est 10 à 70Mpa. Les valeurs de rebond sont enregistrées sous forme de diagramme à barres sur du papier nominatif. Une bobine de papier peut enregistrer jusqu'à 4000 frappes.



Figure I.8 : Scléromètre original Schmidt série LR/NR.

3) Digi-Schmidt série ND/LD :

Le premier scléromètre à rebond digital au monde avec stockage de données, correction de l'angle d'impact et affichage direct de la résistance à la compression. Il permet également de corriger le facteur de forme et les carbonations. On est accompagné d'un certain nombre de courbes de corrélation préprogrammées, permettant à l'utilisateur de sélectionner celle qui convient le mieux au béton testé.

La plage de mesure est de 10 à 70 Mpa. Les valeurs de rebond sont stockées dans l'appareil d'affichage électronique et peuvent être converties automatiquement en valeurs de résistance à la compression. L'ensemble des données et paramètres peut être transféré vers un ordinateur en vue d'une évaluation ultérieure avec le logiciel Pro Vista. La capacité de la mémoire de l'appareil d'affichage est suffisante pour 250 séries de mesure de 10 frappes chacune.



Figure I.9: Scléromètre digi-Schmidt série LD/ND.

4) Silver Schmidt série N/L (ST/PC) :

Le scléromètre à rebond le plus abouti avec des caractéristiques de dispersion, une durabilité et une plage de mesure inégalées. Il se distingue par sa conception compacte, sa légèreté et son absence de maintenance. Il est compatible avec un large éventail d'applications et n'est pas affecté par l'angle d'impact. Les courbes de corrélation définies par l'utilisateur pour les mélanges spécifiques à ce dernier peuvent être chargées sur le scléromètre afin d'obtenir la meilleure évaluation possible de la résistance à la compression.

Sa plage de mesure est de 10 à 100 Mpa. Une plage étendue peut être obtenue avec les courbes définies par l'utilisateur. Le Silver Schmidt crée une nouvelle référence pour les tests avec le scléromètre à rebond. Il présente un principe de mesure unique et une mécanique entièrement repensée. Des tests de validation indépendants réalisés par le BAM de Berlin ont montré que le Silver Schmidt présente moins de dispersion que le scléromètre classique sur toute la gamme. Son indépendance intrinsèque en termes d'angle de frappe élimine entièrement toute source possible d'erreur utilisateur. Une mémoire importante, l'évaluation automatique selon des critères statistiques prédéfinis et les outils d'analyse logicielle améliorent nettement l'application d'évaluation de conformité. Le Silver Schmidt facilite la création de courbes de conversion personnalisées spécifiques à la composition du béton testée, augmentant ainsi sensiblement la validité des estimations de résistance à la compression. Cette procédure est recommandée dans toutes les directives et normes internationales pertinentes.



Figure I.10 : Scléromètre Silver Schmidt série N/L.

Remarque :

- **Type N (normal)**: Son énergie d'impact standard est de 2,207 Nm. L'objet testé doit avoir une épaisseur minimale de 100mm et être solidement fixé dans la structure.
- **Type L (léger)** : Il possède une faible énergie d'impact: 0,735 Nm. Il sert au contrôle des éléments en béton de faible dimensions t sensible au choc (exemple : voile d'une construction en béton armé).
- **Type M (lourd)** : Son énergie de percussion est de 29.43 Nm. Il sert spécialement au contrôle du béton des grandes structures (exemple : culée d'un pont) et au contrôle de qualité des routes et du béton des pistes d'aérodrome.

5) Tige de percussion avec capuchon :

La tige de percussion avec capuchon est conçue pour fonctionner exclusivement avec le Silver Schmidt PC type L afin de mesurer le béton frais ou à faible résistance, 5 - 30 Mpa. Parmi ces applications figurent le retrait de coffrage et le contrôle du développement de la résistance dans les revêtements de tunnel.



Figure I.11: tige de percussion avec capuchon.

6) Le scléromètre type PT/P/PM :

Type PT : Plage de mesure 0,2 à 5 Mpa utilisé pour le contrôle du plâtre et des bétons légers.

Type P : Plage de mesure 5 à 30 Mpa pour évaluer la résistance initiale du béton traité thermiquement.

Type PM : Il est utilisé pour contrôler la qualité du mortier dans la maçonnerie.



Figure I.12 : Scléromètre PT



Figure I.13: Scléromètre P



Figure I.14: Type PM

Selon la nature du produit à tester, il convient de choisir le modèle dont l'énergie de percussion est adaptée (voir tableau ci-dessous source : fiche 37 du laboratoire de CND, France) :

Matériau à tester	Modèles de scléromètre	Energie de percussion
Elément de faible dimensions et sensible aux chocs.	L-LR	0,735 joules
Matériau léger, revêtement, enduit.	P	0,883 joules
Matériau très léger, béton jeune, mousse, plâtre.	PT	0,883 joules
Béton : bâtiments, ouvrages d'art.	N-NR	2,207 joules
Béton : route, ouvrages de grandes dimensions (barrages).	M	29,430 joules

Tableau I.2 : Choix du modèle du scléromètre selon le matériau à tester.

I.4.2.8-Facteurs influant la valeur de l'indice sclérométrique:

Pour déterminer la valeur de l'indice sclérométrique caractérisant la dureté superficielle du béton, certains paramètres sont à prendre en considération :

- 1-La position du scléromètre ;
- 2-L'état d'humidité du béton.
- 3-l'égalité de la surface.
- 4-La grosseur et la forme de l'éprouvette
- 5-Le type de ciment et de gros granulats ainsi le degré de carbonatation de la surface.

I.4.2.9-Combinaison scléromètre-carottage :

Un essai combiné est un essai où on trouve deux systèmes d'essais à la fois. La combinaison scléromètre-carottage se fait selon la norme algérienne NA 17004 en suivant la procédure ci-dessous :

Définir la zone d'essai, c'est à dire la zone où on veut connaître la qualité du béton. Elle peut être des fondations, des poteaux, des voiles, des dalles ou des poutres.

Définir dans la zone d'essai 15 aires ($a_1, a_2, a_3, \dots, a_{15}$).

Dans chaque aire d'essai, on fait douze coups de scléromètre.

On classe les indices sclérométriques du plus fort au plus faible et on élimine les deux valeurs extrêmes, on obtient donc 10valeurs pour chaque aire.

On fait la moyenne arithmétique des 10valeurs pour chaque aire ($Ma_1, Ma_2, \dots, Ma_{15}$).

On obtient 15moyennes arithmétique ($Ma_1, Ma_2, \dots, Ma_{15}$) et on les classe de la plus forte à la plus faible valeur.

On élimine les douze premières moyennes supérieurs, en ne laissant que les trois moyennes qui sont les plus faibles.

Au niveau des aires des trois plus faibles moyennes, on extrait une carotte dans chaque aire, soit alors trois carottes.

On écrase les trois carottes et on ne retient que la plus faible d'entre elles qui sera la résistance minimale.

On compare cette dernière valeur à la valeur donnée par le scléromètre.

I.4.2.10-Avantages et limites d'un scléromètre :

L'utilisation de scléromètre est une méthode peu coûteuse, simple et rapide pour connaître la résistance du béton, mais une précision entre ± 15 et $\pm 20\%$ n'est possible qu'avec des éprouvettes qui ont été coulées et soumises à un traitement de cure et à des essais dans les conditions pour lesquelles les courbes d'étalonnage ont été établies. Les résultats sont influencés par des facteurs tels que l'égalité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette, le degré d'humidité du béton, le type de ciment et de gros granulats et le degré de carbonatation de la surface.

I.5-Conclusion :

Il est évident que les essais non destructifs, en raison de leur simplicité, de leur coût et de la possibilité qu'elles confèrent à l'ingénieur d'ausculter à volonté, sur ouvrage ou sur éprouvette, à n'importe qu'elles âge du béton, suscitent un intérêt particulier chez les chercheurs, qui tentent d'établir des relations empiriques entre les résultats d'essai non destructif (indice sclérométrique, vitesse de propagation des ultrasons) et la résistance à la compression obtenue par écrasement sous presse hydraulique.

L'utilisation de méthodes d'évaluation dites « non destructives » s'avèrent indispensable lorsqu'il s'agit d'ouvrages existants et en fonctionnement et permet de suivre leurs évolutions au cours du temps.

Leur utilisation a augmenté le niveau de sécurité de la construction et contribue également à améliorer sa planification. Tout cela, garde son économie dans les limites considérables.

Chapitre II : Présentation du matériau

II.1-Généralités :

Le béton occupe, depuis son invention, la première place en volume d'utilisation des matériaux dans le domaine du bâtiment et du génie civil. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité et son faible coût. Il présente également d'autres qualités, telles une excellente tenue au feu, une grande résistance aux chocs, une bonne protection contre les radiations nucléaires, etc.... Toutefois, le matériau béton doit s'adapter de manière continue à de nouvelles exigences et à de nouveaux besoins. Ce béton est fabriqué puis mis en place en phase fluide, il durcit et se consolide ensuite, ce qui permet des réalisations techniques extrêmement variées.

Certes, on peut construire avec d'autres matériaux tels que les charpentes bois, charpente métallique, maçonneries (pierres, briques) éventuellement avec du verre ..., mais avec des utilisations limitées pour cause de leur coût très élevé par rapport à celui du béton et parfois pour leurs propriétés technologiques inadaptées. Ils sont alors souvent utilisés en complément des structures de béton qui, du fait de leurs caractéristiques et de leur coût économique, assurent l'ossature et la tenue des édifices. De par sa nature et son mode opératoire de fabrication, le béton se différencie des autres matériaux. Il ne se classe pas selon sa résistance mécanique ou sa tenue en milieu humide comme le bois, mais il se choisit et s'adapte par rapport aux spécificités et caractéristiques techniques du projet où il sera utilisé. Il est le matériau polyvalent par excellence. Selon la formule utilisée pour le fabriquer, ses propriétés différeront et le rendront unique par rapport aux autres.

L'association du béton avec une structure métallique, constituant une armature au sein du matériau, augmente très fortement ses propriétés en termes de résistance et de ductilité et permet de réaliser des ouvrages autoportés ou suspendus, de très grande envergure.

La performance des bétons ordinaires dépend de la nature des matériaux constituant son mélange.

II.2-Les constituants d'un béton :

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment, d'eau et d'éventuel adjuvant.

Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit.

La pâte de ciment hydratée et le sable constituent le mortier.

Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide (roche sédimentaire détritique dont les éléments, de taille $>2\text{mm}$ se consolide par un ciment). Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

Chapitre II : Présentation du matériau

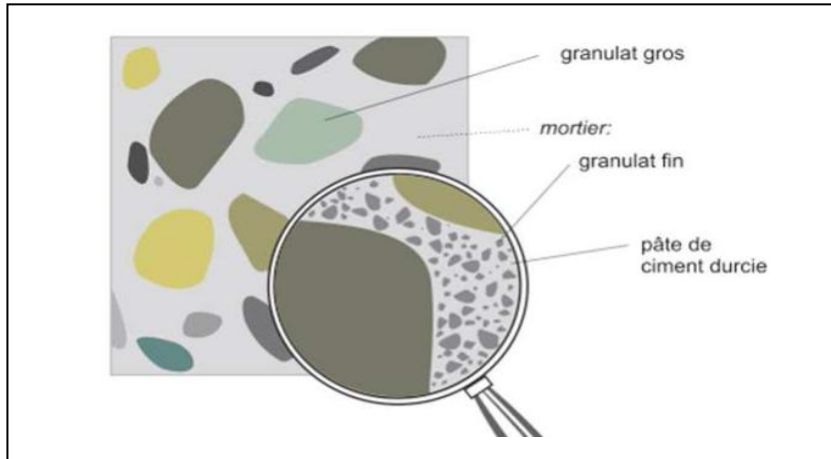


Figure II.1 : Composants d'un béton

II.2.1-Le ciment :

II.2.1.1-Introduction :

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence de l'eau. Plus la poudre est plus fine, plus la réaction d'hydratation s'opère rapidement. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

C'est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminate de calcium porté de 1450 à 1550°C, température de fusion.

