

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
جامعة البليدة 1-
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie
قسم الهندسة المدنية
Département de Génie Civil
Spécialité : matériaux

**PREVISION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESION DU
BETON PAR LES ESSAIS NON DESTRUCTIFS AU
LABORATOIR**

Présenté par :

- **HASNA BOUCHEMAL**
- **YOUNES ABD ELBASSET LIMANI**

Devant le jury composé de :

A. AZZAZ	Docteur, USD de Blida	Président
H. BENSACI	Docteur, USD de Blida	Encadreur
S. KENAI	Professeur, USD de Blida	Co-Encadreur
A. BENYAHIA	Docteur, USD de Blida	Examineur

Blida, Octobre 2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

ALLAH

Le très Haut, le très Grand,

Le Clément, L'Omniscient, l'Omnipotent.

D'avoir permis à ce travail d'aboutir à son terme.

Au PROPHETE MOHAMED paix et salut sur lui.

Remerciements

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Dr H. BENSACI**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

*Mes sincères gratitude à Pr *S. KENAI**

J'ai eu l'honneur d'être parmi vos étudiants et de bénéficier de votre riche enseignement Votre gentillesse, et votre disponibilité permanente suscité mon admiration.

Veillez bien monsieur recevoir mes remerciements pour le grand honneur que vous m'avais fait d'accepter l'encadrement de ce travail.

Aux membres du jury qui ont bien voulu nous honorer par leur acceptation d'évaluer notre travail.

Nous tenons également à remercier tout le staff de Département de Génie civil pour leur professionnalisme et leur disponibilité tout au long de mes études.

Mes remerciements vont également au laboratoire « **CEL** » **DAHAN SID AHMED** et à toute l'équipe du centre qui m'ont ouvert les portes, dont ils avaient la responsabilité et qui ont tout mis à ma disposition pour me permettre de travailler dans les meilleures conditions.

Je tiens à remercier particulièrement au l'ingénieur **BACHET FAYCAL**, pour son encadrement de qualité, sa motivation professionnelle, ses conseils et critiques constructives, ses corrections, sa gentillesse et sa patience ainsi pour le temps qu'il a consacré à la réalisation de ce travail.

DIDICACE

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail
a :

A mon soutien moral et source de joie et de bonheur : mon
cher Père **ABD EL ALI**.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la
flamme de mon cœur : ma Chère Mère **Shahrazad Tail**.

Mes deux sœurs **Nour el houda** et **Khadidja** qui je souhaite un
avenir radieux plein de réussite.

A ma famille paternelle « **Bouchemal** » et maternelle « **Tail** ».

A mes amis et mes proche Merci pour vos encouragements et
vos conseils.

À la personne qui m'a toujours aidé et encouragé, et qui m'a
accompagné durant mon chemin d'études supérieures sa patience et
sa compréhension tout au long de ce mémoire, mon binôme
YOUNES ABD EL BASSET.

HASNA

DIDICACE

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail
a :

*La source inépuisable de tendresse, de patience et de Sacrifice :
ma chère maman.*

*En témoignage de brut d'années de sacrifices, de sollicitudes,
d'encouragement et de prières : **mon cher père.***

A mes deux frères **Mohamed Ali** et sa femme, ainsi mon frère
Islam et ma chère petite sœur qui m'avais toujours soutenu et
encouragé durant ces années d'études.

A ma famille paternelle « **Limani** » et maternelle « **Salma** ».

A mes deux amis Ahmed et Bilel qui m'avez toujours écouté
attentivement et aidé inlassablement.

Sans oublier mon binôme **Hasna** qui m'a supporté durant cette
année et avec lequel j'ai trouvé l'entente dont j'avais besoin et pour
son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de
ce mémoire.