II.2.1.2-Principe de production du ciment portland :

La fabrication du ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes :

- Préparation du cru ;
- Cuisson ;
- Broyage et conditionnement.

Il ya 4 méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau :

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication du ciment par voie semi-sèche).

La composée de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminate de calcium résultant de la combinaison de la chaux CaO avec la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3 , et l'oxyde de fer Fe_2O_3 . La roche nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la

Chapitre II : Présentation du matériau

silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne qui contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autre oxyde en particulier Fe_2O_3 , l'oxyde ferrique.

Le principe de la fabrication de ciment est le suivant : calcaire et argiles sont extraits des carrières puis concassés, homogénéisés, portés à haute température « 1450°C » dans un four.

Le produit obtenu après refroidissement rapide « la trempe » est le clinker.

Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au-delà de 100°C , le départ d'eau d'avantage liée. A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique « CO_2 » et en chaux CaO , du calcaire qui est le carbonate de calcium « CaCO_3 ».

Le mélange est porté à $1450\text{-}1550^\circ\text{C}$, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention de différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante : une partie de CaO est retenue par Al_2O_3 et Fe_2O_3 en formant une masse liquide. SiO_2 et CaO restant, réagissent pour donner le silicate bi calcique dont une partie se transforme en silicate tri calcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné.

II.2.1.3-Constituants principaux et additions :

- **Constituants du clinker :**

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont :

- | | | |
|---|----------------------------------|--|
| 1-Le silicate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | (C_3S) | (50 à 70% du clinker). |
| 2-Le silicate bicalcique $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | (C_2S) | (10 à 30% du clinker). |
| 3-L'aluminate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ | (C_3A) | (2 à 15 % du clinker). |
| 4-L'alumino-ferrite tétra calcique
(C_4AF) | (Ferro-aluminate tétra calcique) | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
(5 à 15% du clinker). |

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O , K_2O), de la magnésie (MgO), et diverse traces de métaux. La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durcit.

A l'aide de microscope, on peut distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases auxquelles les chercheurs donnent les noms suivants :

Chapitre II : Présentation du matériau

A = alite (phase cristallisée), se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grand (grains anguleux foncé).

B = bélite (phase vitreuse), se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).

C = célite (phase vitreuse légèrement foncée et claire) se trouve dans le clinker sous forme impure et de phase vitreuse.

- **Les autres constituants du ciment :**

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse destinée à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute d'autres constituants associés au clinker pour leurs caractéristiques chimiques ou physiques spécifiques. Les constituants les plus utilisés sont :

Constituants	Observations
Calcaires	-Considérés comme les constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter en proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75% en masse.
Laitier granulé de haut fourneau	-Sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques, obtenus par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.
Cendres volantes (V ou W)	-Produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue : Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés Pouzzolanique et les cendres volantes calciques (W).
Schistes calcinés	-Schistes portée à une température 800°C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et Pouzzolanique.
Fumé de silice	-Sous produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. -Formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de $0,1\mu\text{m}$). Elles ont des propriétés Pouzzolanique.
Fillers	-Constituants secondaires des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5% en masse dans la composition du ciment. -Matière minérale, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau)

Tableau II.1: Ajouts cimentaires.

Chapitre II : Présentation du matériau

II.2.1.4-Catégorie de ciment :

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

a. En fonction de leur composition :

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 4 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) :

- CEM I: Ciment Portland (CPA).
- CEM II: Ciment Portland composé (CPJ).
- CEM III: Ciment de haut fourneau(CHF).
- CEM IV : Ciment Pouzzolanique(CPZ).

b. En fonction de leur résistance normale :

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; des sous classes « R » sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées.

Désignation de la classe	Sous classe éventuelle	Résistance à la compression en bars		
		A 2jours minimaux	A 28jours minimale	Maximale
350	.....	.....	250	450
450	.....	.....	350	550
	R (rapide)	150	350	550
550	.....	.....	450	650
	R (rapide)	225	450	650
THR très haute performance	.....	300	550	.....

Tableau II.2 :Résistance à la compression

II.2.2-Les granulats :

Le granulat est un élément essentiel dans le béton, il est constitué d'un ensemble de grains minéraux, sa dimension est comprise entre 0 et 125mm. Leur nature et leur forme varient en fonction des gisements et des techniques de leur production.

Chapitre II : Présentation du matériau

Les granulats utilisés pour réaliser un béton doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité et doivent permettre aussi, d'une part, de remplir correctement et en totalité le moule ou le coffrage et, d'autre part, d'assurer un enrobage correct des armatures.

Ils sont destinés à être mis en œuvre soit directement, sans liant pour les solidariser (ballast des voies de chemin de fer, couche de fondation des routes, remblais...) soit on les solidarise avec un liant (ciment pour le béton, bitume pour les enrobés...).

Les granulats constituent le squelette du béton, la régularité de leurs caractéristiques conditionne donc celles du béton.

❖ Classification des granulats :

On peut classer les granulats en fonction de leur granularité déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à maille carrées dans une série normalisée. On distingue plusieurs familles de granulats :

- ✓ Fillers 0/D où $D \leq 2\text{mm}$ et contenant au moins 70% de passant à 0,063.
- ✓ Sablons 0/D où $D \leq 1\text{mm}$ et contenant moins de 10% de passant à 0,063mm.
- ✓ Sable 0/D où $D \leq 6,3\text{mm}$ sauf les sables pour béton où $D \leq 4\text{mm}$.
- ✓ Graves 0/D où $D \geq 6,3\text{mm}$.
- ✓ Gravillon d/D où $d \geq 1\text{mm}$ et $D \leq 31,5\text{mm}$.
- ✓ Cailloux d/D où $d \geq 20\text{mm}$ et $D \leq 125\text{mm}$.

Remarque :

La famille dite ballast d/D où $d \geq 25\text{mm}$ et $D \leq 50\text{mm}$ est complètement contenue dans la famille dite cailloux d/D où $d \geq 20\text{mm}$ et $D \leq 125\text{mm}$. C'est pour cela qu'elle n'est pas citée dans la classification précédente.

Les granulats utilisés pour la confection des bétons sont :

- les fillers ;
- les sables ;
- les gravillons ;
- les graves.

Chapitre II : Présentation du matériau



Figure II.2: Différents types de granulats

Les granulats doivent être des matériaux de qualité et satisfaire notamment deux exigences :

- la propreté, particulièrement importante pour les sables ; la teneur en fines argileuses est strictement limitée ;
- la granulométrie, propriété géométrique essentielle d'un granulat, dont le bon choix est déterminant dans la formulation d'un béton compact.

Les granulats (gravillons et sable) ont des effets sur la résistance mécanique et sur la consistance du béton de plusieurs manières :

- Par leur qualité mécanique ;
- Par la capacité d'adhérence de ces granulats avec la pâte liante ;
- Par la forme de ces granulats (roulés ou concassés) ;
- Par le diamètre maximal des granulats ;
- Par la compacité du mélange granulaire formé ;
- ...

Chapitre II : Présentation du matériau

Un granulat, en fonction de son origine et sa nature peut être naturel, artificiel, ou recyclé.

a. Les granulats naturels :

Les granulats naturels sont issus de roches meubles ou massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tel que concassage, broyage, criblage et lavage). Les roches meubles (matériaux alluvionnaires) sont exploitées le long des fleuves et des rivières. Les roches massives calcaires constituent les bassins sédimentaires et les chaînes récentes; les roches massives éruptives constituent les massifs anciens.

1-Les granulats de roche meuble (matériaux alluvionnaires), dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires. Ils sont exploités à proximité des cours d'eau, dans la nappe ou au-dessus de la nappe ou sur des fonds marins peu profonds. L'extraction est donc réalisée en fonction du gisement à sec ou dans l'eau.



Figure II.3: Extraction des granulats à proximité des grandes métropoles.

2-Les granulats de roche massive, (de carrière), La carrière peut être implantée en plaine sur un plateau ou en montagne au bord d'une falaise. Ils sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage.

Chapitre II : Présentation du matériau

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que le quartz et quartzites ou de roche éruptives telles que les basaltes, les granites et les porphyres.

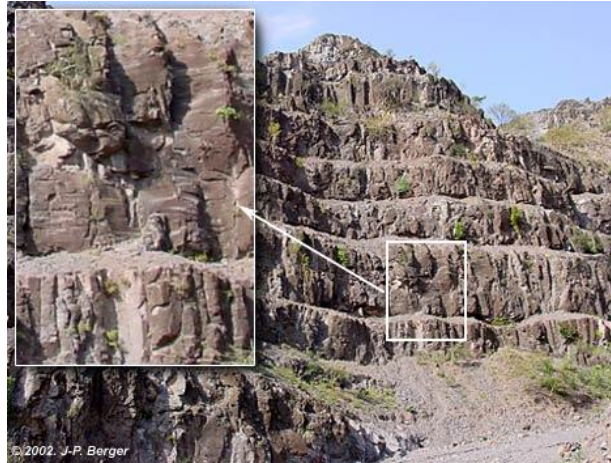


Figure II.4: Découpage en blocs parallélépipédiques de la **roche massive** en place.



Figure II.5: Granulat issu d'une roche éruptive

Figure II.6: Roche sédimentaire.

✓ Production des granulats :

La production des granulats à partir de roches meubles ou massives, nécessite les principales étapes suivantes.

- **Le décapage** consiste à enlever les terres situées au-dessus de la zone à exploiter.
- **L'extraction** s'effectue dans des carrières. Les techniques mises en œuvre dépendent du type de gisement :

Chapitre II : Présentation du matériau

– gisement de granulats alluvionnaires exploité en terrain sec (au moyen d'engins de terrassement) ou en site immergé (au moyen par exemple de drague) ;

– gisement compact de roches massives qui nécessite l'emploi d'explosif, l'abattage et la fragmentation des blocs.

• **Le traitement** fait suite à l'extraction des matériaux, qui sont concassés et broyés (au moyen d'appareils travaillant par chocs ou écrasement) afin de réduire leur taille, criblés (au moyen de cribles vibrants) pour obtenir des granulats de tailles différentes, puis lavés (afin d'éliminer les éléments de pollution et les fines) ou dépoussiérés et enfin stockés. Les opérations de traitement permettent d'obtenir des granulats répondant à des spécifications précises quant à leurs caractéristiques géométriques et physiques pour des usages particuliers.

• **La remise en état du site** a lieu après exploitation.

b. Les granulats artificiels :

Les granulats artificiels sont généralement soit plus lourd, soit plus léger que les granulats ordinaires. Des granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usages spécifiques. Ils sont d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou chimiques.