YOUNES ABD EL BASSET

ملخص

من المعروف أنه لمعرفة المقاومة الخرسانية في هيكل ما، من الضروري إجراء تجارب على عينات خرسانية سارية المفعول، وذلك للحصول على نتائج تسمح بمعرفة معلومات عن الخرسانة المستخدمة في الهيكل وخواصه ومشكلاتها الوحيدة هو أن هذه النتائج ليست فورية وتستغرق وقتا، وقد تختلف هذه النتائج تبعا لاختلاف خصائص الحفظ والطريقة المستخدمة في المعالجة الملموسة. ولذلك، تم تطوير عدة طرق للمعرفة المباشرة بالخصائص الخرسانية، بحيث تعتمد على الوسائل غير التدميرية للخرسانة وتعتمد أيضا على الخواص الفيزيائية للخرسانة المتصلة بقوتها مثل مطرقة شميدت أو جهاز المطرقة، جهاز السرعة فوق الصوتية. يتم تقييم الخرسانة وفقا لهذه الضوابط غير المدمرة أيضا.

الكلمات الدالة: الخرسانة، التحكم الملموس، الاختبار غير المدمر، مطرقة شميدت، الموجات فوق الصوتية، الترابط.

Résumé

Pour estimer la résistance de béton dans un ouvrage, il est nécessaire de réaliser des essais sur des échantillons de béton durant le coulage. L'inconvénient de cette méthode est que ces résultats ne sont pas immédiats et sont affectés par les conditions de cure et de conservation des éprouvettes. Par conséquent, plusieurs méthodes non destructives (NDT) ont été développées pour la connaissance rapide des propriétés de la qualité du béton en cas de doutes ou sur les anciens ouvrages. Dans cette étude, des essais dépendent des propriétés physiques du béton lié à sa résistance comme l'appareil à marteau ou marteau de Schmidt, et l'essai de vitesse à ultrasons ont été réalisé sur du béton prélevé de chantiers en cours de construction. Les résultats de essais NDT ont été comparés avec les résultats des essais d'écrasement sur éprouvettes. Des corrélations ont été proposées pour les projets dans la région de Blida avec des matériaux locaux pour améliorer la précision de l'estimation en comparaison avec les corrélations proposées par le fabricant des outils d'essais.

Mots clés : béton, contrôle de béton, les essais non destructifs, scléromètre, ultrason, corrélation.

Abstract

Concrete compressive strength needs to be evaluated in all structures during construction. In structure, it is necessary to test concrete samples during concreting operation. The drawback of this method is that these results are not immediate and take time. In addition, the results are affected by the curing and storage conditions. Several nondestructive methods have been developed for rapid estimation of concrete properties in case of strength doubts or for evaluating existing structures. In this study, Schmidt hammer test and the ultrasonic velocity tests were performed on concrete specimens during concrete casting in projects underway.

Results were compared with the crushing test results and correlations were proposed for these projects in the region of Blida using local materials to increase the accuracy of the estimation in comparison with using the machine correlations.

Key words: concrete, quality control, non-destructive tests, impact rebound hammer, ultrasonic pulse velocity, correlation.

TABLE DES MATIERES

REMERCEMENT.....	
DEDICACE.....	
RESUME.....	
TABLE DES MATIERES.....	
LISTE DES TABLEAUX.....	
LISTE DES FIGURES.....	
LISTE DES SYMBOLES.....	
INTRODUCTION GENERALE.....	01

Chapitre 1 : Qualité du béton

1.1. Généralité.....	03
1.2. La qualité de béton	03
1.2.1. Les propriétés de béton	03
1.2.2. Ouvrabilité du béton	03
1.2.2.1. Affaissement aux cônes d'Abram	04
1.2.2.2. Méthode Vébé	05
1.2.2.3. Méthode d'étalement sur table de choc	06
1.2.2.4. Méthode d'étalement à la table à secousses	06
1.2.2.5. Essai v-funnel (BAP)	06
1.2.2.6. Essai boit en L	07
1.2.3. Résistance de béton	07
1.3. Facteurs influençant l'évolution de la résistance à la compression	08
1.3.1. Qualité du ciment	08
1.3.2. Qualité du granulat	09
1.3.3. Qualité de l'eau de gâchage	10
1.3.4. Utilisation des adjuvants	10
1.3.5. Dosage en ciment et du dosage en eau (rapport C/E)	10
1.3.6. Granularité (Rapport G/S)	11
1.3. 7. Processus de malaxage du béton	12
1.3.8. Qualité d'exécution (transport, mise en place, vibration et cure de béton) .	12
1.3.8.1. Transport du béton	12
1.3.8.2. Mise en place du béton	13