Les transformations se font à haute température (1000 à 1200 °C), dans un four rotatif, de nodules d'argile ou de schiste produit d'une part un dégagement gazeux au sein de chaque nodule sous l'effet de réactions chimiques internes, ce qui entraîne l'expansion du nodule, d'autre part une vitrification de la couche externe. Par conséquent, on obtient un granulats plus gros, avec une grande porosité, donc des granulats légers.

Dans cette catégorie se rangent les granulats légers transformés, comme l'argile expansée (Figure II.7 a) et II.7 b)), le schiste expansé (Figure II.7 c)).

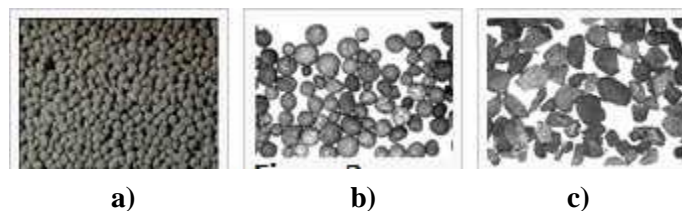


Figure II.7: Illustration des granulats expansés : a) l'argile ; b) et c) schiste.

Chapitre II : Présentation du matériau

c. Les granulats recyclés :

Ce sont essentiellement des granulats obtenus pour recyclage de béton de démolition. Ils peuvent être de diverses natures selon la nature du déchet à recycler. Ce déchet subit différents traitements (concassage, tri, calibrage, nettoyage...) pour le rendre apte à l'utilisation. Les granulats recyclés sont obtenus par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

L'utilisation des granulats recyclés permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions, due soit aux catastrophes naturelles soit à la démolition des vieux bâtis, donc participer à réduire les décharges dans la nature, comme elle protège la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats naturels.

II.2.3-L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est la quantité totale d'eau que l'on utilise pour faire un béton, c'est un constituant indispensable pour la fabrication de ce dernier. Sa qualité influe les caractéristiques du béton à l'état frais et l'état durcit.

De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer l'eau de mer, qui contient environ 30g/l de chlorure de sodium, pour la fabrication de béton armé ou précontraint.

L'eau est nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton. Sa quantité varie avec un très grand nombre de facteurs (dosage en ciment, granulats, consistance recherchée du béton frais) ; elle est en général comprise entre 140 et 200 l/m³.

Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ses performances: résistance mécanique à la compression et durabilité.

II.2.4-Les adjuvants :

Contrairement au ciment, aux granulats, et à l'eau, les adjuvants ne sont pas essentiels au béton, mais sont cependant un constituant important de plus en plus utilisé, au point que, actuellement dans la majorité du pays un béton confectionné sans adjuvant est une exception.

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés aux bétons frais en faible quantités(en générale moins de 3% du poids du ciment) afin d'en améliorer certaines propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton. Les principaux adjuvants sont :

Chapitre II : Présentation du matériau

II.2.4.1-Les fluidifiants (ou réducteur d'eau) :

Ces produits jouent un double rôle. Ils sont utilisés soit pour fluidifier le béton en maintenant le rapport (E/C) constant, (rapport prévu pour une résistance donnée), donc fluidifier sans apport d'eau. Ou bien, réduire le rapport (E / C) pour avoir de meilleurs résistance tout en ayant la même fluidité du béton.

Dans le premier cas, l'ajout du fluidifiant va nous permettre d'avoir des bétons de même classe de résistance mais de consistance variable allant d'un béton ferme, béton plastique, béton très plastique jusqu'au béton auto-plaçant.

La durée d'action des fluidifiants est très variable, elle dépend de la fabrication du béton, elle est courte pour les bétons fabriqués sur chantier et elle doit être longue pour les bétons fabriqués en centrales à béton. Pour ces derniers, le béton doit rester fluide toute au long de la durée du transport, jusqu'à la mise en place.

La quantité de fluidifiant à introduire dans une formule de béton ne doit pas être trop élevée (proche du dosage à saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Le dosage à saturation des fluidifiants est déterminé expérimentalement à partir d'essais sur des mortiers (ou bétons) frais. Dans certaines littératures, on les appelle plastifiant ou super-plastifiant.

- **Domaine d'utilisation :**

- Nécessité d'une bonne ouvrabilité du béton ;
- Béton à hautes résistances ;
- Béton très ferrailé ;
- Sable manquant de fines ;
- Béton coulé sous l'eau
-

II.2.4.2-Les retardateurs de prise :

Ceux sont des adjuvants qui prolongent la durée de vie du béton frais. Les réactions d'hydratation sont exothermiques ; elles sont accélérées par l'apport de chaleur. Ainsi le bétonnage en temps chaud ou bien d'éléments massifs (où la température au cœur du béton peut atteindre 80°C) accélère la cinétique d'hydratation du ciment. En effet, l'accélération des réactions d'hydratation a des effets négatifs sur les résistances à long terme du béton. Dans le cas des ouvrages massifs, il y a apparition précoce de la fissuration.

Pour remédier à ces difficultés il est donc conseillé d'utiliser des retardateurs de prise. Ainsi, dans le cas du bétonnage en temps chaud ou bien d'éléments massifs, il est conseillé d'utiliser un retardateur de prise pour freiner les réactions d'hydratation et aussi réduire la

Chapitre II : Présentation du matériau

chaleur au cœur du béton, de manière à ce que les propriétés de ce dernier soient préservées et le béton ne fissure pas.

Grâce aux retardateurs de prise il est possible d'effectuer des reprises de bétonnage après plusieurs heures d'interruption avec certaines précautions (protection contre la dessiccation). Il permettent aussi de transmettre sans problème tous les bétons sur de grandes distances quelle que soient les conditions (températures, risques d'embouteillage, etc.).

- **Domaine d'utilisation :**

- Bétonnage au temps chaud ;
- Transport du béton sur longue distance ;
- Coulage en continu ;
- Reprise de bétonnage ;
- Injection à grande profondeur ;
- Parois moulée dans le sol ;
-

II.2.4.3-Les accélérateurs de prise :

Le bétonnage en temps froid ralentit les réactions d'hydratation du ciment, par conséquent, il entraîne du retard sur les durées du décoffrage. Les accélérateurs de prise sont très utilisés dans les bétons de préfabrication car ils permettent d'atteindre des résistances convenables au jeune âge, cela permet de réduire le temps d'étuvage et accélère donc le processus de fabrication. Les accélérateurs de prise permettent de réduire les délais de chantier, car ils permettent d'atteindre les résistances prévues pour 28 jours à des âges avancés. Mais il faut faire attention à la résistance à plus long terme, qui va en baisse par rapport à celle d'un béton sans accélérateurs de prise.

Ils sont généralement utilisés pour le bétonnage à temps froid pour accélérer la prise et le durcissement du béton à dosage normal. Il permet de gagner du temps pour la réalisation des ouvrages. Généralement, on utilise l'adjuvant minéral de chlorure de calcium.

- **Domaine d'utilisation :**

- Décoffrage rapide ;
- Bétonnage en temps froid ;
- Béton préfabriqué ;
- Travaux d'étanchement, cachetage, travaux à la mer (entre deux marées) ;
- Réparation rapide, pistes d'aérodromes, routes ;

Chapitre II : Présentation du matériau

II.2.4.4-Les entraîneurs d'air

Les entraîneurs d'air ont pour but d'augmenter la porosité du béton pour diminuer les effets de l'action des gels dégelés sur le béton (ils évitent l'éclatement du béton) c'est-à-dire que ces adjuvants confèrent au béton durci la capacité de résister au effets gel et dégelés successifs en favorisant la formation de microbulles d'air réparties de façon homogène qui serviront d'espace d'expansion dans le béton durci. Ces microbulles permettent d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel et du dégel. Il améliore la résistance du béton sous l'action des incendies.

Un des modes d'action de ces microbulles peut être décrit comme suit : dans le cas du gel, l'eau contenue à l'intérieur du béton gèle et augmente de volume puis crée des surpressions à l'intérieur des pores du béton et par la suite une fissuration ; la présence des microbulles permet de freiner le développement des fissures et la dégradation du béton est arrêtée.

C'est le même mode d'action qui se développe lors des incendies, dans ce cas l'eau contenue dans les pores fermés se transforme en gaz, ce gaz avec l'augmentation de la température provoque des surpressions sur les parois des pores et donc de la fissuration.

Pour les bétons devant résister aux cycles de gel et de dégel, la teneur en air occlus doit être entre 3 et 6 %. Lors de l'utilisation d'entraîneurs d'air, la quantité d'espaces d'expansion n'est pas le seul critère important. La distance entre un point quelconque et une bulle d'air ne dépassera pas une certaine valeur, en général 200µm.



Figure II.8 : Ajout d'entraîneur d'air lors du malaxage.

Chapitre II : Présentation du matériau

- **Domaine d'utilisation :**

- Les routes, les barrages, ponts ;
- Travaux maritimes ;
- Ouvrages exposés au gel, à l'action des eaux agressives ;
- Bétons extrudés (ex : glissière de sécurité en béton, bordures) ;
-

II.2.4.5-Les hydrofuges :

Ils sont utilisés pour assurer l'imperméabilité du béton et du fait l'infiltration de l'eau. Ils sont souvent utilisés dans les cas des barrages et des châteaux, de même, ils participent à la lutte contre la corrosion des armatures à travers du béton d'enrobage.

II.2.5-Les additions minérales

Il existe deux catégories de fines minérales : les fines actives à caractère Pouzzolanique et les fines inertes comme les fillers calcaire. Ce sont des particules de faible dimension qui améliorent notablement les performances de résistances et de durabilité du béton grâce à leurs propriétés Pouzzolanique (cendres volantes, fumée de silice, laitier...).

II.3-Propriétés essentielles des bétons :

Le béton est un matériau facile à mouler quelles que soient les formes de l'ouvrage, à l'épreuve du temps, économique, résistant au feu et nécessitant peu d'entretien. Matériau composite, mis en œuvre de multiples manières, il répond à un grand nombre de spécifications : résistance mécanique, notamment à la compression, isolation thermique et phonique, étanchéité, aspect, durabilité, sécurité incendie. Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés : d'une part à l'état frais, alors qu'il est plastique et qu'on peut le travailler ; d'autre part, à l'état durci, alors que sa forme ne peut plus être modifiée mais que ses caractéristiques continuent à évoluer durant de nombreux mois, voire des années.

II.4-Les types de béton :

On distingue plusieurs types de béton classés selon la composition, les différents types sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Chapitre II : Présentation du matériau

Type de béton	Composition	Rapport (eau/ciment) ou Granulat/sable)	Caractéristiques
Ordinaire (BO)	Eau+ciment+granulats	$E/C \approx 0,5$ à $0,6$	$20 \text{ Mpa} \leq f_{c28} \leq 50 \text{ Mpa}$
Hautes performances(BHP)	Eau+ciment+granulats+ adjuvant réducteur d'eau	$0.35 \leq E/C \leq 0.40$	$50 \text{ Mpa} \leq f_{c28} \leq 80 \text{ Mpa}$
Très hautes performances BTHP	Eau+ciment + granulats +super plastifiant+ fumée de silice.	$0.20 \leq E/C \leq 0.35$	$80 \text{ Mpa} \leq f_{c28} \leq 150 \text{ Mpa}$
Auto-plaçant(BAP)	Eau + ciment + granulats + fines (cendre volante, laitier de haut fourneau, fine calcaire) + super plastifiant + (agent de viscosité)	$G/S \approx 1$	Béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre dans le coffrage par le seul effet de la gravité et sans aucun procédé de serrage. * f_{c28}

Tableau II.3 : types de béton distingué selon la composition.