1.3.8.3. Vibration du béton	13
1.3.8.4. Cure de béton	13
1.3.9. Les conditions de murissement du béton (température et hygrométrie)	14
1.3.9.1. Température	14
1.3.9.2. Cure humide.....	16
1.3.10. Age du béton	16
1.4. Durabilité du béton.....	17
1.5. Conclusion	17

Chapitre 2 : Essais destructifs et non destructifs

2.1. Introduction	18
2.2. Contrôle de la qualité du béton sur site	18
2.2.1. Essais destructifs	18
2.2.1.1. Essai traditionnel de compression	18
2.2.1.2. Carottage	19
2.2.2. Essais non destructifs	21
2.2.2.1. Scléromètre (marteau de rebondissement de Chmidt)	21
2.2.2.2. Modèles de corrélation entre la résistance et l'indice de rebondissement.....	27
2.2.2.3. Méthode de calcul	27
2.2.3. Ultrason (Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique).....	28
2.2.3.1. Modèles de corrélation entre la résistance et la vitesse ultrasonique.....	33
2.2.4. La résistance à la pénétration	35
2.2.5. Essais d'arrachement (Pull-Out test, CAPO Test).....	35
2.2.6. Méthodes radioactives	36
2.2.7. Impact-écho	37
2.2.8. Méthode radar.....	37
2.2.9. Méthode résistivité du béton	38
2.2.10. Méthode de mesure de l'enrobage	38
2.3. Conclusion	39

Chapitre 3 : Matériaux et essais

3.1. Introduction	40
3.2. Caractérisation des matériaux utilisés	40

3.2.1. Ciment	40
3.2.2. Sable	40
3.2.3. Gravier	41
3.2.4. Eau de gâchage	42
3.2.5. Les adjuvants	42
3.3. Présentation des chantiers choisis	43
3.3.1. Projet N°1	43
3.3.2. Projet N°2	43
3.3.3. Projet N°3	43
3.3.4.1. Formulation des bétons	44
3.3.4.2. Préparation des mélanges	44
3.3.4.3. Essai réalisés sur béton frais	45
3.3.4.4. Environnement de conservation	45
3.3.4.5. Répartition du nombre d'éprouvettes	47
3.3.4.6. Essais sur béton durci	47
3.3.5. Préparation des éprouvettes.....	48
3.3.6. Essais ultrasoniques	49
3.3.7. Essais sclérodermiques	51
3.3.8. Ecrasement des éprouvettes	51
3.4. Résumé des variables étudiées	52

Chapitre4 : analyses des résultats et discussions

4.1. Introduction	54
4.2. Présentation des résultats	54
4.3. Analyse des résultats d'essai au scléromètre	56
4.3.1. Corrélation entre la résistance et l'indice de rebondissement	56
4.3.2. Analyse des résultats d'essais au scléromètre dans chaque projet	57
4.3.2.1. Corrélation entre la résistance et l'indice de rebondissement du projet 1(B1)	57
4.3.2.2. Corrélation entre la résistance et l'indice de rebondissement du projet 2(B2)	57
4.3.2.3. Corrélation entre la résistance et l'indice de rebondissement du projet 3(B3)	58