II.5-Les critères de classification des bétons :

II.5.1-L'ouvrabilité :

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton frais à remplir les coffrages (sans ségrégation) et à enrober convenablement les armatures. Elle doit donc être telle que, le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité.

L'ouvrabilité est principalement influencée par :

- Le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité, la granulométrie.
- Le dosage en eau.

Ce critère peut, en général, se définir à partir de la plasticité par l'affaissement au cône d'Abrams selon les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous :

Chapitre II : Présentation du matériau

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	± 1 cm
Plastique P	5 à 9	± 2 cm
Très plastique TP	10 à 15	± 3 cm
Fluide FL	≥ 16	± 3 cm

Tableau II.4: Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône

L'ouvrabilité est, pour le béton, une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de composition du béton.

II.5.2-Dimension maximale des granulats :

Cette dimension D correspond à la dimension des plus gros granulats entrant dans la composition du béton désigné. D est fixé par référence à la norme NFP18-560. La classification correspondant à ce critère est la suivante. Cette dimension dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage (barrage, digues, murs de quai, structure de bâtiment, voiles minces, etc.), mais elle dépend également des dispositions de ferrailage.

D (mm)	Classification des bétons
D = 8	Béton très fin
$10 \leq D \leq 16$	Béton fin
$20 \leq D \leq 25$	Béton moyen
$31,5 \leq D \leq 50$	Béton gros
$63 \leq D$	Béton très gros

Tableau II.5: Classification des bétons selon les gros grains du squelette du béton.

II.5.3-La résistance mécanique du béton:

La résistance mécanique du béton est considérée comme la propriété la plus importante et la plus essentielle à rechercher pour un béton. Une bonne résistance à la compression est la

Chapitre II : Présentation du matériau

performance bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette résistance est généralement caractérisée par la valeur mesurée à vingt-huit jours. Elle est mesurée par écrasement des éprouvettes cylindriques 16x32 cm selon la normalisation en vigueur.

II.5.4-Autres critères :

Il peut être nécessaire dans certains cas de préciser dans la désignation du béton d'autres critères que les trois fondamentaux précédemment définis, parmi eux on peut citer :

- L'influence de la qualité de ciment, selon l'agressivité du milieu
- Le dosage minimal en ciment.
- Utilisation spéciale du béton (climat froid, climat chaud)
- Utilisation obligatoire ou exclue d'adjuvant ou d'ajout.
- Béton à pomper ou pas, à extruder ou pas, à vibrer ou pas,...

II.5-Formulation des bétons :

La formulation d'un béton ordinaire (vibré) consiste à définir les proportions de ses différents constituants. La formulation des bétons ordinaires dépend des propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitée. Toutes les méthodes de formulation suivent presque la même procédure qui peut être résumées comme suit :

- Choix du squelette granulaire (gravillons et sable) et du diamètre maximal des granulats ; le squelette doit être validé par un fuseau granulaire de béton correspondant au type de béton espéré. Un fuseau granulaire est obtenu par recueil des courbes granulaires des bétons de qualité, qui ont fait preuves dans des projets antérieurs.
- Choix de la nature du ciment et du rapport eau / ciment ;
- Choix de la quantité de ciment et du volume des granulats ;
- Choix des adjuvants ;
- Recherche par le biais d'essais expérimentaux des dosages en adjuvants.
- La nature des granulats est souvent imposée par les carrières qui fournissent la région où le béton doit être produit.

Il existe plusieurs méthodes de formulation de béton, méthode de Bolomey, méthode d'Abrams, de Faury, de Valette, de Joisel... Dans la partie qui suit on rappelle les grandes lignes des méthodes de formulation les plus utilisées en Algérie.

Chapitre II : Présentation du matériau

II.5.1-Les méthodes de formulation :

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des composants du béton (granulat, eau, ciment) afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (résistance, consistance).

On a recours, dans ce cas aux méthodes de proportions des différents composants ou on trouve soit :

- Les méthodes semi-empiriques (Faury, Bolomey, Valette).
- Les méthodes graphiques (Joisel, Dreux-Gorisse).

a. Méthode de Bolomey :

La méthode de Bolomey est une méthode très simple, elle consiste à tracer une courbe granulométrique de référence par une formule appropriée, puis on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la suivante :

$$P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Avec P = pourcentage des grains passant à travers un passoir du diamètre d.

A = paramètre qui varie de 8 à 16, sa valeur est autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

D = diamètre des plus gros grains.

b. Méthode de Faury :

Cette méthode est venue en 1942 pour compléter la méthode de Bolomey. La méthode de Faury donne des bétons comportant moins de sable et plus de gravier. Ces bétons sont plus raides et conviendront à des travaux pour lesquels une très bonne maniabilité n'est pas indispensable. Les bétons Faury auront souvent une résistance supérieure aux bétons Bolomey correspondant.

- **Particularité de la méthode :**

1-Applicable à tous les granulats quelque soit la masse volumique.

2-Faury a étudié l'effet des vides, vides qui varient en fonction de $\sqrt[5]{D}$.

Chapitre II : Présentation du matériau

3-La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est, théoriquement, une droite, cependant, Faury a distingué les grains fins et moyen ($\leq D/2$) des gros grains ($\geq D/2$) donc la courbe optimale n'est plus un segment de droite, mais deux segments formant une ligne brisée. Il faut déterminer l'origine, l'extrémité et le point de brisure.

L'origine : point de l'axe des abscisses correspondant au tamis 0.0065mm. On représente sur l'axe des abscisses les dimensions des tamis et sur l'axe des ordonnées le pourcentage des tamisats cumulés en volume absolu.

Le point de brisure : abscisse $D/2$, ordonnée $y_{d/2}$ donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat.

$$Y_{D/2} = A + 17\sqrt[5]{D} \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75}$$

A : constante traduisant la maniabilité du béton ;

B : constante traduisant l'importance du serrage du béton ;

D : Plus grande dimension de tamis ;

R : Rayon moyen des moules.

c. Méthode de Drew-Gorisse :

C'est une méthode pratique qui simplifie et rend la formulation du béton plus pragmatique.

Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telle que la dimension des granulats D . La méthode de formulation de Drew-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E , ciment C , sable S , gravillon g , gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges.

Plusieurs étapes de calcul successif nécessaire à l'obtention de la formulation théorique de béton. Il faut déterminer au préalable le rapport C/E , C , E , le mélange optimal à minimum de vides, la compacité du béton et les masses des granulats.

Pour permettre une mise en œuvre correcte du béton, il est important que la taille des plus gros granulats D_{\max} ne s'oppose pas au déplacement des grains entre les armatures métalliques du ferrillage. Il existe une borne supérieure D_{\max} à respecter en fonction de la densité du ferrillage, des dimensions de la pièce à réaliser, et de la valeur de l'enrobage des armatures. D_{\max} est le diamètre du plus gros granulat entrant dans la composition du béton. Sa valeur peut être lue sur la feuille d'analyse granulométrique des granulats correspondants.

Chapitre II : Présentation du matériau

- **Dosage en ciment :**

Selon Dreux-Gorisse, on utilise la formule $\sigma'_{28} = G \sigma'_c (C/E - 0,5)$.

On en déduit une valeur approximative du rapport E/C ; puis par des abaques on détermine Cet E en fonction de C/E, de la résistance, et de la plasticité désirée.

σ'_{28} : Résistance moyenne à viser $\sigma'_{28} = \sigma'_n + 15\%$

σ'_n : Résistance nominale en compression à 28jours.

G : Coefficient granulaire : valeur tabulée en fonction de la qualité des granulats et de la dimension D des gros granulats ; les valeurs approximatives de G supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).

σ'_c : Classe vraie du ciment à 28jours en bars.

C : Dosage en ciment en Kg/m³.

E dosage en eau totale sur les matériaux secs en l/m³.

- **Dosage en eau :**

La connaissance du rapport C/E et la valeur de C permet d'évaluer le dosage en eau E qui sera corrigé expérimentalement pour obtenir la plasticité désirée (Affaissement au cône d'Abrams).

- **Tracé de la courbe granulaire de référence :**

La composition granulométrique optimale est représenté par une ligne brisée OAB voir figure suivante :

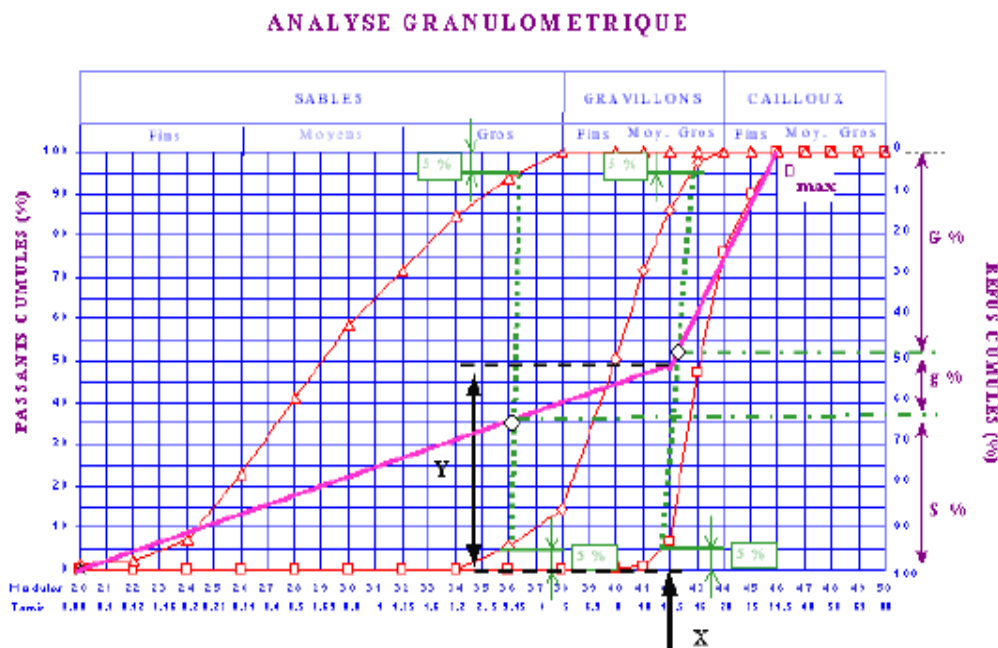


Figure II.9: Détermination des pourcentages en volume absolu du matériau

Chapitre II : Présentation du matériau

Le point (B) (à l'ordonnée 100%) est confondu avec le point d'ordonnée 100 % de la courbe granulométrique du plus gros granulat. Le point de brisure (A) a les coordonnées ainsi définies :

En abscisse :

Si $D \leq 20$ mm, l'abscisse est $D/2$.

Si $D \geq 20$ mm, l'abscisse est située au milieu du segment délimité par D et par le tamis de maille 5 mm.

D : dimension des plus gros grains du squelette granulaire retenue par la méthode de Dreux-Gorisse, est telle que le refus sur le tamis correspondant soit le plus proche possible de 8%.

En ordonnée :

$$Y = 50 - D + K$$

K : terme correcteur qui dépend : du dosage en ciment, de l'efficacité de serrage à la mise en place (vibration); de la forme des granulats et du module de finesse MF du sable.

Dans le cas d'une vibration normale du béton et des dosages habituellement utilisés en ciment.

$K = 6 MF - 15$ Si le sable est roulé ;

$K = 6 MF - 13$ Si le sable est concassé.

Une fois la courbe granulaire de référence est définie, reste à définir les proportions du gravier et du sable qui vont permettre d'approcher au plus près cette courbe.

II.5.2-Composition du béton utilisé :

Dans notre étude, nous n'avons pas utilisé une de ces méthodes pour la formulation de notre béton parce que notre but n'est pas d'avoir un bon béton mais l'essentiel avoir le même béton pour tous les essais.

Les essais non destructifs sont utilisés suite à l'importance que présente le contrôle de la qualité du béton sur la construction, donc ces essais sont utilisés in-situ sur des constructions déjà réalisées où généralement la composition du béton utilisée est celle des chantiers, qui est représentée par 1/3 de sable et 2/3 de gravier.

Puisque l'objectif de ce mémoire est de faire une étude comparative entre les résultats donnés par les essais non destructifs et ceux donnés par l'écrasement des éprouvettes, et pour la raison d'utilisation de ces méthodes non destructives sur chantier on s'est contenté d'utiliser la même composition que celle du chantier pour pouvoir bénéficier de cette étude directement dans la réalité, en ayant comme donnée le dosage en ciment qui est de 350kg/m³ et le rapport E/C qui vaut 0,5.

Chapitre II : Présentation du matériau

II.7-Conclusion :

Dans ce chapitre, nous sommes revenus sur les généralités des bétons et ses constituants. Nous avons discuté les différents types de granulats ainsi que, l'influence de leurs performances mécaniques sur la résistance mécanique du béton. Nous avons aussi expliqué la procédure de fabrication du ciment et l'effet d'utilisation des adjuvants dans les bétons. Par la suite, nous avons consacré une partie de ce chapitre aux méthodes de formulation d'un béton, nous avons donné les grandes lignes des méthodes les plus utilisées en Algérie.

Nous avons terminé ce chapitre par la formule utilisée pour la confection de notre béton.

III.1-Introduction :

Depuis que l'on utilise le béton dans la construction des ouvrages, la nécessité d'un contrôle de ce matériau est apparue.

En premier, il convient de garantir la qualité de ce matériau à l'état frais, il s'agit essentiellement du contrôle de la qualité des ingrédients employés, de la composition du mélange et de son malaxage. Ensuite, un contrôle doit également être exercé sur le béton durci en ce qui concerne sa résistance en particulier.

Pour le contrôle du béton durci, deux types d'essais sont à distinguer :

1. Essai destructifs : ce sont des essais mécaniques à rupture sur éprouvettes.
2. Essais non destructifs (soit en utilisant un scléromètre, ou bien un ultrason) : ces essais permettent l'auscultation directe de l'ouvrage afin de vérifier les résultats donnés par les essais destructifs sur éprouvettes. Ils évitent également de procéder à des carottages longs, couteux et pas toujours réalisables.

Dans ce chapitre, on a essayé de réaliser ces deux essais (auscultation au scléromètre et écrasement des éprouvettes) sur des éprouvettes contenant un même béton à différents âges, puis on fait une comparaison des résultats pour estimer l'erreur.

Pour atteindre notre objectif, on a confectionné 15 éprouvettes cylindriques de diamètre 16cm et de longueur 32cm.

III.2-Confection du béton :

III.2.1-Formulation du béton utilisé :

Pour atteindre l'objectif de ce projet, il faut en premier lieu confectionner un béton, on a cité dans le chapitre II (paragraphe 5.2) la composition utilisée pour notre béton :

Pour notre étude, nous avons utilisé des matériaux naturels locaux, un ciment de type CPJ- CEM II/42.5, et des granulats naturels (sable 0/3, gravier 3/8 et 8/15).

Nous avons calculé la proportion des constituants en ayant le dosage en ciment et le rapport eau/ciment comme données :

- ✚ Le dosage en ciment est de 350kg/m^3 (un béton ordinaire).
- ✚ On a un rapport E/C qui vaut 0.5.

Les proportions d'un mètre cube de béton pour la confection de nos éprouvettes sont :

Chapitre III : Elaboration des essais et interprétation des résultats.

- La quantité d'eau est de 175l.
- Les granulats qu'on a utilisés sont : Sable 0/3 avec une quantité de 158.33kg.

Gravier 3/8 avec une proportion de 158.33kg.

Gravier 8/15 avec une proportion de 158.33kg

On voit bien que le dosage de chaque type de granulats représente 1/3 de la totalité.

III.2.2-Préparation de la gâchée :

Pour la confection du béton, il y a lieu dans un premier temps de préparer le nécessaire en matériels et matériaux.

Nous avons travaillé avec des granulats secs pour uniformiser les essais. Il a donc fallu sécher tous les granulats utilisés en les mettant en étuve pendant au moins 24 heures.

Préparer les moules prévus pour les éprouvettes de béton, les moules sont huilés pour faciliter le décoffrage.

Préparer les pesées des matériaux à utilisés (gravillons, ciment). Séparer l'eau en deux quantités ($\approx 10\%$ pour l'humidification des granulats et $\approx 90\%$ le reste d'eau prévue pour le béton). Le malaxeur utilisé est à axe vertical de mouvement planétaire.



Figure III.1 : Malaxeur utilisé.

Après avoir déterminé les proportions de chaque composant, la séquence de malaxage retenue a été la suivante :

1. Humidifier tout les matériels à utilisé ;
2. Introduire le sable et les gravillons dans le malaxeur ;
3. Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30 s ;

Chapitre III : Elaboration des essais et interprétation des résultats.

4. Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement l'eau de pré-humidification et le mélanger pendant 30 s ;
5. Laisser reposer 1 mn 30s ;
6. Ajouter le ciment, ensuite mélanger le tout durant 30 s ;
7. Verser l'eau restante graduellement et laisser se malaxer pendant 60 s.
8. Remplir les moules d'éprouvettes et vibration du béton par la table vibrante pendant 15 à 20s.

III.2.3-Confection des éprouvettes :

Nous avons utilisé des moules cylindrique (16×32) cm² conformément à la norme NF P18-

406 pour la résistance mécanique en compression.

Après mise en place du béton dans les moules (fabrication des éprouvettes), nous les avons laissé pendant 24 heures dans la salle de fabrication (Laboratoire du Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou). Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées.

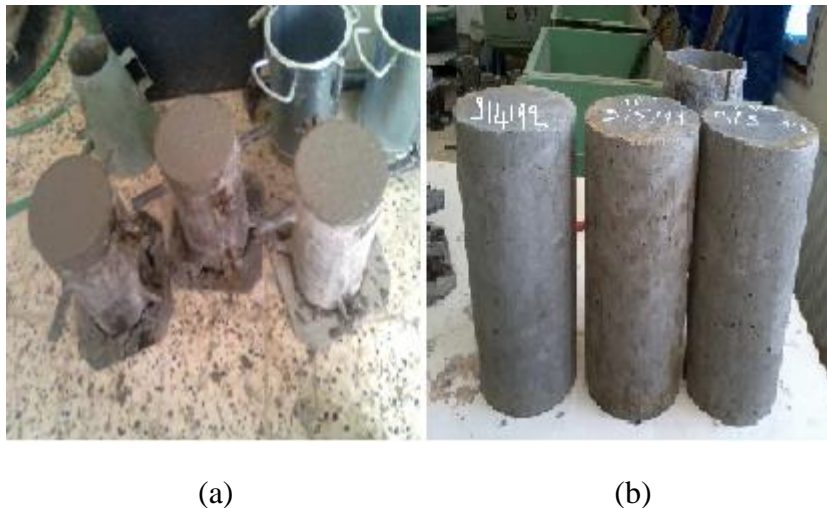


Figure III.2 : Remplissage des moules(a), Eprouvettes après décoffrage(b).

Une fois démoulés, on mentionne sur la surface supérieure des éprouvettes la date de leur confection (voir figure III.3a). Les éprouvettes sont par la suite immergées dans un bac rempli d'eau à la température ambiante (figure III.3b), pour éviter l'évaporation de l'eau existant dans le béton. Elles sont alors conservées dans le bac d'eau jusqu'à l'âge de 7, 14, 21, 28 et 45 jours (trois éprouvettes pour chaque âge).

Pour tester ces éprouvettes, il faut qu'elles soient sèches, pour cela elles sont retirées du bac d'eau 24h avant qu'elles soient testées à l'essai non destructif (par scléromètre) puis à l'essai de compression à 7, 14, 21, 28 et 45jours.



Figure III.3 : Marquage de l'éprouvette (a) ; Epreuves immergées dans l'eau (b).

III.3- Caractérisation des éprouvettes en utilisant un scléromètre :

Les résultats d'essais mentionnés dans les tableaux ci-après, ont été obtenus suite à l'auscultation au scléromètre Schmidt type N (modèle 58-CO 181/N) sur des éprouvettes à l'état sec.



Figure III.4 : Scléromètre utilisé.

Nous avons considéré une série de mesures de 12 coups pour chaque éprouvette, ce qui signifie que nous avons douze indices sclérométriques. Nous avons calculé la moyenne en divisant la somme des douze valeurs par le nombre de mesure (12).



Figure III.5 : Essai sclérométrique

Le tableau ci-dessous résume les valeurs obtenues :

N° de l'éprouvette	Age du béton (en jours)	Différents indices sclérométriques												moyenne
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	7	25	25	28	25	25	26	23	23	23	23	26	23	24.58
2		24	22	22	23	25	27	29	26	26	26	22	22	24.5
3		24	22	23	26	22	22	24	23	29	25	24	24	24
4	14	24	25	25	24	29	26	28	26	23	24	25	26	25.42
5		23	25	24	24	23	26	27	26	26	24	25	26	24.92
6		24	21	23	21	24	24	22	24	27	28	22	22	23.5
7	21	26	38	28	28	34	32	28	28	30	26	24	32	29.5
8		28	26	26	25	25	24	24	24	24	24	24	24	24.83
9		26	28	26	26	25	30	28	27	26	32	26	25	27.1
10	28	27	28	26	26	26	25	24	24	24	24	24	24	27.16
11		30	30	29.5	29	29	28	28	27.5	27	26	26	25	27.9
12		33	30	30	30	28	26	26	26	26	26	30	25	28
13	45	32	30	30	30	32	34	33	32	30	32	28	30	33.58
14		32	30	32	30	33	34	32	32	32	34	38	38	33.08
15		31	32	33	30	30	32	36	33	30	30	30	30	31.42

Tableau III.1 : Valeurs d'indices de rebondissements.

Après avoir déterminé les différentes valeurs d'indices de rebondissements en considérant 12 séries de mesure sur la face supérieure de chaque éprouvette, nous avons à déterminer les résistances correspondantes à la moyenne des 12 coups pour chaque âge du béton 7, 14, 21, 28 et 45 jours.

Chapitre III : Elaboration des essais et interprétation des résultats.

Ces résistances sont déterminées par des abaques qui donnent la résistance d'un cube en fonction de l'indice sclérométrique et de l'inclinaison du scléromètre lors des mesures. Lorsqu'on a pris nos mesures la position du scléromètre a été verticale (voir figure III.5), alors nous avons lu les valeurs sur la courbe qui a l'inclinaison de -90° .



Figure III.6 : Abaque utilisé.

Les courbes de l'abaque nous donnent la résistance d'un cube, mais comme nous avons utilisé des éprouvettes cylindriques comme c'est mentionné au paragraphe III.1, nous avons multiplié ces résistances par un coefficient de corrélation qui vaut 0.85 pour obtenir les résistances de notre béton.

Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau III.2 ci-dessous :

N° de l'éprouvette	Indices sclérométriques	Age du béton en (jours)	Indices sclérométriques moyen	Résistances d'un cube en (Mpa)	Résistances d'un cylindre en (Mpa)
1	24.58	7	24.36	20.5	17.42
2	24.5				
3	24				
4	25.42	14	24.61	21.6	18.36
5	24.92				
6	23.5				
7	29.5	21	27.14	25.1	21.33
8	24.83				
9	27.1				
10	27.16	28	27.68	26.5	22.52
11	27.9				
12	28				
13	33.58	45	32.69	33.3	28.30
14	33.08				
15	31.42				

Tableau III.2 : Résistances du béton par scléromètre.

On peut traduire ces résultats dans la courbe récapitulative suivante :

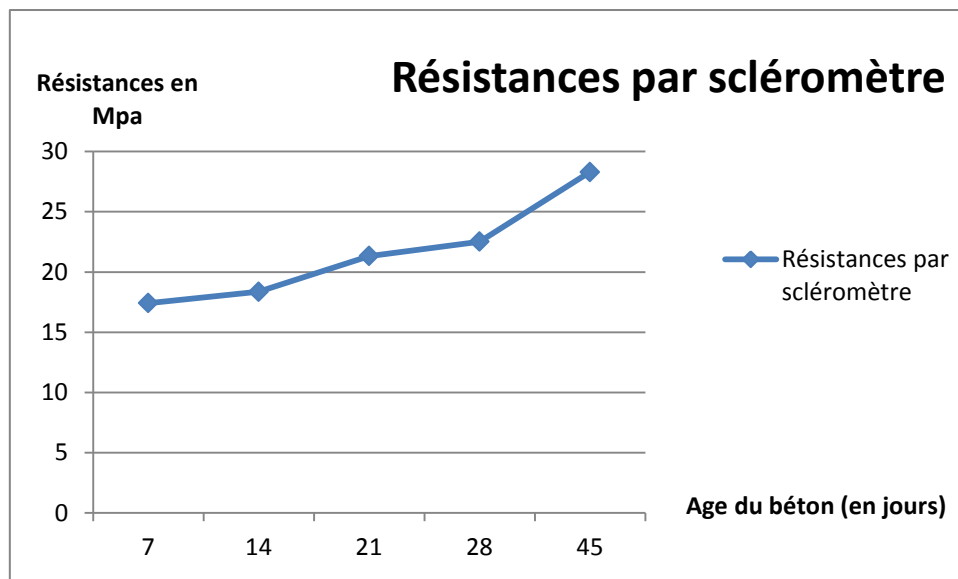


Figure III.7: Résistances du béton par scléromètre.

Ce graphe présente les résistances du béton par scléromètre qui augmentent progressivement par ordre croissant en fonction de l'âge du béton de 17.42Mpa au 7^{ème} jour jusqu'à notre valeur maximale obtenue au 45^{ème} jour qui vaut 28.30Mpa.

On peut dire que le plus grand pourcentage de résistance de ce béton (61.55%) est atteint dès le 1^{er} âge en comparant les résultats obtenus au 7^{ème} et ceux obtenus au 45^{ème} jour.

Entre le 7^{ème} et le 45^{ème} jour, la variation de résistance est de 10,88Mpa équivalent de 38.45% du taux de résistance de notre béton. (Par rapport à notre valeur maximale 28.30Mpa).

On constate alors que le durcissement de ce béton est plus important dans les 1^{ers} jours après son coulage, au-delà, il augmente mais d'une manière légère.

III.4-Caractérisation des éprouvettes par écrasement :

La résistance mécanique en compression d'un béton correspond à la charge de rupture (charge maximale enregistrée) au cours de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette (voir figure III.8). C'est une caractéristique essentielle du matériau béton et est le paramètre fondamental de notre étude. Notre objectif dans cette étude est de déterminer la résistance du béton à la compression et la comparer par la suite à la résistance du béton par scléromètre.

Chapitre III : Elaboration des essais et interprétation des résultats.

Les éprouvettes utilisées pour déterminer la résistance mécanique en compression du béton sont cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm. Ces éprouvettes seront rompues en compression à l'aide d'une presse hydraulique, la presse utilisée est d'une capacité maximale de 2000 kN (voir figure III.9). La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 m/s.



Figure III.8 : Rupture de l'éprouvette.

Figure III.9: Presse de compression.

Les résultats obtenus par écrasement des éprouvettes sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Age du béton (en jours)	N° de l'éprouvette	Intensité de la charge (en KN)	Résistance (en Mpa)	Résistance moyenne (en Mpa)
7	1	412.5	20.51	19.63
	2	353.5	17.58	
	3	418.0	20.79	
14	4	439.0	21.83	23.36
	5	482.5	24.00	
	6	487.8	24.26	
21	7	478.2	23.78	23.45
	8	406.2	20.20	
	9	526.4	26.18	
28	10	544.6	27.08	26.65
	11	530.0	26.37	
	12	532.5	26.50	
45	13	568.8	28.29	29.13
	14	579.0	28.80	
	15	607.7	30.22	

Tableau III.3 : Résultats d'écrasement des éprouvettes

La courbe traduisant ces résultats est présentée dans la figure III.10 suivante :

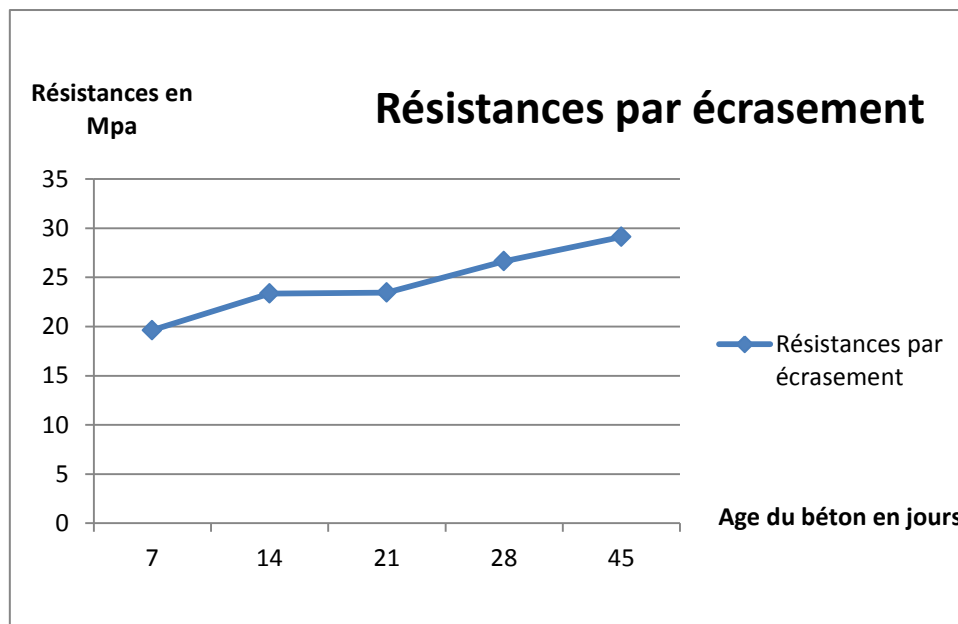


Figure III.10: Résistances du béton par écrasement

L'évolution de la résistance dans cette courbe est bien apparue, c'est claire qu'elle augmente avec l'âge du béton de la valeur minimale 19.63Mpa à 7 jours jusqu'à 29.13Mpa à 45 jours.

Les différences entre deux résistances qui correspondent à deux âges successifs sont très proches (3.73, 0.09, 3.2, 2.48 Mpa) sauf celles correspondante à 14, 21 jours (différence de 0.09Mpa), c'est-à-dire que la résistance n'a pas beaucoup progressé entre le 14 et 21 jour qui est dû probablement à des erreurs lors du remplissage des éprouvettes.

L'évolution de la résistance est la même par rapport à celles du scléromètre.

On remarque qu'au 7^{ème} jour, on arrive à 67.39% de la résistance totale obtenue au 45^{ème} jour.

En considérant l'écrasement d'éprouvette par une presse hydraulique comme la méthode la plus fiable pour la détermination de la résistance du béton, les résultats trouvés par cette dernière confirme les interprétations de la courbe de la figure III.7, qui dit que la plus grande partie de durcissement du béton (>50%) s'effectue juste après le coulage (la 1^{ère} semaine).

III.5-Comparaison des résultats obtenus par scléromètre avec ceux d'écrasement :

Suite à l'objectif cité au début de ce projet, nous sommes arrivés à l'étape la plus importante de cette étude qui est la comparaison entre les résistances obtenues par scléromètre et les résistances par écrasement, l'histogramme ci-après montre la différence entre ces deux résultats :

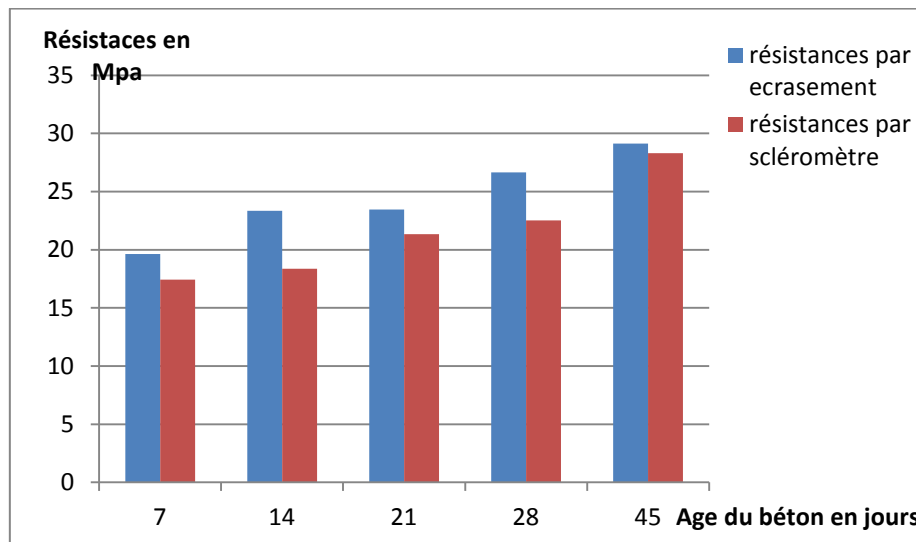


Figure III.11: Comparaison entre la résistance du béton au scléromètre et la résistance par écrasement.

Pour mieux voir la différence entre ces deux résistances, nous avons calculé la marge d'erreur par la loi suivante :

$$L'erreur = (\Delta R/R) \times 100 = [(R - R_0) / R] \times 100$$

R : Résistances du béton par écrasement

R₀ : Résistances du béton par scléromètre.

- L'erreur entre ces deux résistances pour chaque âge du béton est résumée dans le tableau suivant :

Résistances du béton par scléromètre (en Mpa)	Résistances du béton par écrasement(en Mpa)	La marge d'erreur (en %)
17.42	19.63	11
18.36	23.36	21
21.33	23.45	9
22.52	26.65	15
28.30	29.13	2.8

Tableau III.4: Marge d'erreur entre les résistances du béton par scléromètre et celles d'écrasement.

La figure III.10 montre que les résistances obtenues par scléromètre sont inférieures à celles d'écrasement des éprouvettes pour tous les âges du béton (7 à 45jours).

Ces deux résistances ont le même sens de variation, variation, qui diffère d'un âge de béton à un autre de la petite valeur 2.8% obtenue à 45 jours jusqu'à 21% à 14jours.

On remarque qu'à 45jours l'erreur est très faible par rapport aux autres.

III.6-Comparaison des résistances du béton obtenues par scléromètre avec celles obtenues par un essai non destructif en utilisant un ultrason :

Les résultats obtenus par scléromètre peuvent aussi être comparés à d'autres résultats d'essai non destructif qui est l'auscultation dynamique par ultrason, la résistance dans ce cas se calcule par deux méthodes théoriques et graphique, les résultats théoriques sont obtenus en utilisant la formule :

$$\sigma = 16.7 e^{(E_d/122500)}$$

Avec $E_d = v^2 \rho (1+\mu) (1-2\mu) / (1-\mu)$

μ : le coefficient de poisson compris entre 0.15 et 0.28,

ρ : la densité du béton en kg/m^3 ,

V : la vitesse des ondes ultrasoniques en km/s,

E_d : le module d'élasticité en Mpa.

Lors des calculs, on a pris la valeur de μ égale à **0.15**, elle correspond à un bon béton. La base de mesure de la vitesse des ondes est une distance qui vaut **0.32m** qui est la longueur de l'éprouvette.

La masse volumique du béton ordinaire est **2500kg/m³**

Les valeurs de résistances obtenues sont résumées dans le tableau suivant :

Chapitre III : Elaboration des essais et interprétation des résultats.

N° de l'éprouvette	Age du béton (en jours)	Temps de propagation (en μ s)	Vitesse en (m/s)	E_d $\times 10^4$	Résistance en (Mpa)	Résistance moyenne en (Mpa)
1	7	84	3809.5	3.43	22.09	21.96
2		86	3720.9	3.27	21.80	
3		84.7	3778.04	3.38	22.006	
4	14	81.3	3936	3.67	22.53	22.65
5		79.8	4010	3.8	22.77	
6		80.5	3975.1	3.74	22.66	
7	21	79.58	4020.8	3.83	22.83	22.70
8		84.1	3854	3.52	22.26	
9		78.3	4086.84	3.95	23.05	
10	28	77.2	4145.1	4.07	23.28	23.13
11		77.9	4107.8	3.99	23.13	
12		78.6	4071.24	3.92	22.99	
13	45	77.1	4150.4	4.08	23.3	23.60
14		75.2	4255.32	4.29	23.7	
15		74.7	4283.8	4.34	23.8	

Tableau III.5 : Résistances théoriques du béton par ultrason.

Les résultats graphiques sont obtenus par l'abaque qui détermine la résistance en fonction de la vitesse de propagation des impulsions (voir figure I.3), ces derniers sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

N° de l'éprouvette	Age du béton (en jours)	Base de mesure (en m)	Temps de passage (en μ s)	Vitesse de propagation (en m/s)	Résistance (en Mpa)	Résistance Moyenne (en Mpa)
1	7	0.32	84	3809.5	18.1	17.85
2	7	0.32	86	3720.9	17.27	
3	7	0.32	84.7	3778.04	18.18	
4	14	0.32	81.3	3936	21.8	22.41
5	14	0.32	79.8	4010	22.73	
6	14	0.32	80.5	3975.1	22.7	
7	21	0.32	79.58	4020.8	23	22.77
8	21	0.32	84.1	3854	19.9	
9	21	0.32	78.3	4086.84	25.4	
10	28	0.32	77.2	4145.1	27.3	26.08
11	28	0.32	77.9	4107.8	26.4	
12	28	0.32	78.6	4071.24	24.54	
13	45	0.32	77.1	4150.4	27.3	29.40
14	45	0.32	75.2	4255.32	30	
15	45	0.32	74.7	4283.8	30.9	

Tableau III.6 : Résistances graphique du béton par ultrason.

Chapitre III : Elaboration des essais et interprétation des résultats.

Le tableau suivant récapitule les valeurs de résistances du béton par scléromètre et par ultrason :

Age du béton (en jours)	Résistances du béton par scléromètre (en Mpa)	Résistances du béton par ultrason (en Mpa)	
		Théoriques	Graphiques
7	17.42	21.96	17.85
14	18.36	22.65	22.41
21	21.33	22.70	22.77
28	22.52	23.13	26.08
45	28.30	23.6	29.40

Tableau III.7 : Résistances du béton obtenues par scléromètre et par ultrason.

Ces résultats peuvent être traduits par l'histogramme ci-dessous :

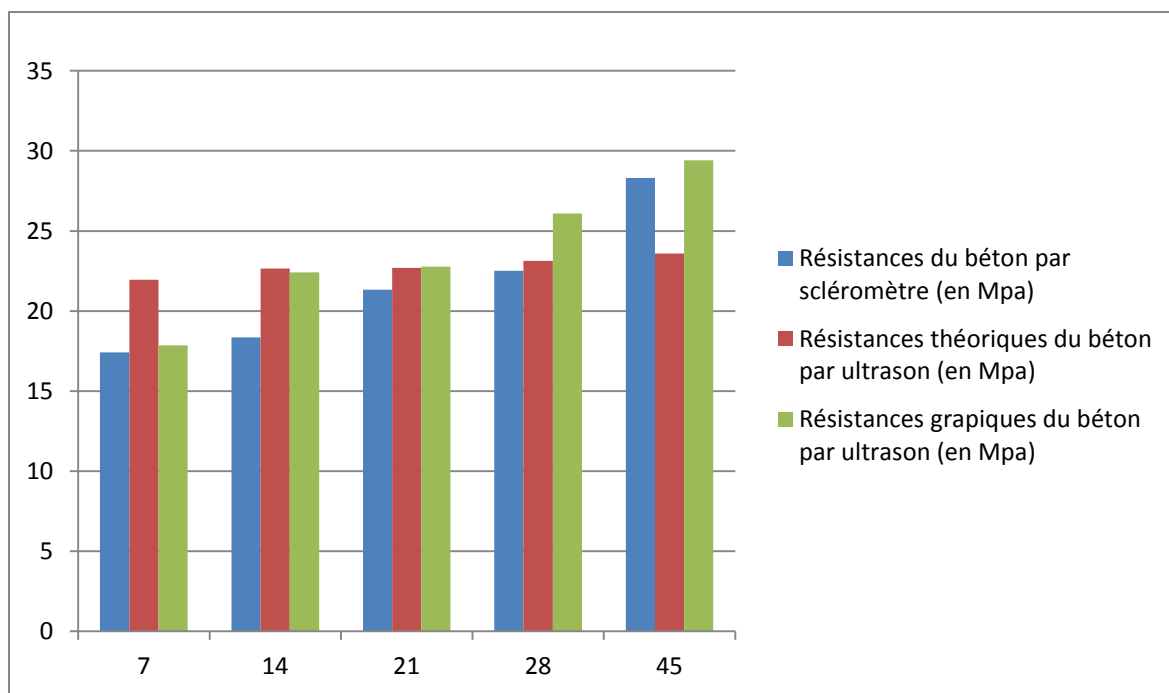


Figure III.12 : Comparaison des résistances du béton obtenues par scléromètre et par ultrason.

On remarque de l'histogramme que les trois résistances augmentent au fur et à mesure avec l'âge du béton, quoique le pourcentage de variation diffère pour chaque type de résistance.

Chapitre III : Elaboration des essais et interprétation des résultats.

Pour celles obtenues par la méthode théoriques par ultrason, on peut dire que sa variation est très faible, ce qui est du au paramètres non métrisés qui entrent dans sa formule (le coefficient de poisson μ).

Les résultats graphiques par ultrason, pour tous les âges du béton, sont supérieurs à ceux obtenus par scléromètre avec une différence non constante, cette dernière varie de 0.43Mpa à 7jours jusqu'à 4.05 Mpa, valeur maximale obtenue à 14jours.

On a vu que les résistances du béton obtenues par écrasement sont supérieures à celles obtenues par scléromètre, et on vient de remarqué que les résultats graphiques trouvés par ultrason sont aussi supérieures à celles au scléromètre par des valeurs proches de celles obtenues par écrasement, alors on pourra dire que les résultats de résistances du béton par ultrason sont plus proche des résultats réels, et cela est dû au caractère superficiel du scléromètre qui est influencé par plusieurs phénomènes comme le degré de carbonatation de la surface, contrairement à l'ultrason qui est une méthode qui caractérise le béton en profondeur.

La différence de variation entre les résistances du béton obtenues par scléromètre et les résistances obtenues par ultrason, théoriques et graphiques, est représentée par l'erreur qui est calculée par la formule suivante :

$$L'erreur = (\Delta R/R) \times 100 = [(R-R_0)/R] \times 100$$

Avec : R : Résistances du béton par ultrason.

R_0 : Résistance du béton par scléromètre.

Age du béton(en jours)	Erreur théorique (en %)	Erreur graphique(en%)
7	20.6	2,4
14	18.9	18
21	6	6,3
28	2.6	13
45	16	3,7

Tableau III.8: Erreur estimée entre les résistances du béton par scléromètre et par ultrason.

Pour les résultats théoriques par ultrason, on remarque que la marge d'erreur est très importante à 7 et 14 jours puis elle diminue après 14jours, contrairement à l'erreur graphique qui n'est pas stable au cours du temps (de 7 à 45jours).

III.7-Conclusion :

Après l'analyse de ces résultats, on peut dire que :

1-Même si l'expérience démontre que, ces différents résultats ont le même sens de variation, on ne pourra pas dire que ces résultats seront identiques à chaque étude.

2-La méthode d'auscultation dynamique par scléromètre, dans la détermination de la résistance à la compression d'un béton, ne peut être employée qu'à titre d'orientation vu son caractère très superficiel.

3-Vu que le scléromètre donne des résultats inférieur à ceux de l'écrasement d'éprouvette, la sécurité des ouvrages contrôlé par cet appareil est assurée.

4-Du moment que l'erreur de la résistance à la compression, par ultrason ou par scléromètre, estimé suite à des recherche déjà faites peut atteindre 40%, on peut dire que nos valeurs sont dans les normes, elles ont une valeur maximale d'erreur ($18\% < 40\%$).

5-Le scléromètre est un appareil simple qui peut être employé pour avoir une estimation sur la résistance du béton, donc, il est utilisé à titre d'orientation puisqu'il nous renseigne juste sur les 2 premiers centimètres de la surface à tester.

Conclusion générale et perspectives :

Sur la base des résultats obtenus, après les essais effectués au laboratoire, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

1/La corrélation entre l'indice sclérométrique ou la vitesse des ultrasons et la résistance à la compression du béton est un travail très délicat, vu l'influence de plusieurs aléas qui ne sont pas toujours contrôlables sur le terrain.

2/Même si l'expérience démontre que, jusqu'à une certaine limite, ces différents résultats ont le même sens de variation, il serait illusoire de croire que la problématique se réduit à un simple travail de corrélation analytique.

3/Vu le caractère très superficiel du scléromètre, la discordance qui existe souvent entre la qualité du béton à la surface et sa qualité en profondeur fait que l'essai sclérométrique ne peut, en aucun cas, remplacer les méthodes destructives ou les méthodes non destructives de profondeur.

4/Le scléromètre est utilisé pour déterminer les endroits faibles de résistance d'une surface de béton in-situ, afin de faire le carottage dans des endroits précis. Il permet d'apprécier directement, avec une exactitude suffisante, la qualité du béton dans une construction ordinaire, aussi estimer son homogénéité dans les éléments structuraux d'une construction.

5/La méthode au scléromètre permet aussi de suivre l'évolution de la qualité du béton au cours du temps.

6/En pratique, la plage moyenne des résultats pour un bon béton est de 25 à 35 pour l'indice sclérométrique (chose confirmée sur nos tableaux).

Il serait très intéressant de refaire cette étude en confectionnant plusieurs bétons avec des formulations différentes pour déterminer l'influence de la composition du béton sur les résultats d'un scléromètre.

Réaliser, de préférence, les essais non destructifs sur les éléments de l'ouvrage pour prendre en considération les conditions de conservation et de travail du béton.

Il sera préférable si on utilise un scléromètre digital pour éliminer l'erreur qui est due à l'imprécision de l'abaque des résistances en fonction de l'indice sclérométrique.

On a remarqué dans l'histogramme de comparaison entre les résistances trouvées par scléromètre et par écrasement, que l'erreur est très faible après 28 jours, il sera important de continuer les essais pour avoir des résultats même après 45 jours afin de confirmer si on peut dire que le scléromètre est plus fiable pour les bétons plus âgés.

Bibliographie

- 1- **ABDELHALIM BENOUIS, NACERA KHALDI, YACINE CHERAIT**, *Comparaison des résistances des bétons déterminées par écrasement et par scléromètre : influence de la composition*, Laboratoire de génie civil et d'hydraulique, Université de Guelma, (août 2007).
- 2- **ABDELHALIM BENOUIS. NACIRA KHALDI. ZAHREDDINE NAFFA**, *Détermination de la résistance des bétons par les ultrasons (influence de la composition)*, Université de Guelma. Algérie.
- 3- **ADAM M. NEVILLE**, *Propriétés des bétons*, Eyrolles, Paris, (Septembre 2000).
- 4- **ALWARDANY.R**, *Caractérisation non destructive des structures en béton au moyen des ondes dispersives de Rayleigh et de Lamb*, thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Université de Cergy-Pontoise (Avril 2007).
- 5- **A.TOUKAL**, *Influence des taux de chargement sur la caractérisation non destructive du béton par ultrason*, thèse de magister, Université de Boumerdès, 2009-2010.
- 6- **BARON J et OLIVIER J-P** : *La durabilité des bétons*, presses de l'école nationale des ponts et chaussées, (1995).
- 7- **BENJAMIN DURAND**, *Pérennisation des ouvrages en génie civil dans des problématiques liées à l'eau : diagnostic, réparation et confortement*, thèse ingénieur, France (juin 2010).
- 8- **BOUFEDAH BADISSI**, *Influence de la granularité (classe granulaire 4/22.4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaire*, thèse de magister ; université Mentouri Constantine.
- 9- **B. CLEMENT(DLA)**, *Construire des ouvrages d'art en béton : Les contrôles à postériori*, Association des directeurs des services techniques, Centre EST (janvier 2011).
- 10- **Club CDOA**, *Le contrôle non destructif des structures en béton*, CETE méditerrané (appartient au réseau scientifique et technique de l'équipement), (juin 2004).
- 11- **DJAMILA AMZAL, ABDENOUR MOSTFAOUI**, *Contrôle de la qualité du béton durci par les méthodes non destructives*, thèse ingénieur, Université de Tizi Ouzou, (1994). « MAT 39 ».
- 12- **D.L. KANTRO**, *Influence des superplastifiants réducteurs d'eau sur les propriétés de la pâte de ciment – unslump test miniature*, cement and concrete aggregate Vol 2, pp 95-102, (1980).
- 13- **F.GABRYSIK**, *matériaux, les bétons*, chapitre 4.

- 14- **GEORGES DREUX, JEAN FESTA**, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, Eyrolles, 8^{ème} édition, Paris (mai 2002).
- 15- **GHOMARI FOUAD**, *Matériaux de construction*, Projet de fin d'études, Université Aboubekr Belkaid.
- 16- **HERVE BEINISH**, *Contrôle non destructif des bétons, mesure de la dureté de surface*, fiche 37, France. (février 1999).
- 17- **H.ABADI, R.ARAUD, L.BOEGLY, R.BOUCHE, CERIB, H.CHAPON, P.DONAS, R.HOLAK, A.VAVEL**, *Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre*, fiche technique tome 2, centre d'information sur le ciment et ses applications CIMBETON, Ecole française du béton, Paris (octobre 2006).
- 18- **IR. P BOERAEVE**, *cours de béton armé*, (janvier 2010).
- 19- **KAHINA HADDAD, YASMINE FEDDAOUI**, *Les bétons autoplaçants à base de granulats de recyclage*, thèse d'ingénieur en génie civil, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.(2010-2011) « MAT 75 ».
- 20- **LAURY- ALAN MOALIC**, *Réhabilitation d'ouvrage en béton armé : Du diagnostic au confortement*, thèse ingénieur, INSA de Strasbourg, GINGER CEB TP (groupe ingénierie Europe).
- 21- **MAURICE WANIN**, *Évaluation non destructive de la qualité des matériaux*, Partie 1 du Techniques de l'Ingénieur, Maurice : Ingénieur civil des Mines de Nancy.
Ancien chef du département Mesure-Contrôle-Automatique-IRSID (USINOR) M4 130.
- 22- **MATHIEU CHEKROUN**, *Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec ondes de surface*, thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes le (03 décembre 2008).
- 23- **MERABET AREZKI, MERABTI YAHIA**, *La résistance mécanique du béton et ses variations*, thèse ingénieur, Université de Tizi Ouzou, (1993) « MAT 37 ».
- 24- **M. SAMUEL NAAR**, *Evaluation non destructives du béton par mesure de résistivité électrique et thermographie infrarouge passive*, thèse de doctorat, Université de bordeaux 1 et de Sherbrooke (Mai 2006).
- 25- **NI RYANA ANDRIAMANANTSILAVO**, *Comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage : expérimentation, modélisation, de la poussée et du processus de maturation*, thèse de doctorat, Université de Bretagne sud, (Décembre 2003).

- 26- **O. NAIT-RABAH**, *Application du scléromètre Schmidt pour la détermination non destructive de la résistance du béton dans les éléments d'une construction en béton* » thèse d'ingénieur, Institut national d'enseignement supérieur de génie civil de Tizi-Ouzou, (Promotion juin 1985).
- 27- **SAADANI SABRINA**, *Comportement des bétons à base de granulats recyclés*, thèse magister, Université Mentouri Constantine.
- 28- **STEPHAN ASSIE**, *Durabilité des bétons autoplaçants*, thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, France (octobre 2004).
- 29- **SYLVAIN LOPEZ-LRA/DROA**, *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton*, Centre d'étude technique de l'équipement méditerranée – 5 février 2009.
- 30- **V. GARNIER. J. F.CHAIX, M. ROSSAT, C. PAYAN, G. CORNELOUP**, *Caractérisation non destructive des bétons par propagation d'onde ultrasonores*, 19ème congrès Français de mécanique, LCND, Université de la méditerranée. Aix Pce. France. (Aout 2009).

Liste des figures

Chapitre I:

Figure I.1: Appareil ultrason.

Figure I.2 : Mise en place des transducteurs sur l'éprouvette.

Figure I.3 : Courbe vitesse du son-résistance pour un essai ultrasonique.

Figure I.4 : Types de propagation d'ondes.

Figure I.5 : Coupe longitudinale d'un scléromètre.

Figure I.6: Abaque déterminant la dureté du béton (source GINGER CEB TP).

Figure I.7: Scléromètre original Schmidt série N/L.

Figure I.8 : Scléromètre original Schmidt série LR/NR.

Figure I.9: Scléromètre digi-Schmidt série LD/ND.

Figure I.10 : scléromètre Silver Schmidt série N/L.

Figure I.11: Tige de percussion avec capuchon.

Figure I.12 : Scléromètre type PT.

Figure I.13: Scléromètre type P.

Figure I.14: Scléromètre de type PM.

Chapitre II:

Figure II.1: Composants d'un béton.

Figure II.2: différents types de granulats.

Figure II.3: Extraction des granulats à proximité des grandes métropoles.

Figure II.4: Découpage en blocs parallélépipédiques de la roche massive en place.

Figure II.5: Roche sédimentaire.

Figure II.6: Granulat issus d'une roche éruptive.

Figure II.7 : Illustration des granulats expansés : a) l'argile ; b) et c) schiste.

Figure II.8 : Ajout d'entraîneur d'air lors du malaxage.

Liste des figures

Figure II.9: Détermination des pourcentages en volume absolu du matériau.

Chapitre III:

Figure III.1: Malaxeur utilisé.

Figure III.2: Remplissage des moules(a), Eprouvettes après décoffrage(b).

Figure III.3: Marquage de l'éprouvette (a) ; Eprouvettes immergées dans l'eau (b).

Figure III.4: Scléromètre utilisé.

Figure III.5: Essai sclérométrique

Figure III.6: Abaque utilisé.

Figure III.7: Résistances du béton par scléromètre.

Figure III.8: Presse de compression.

Figure III.9: Rupture de l'éprouvette.

Figure III.10: Résistances du béton par écrasement

Figure III.11: Comparaison entre la résistance du béton au scléromètre et la résistance par écrasement

Figure III.12 : Comparaison des résistances du béton obtenues par ultrason et par scléromètre.

Liste des tableaux

Chapitre I:

Tableau I.1: Estimation de la qualité du béton selon la vitesse du son

Tableau I.2: Choix du modèle du scléromètre selon le matériau à tester.

Chapitre II:

Tableau II.1: Ajouts cimentaires.

Tableau II.2 :Résistance à la compression

Tableau II.3 : Types de béton distingués selon la composition.

Tableau II.4: Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams.

Tableau II.5: Classification des bétons selon les gros grains du squelette du béton.

Tableau II.6 : Diamètre maximal des granulats selon leur nature.

Chapitre III:

Tableau III.1 : Valeurs d'indices de rebondissements.

Tableau III.2 : Résistances par scléromètre.

Tableau III.3 : Résultats d'écrasement des éprouvettes.

Tableau III.4: Marge d'erreur entre les résistances sclérométriques et celles d'écrasement.

Tableau III.5: Résistances théoriques d'ultrason.

Tableau III.6 : Résistances graphique d'ultrason.

Tableau III.7 : Résistances sclérométriques, ultrasoniques théorique, ultrasoniques graphiques.

Tableau III.8: Erreur estimée entre les résistances par scléromètre et par ultrason.