4.3.3. Effet de l'âge du béton sur corrélation Résistance-Indice	59
4.3.4. Etude de comparative aux autres modèles $R=f(I)$	60
4.4. Analyse des résultats d'essai à l'ultrason	61
4.4.1. Analyse des résultats d'essais à l'ultrason dans chaque projet	62
4.4.1.1. Corrélation entre la résistance et vitesse ultrasonique du projet 1(B1)	62
4.4.1.2. Corrélation entre la résistance et vitesse ultrasonique du projet 2(B2)	63
4.4.1.3. Corrélation entre la résistance et vitesse d'ultrasonique du projet 3(B3)	64
4.4.2. Effet de l'âge du béton sur corrélation Résistance-vitesse	65
4.4.3. Etude comparative aux autres modèles $R = f(I)$	66
4.5. Combinaison de deux essais non destructifs	68
4.6. Conclusion	69

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1 : Qualité du béton

Tableau 1.1: classe la qualité d'ouvrabilité du béton en fonction de l'affaissement au-cône d'Abrams.....	05
Tableau 1.2: consistance en fonction de temps de classe vébé.....	05
Tableau 1.3: classe de diamètre d'étalement.....	06
Tableau 1.4: pourcentage d'augmentation du diamètre total de D.....	06
Tableau 1.5 : principale qualité des bétons en fonctions de G/S et de granularité	11

Chapitre 2 : Essais destructifs et non destructifs

Tableau 2.1: corrélations proposées par différents auteurs entre la résistance à la compression R(MPa) et l'indice de rebondissement I.....	27
Tableau 2.2: Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion...	28
Tableau 2.3: Correction de la vitesse d'impulsion due à la variation de la température.....	32
Tableau 2.4: Expression des autres auteurs pour la corrélation de f_c et V.....	33
Tableau 2.5: Les valeurs de résistivités mesurées sur ouvrage sont comparées aux valeurs citées dans la recommandation RILEM TC 154-EMC.....	38

Chapitre 3 : Matériaux et essais

Tableau 3.1: caractéristique de différents ciments.....	40
Tableau 3.2: propriétés physiques d'identification de différents sables utilisés.....	41
Tableau 3.3: propriétés physiques d'identification de différents sables utilisés.....	42
Tableau 3.4: formulation des différents bétons étudiés	44
Tableau 3.5: affaissement au cône d'Abrams.....	45
Tableau 3.6: répartition du nombre d'éprouvettes confectionnées.....	47

Chapitre 4 : Analyses des résultats et discussion

Tableau 4.1 : résultats des essais destructifs et non destructif sur des éprouvettes conservés dans l'eau des différents bétons B1 et B2.	54
Tableau 4.2 : Résultats des essais destructifs et non destructif sur des éprouvettes conservés dans l'eau des différents bétons B3.	55
Tableau 4.3 : Différentes corrélation Résistance - Indice proposé les différents âges du béton.	59
Tableau 4.4 : Différentes corrélation Résistance - Indice proposé les différents âges du béton.	65

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : Qualité du béton

Fig.1.1 :Essai affaissement	04
Fig.1.2: consistomètre de vèbé.....	05
Fig.1.3 : consistomètre de v-funnel.....	07
Fig.1.4 : consistomètre de Boite en L.....	07
Fig.1.5: influence de la nature du ciment sur l'évolution des résistances en compression du béton.....	08
Fig.1.6.: évaluation de la résistance à la compression du béton en fonction de la finesse du ciment.....	09
Fig.1.7. : influence du rapport E/C sur l'évolution de la résistance à la compression du béton.....	11
Fig.1.8. : Effet du rapport G/S dans un béton ayant $C=350 \text{ kg/m}^3$, $E/C = 0,56$ (simulation).....	12
Fig.1.9: influence de la durée de cure humide sur l'évolution de la résistance d'un béton ordinaire avec $E/C=0.5$	14
Fig.1.10.: évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton a différentes températures.....	15
Fig.1.11. : Evolution des résistances de bétons conservés à des températures différentes.....	15
Fig.1.12: Influence des conditions de cure sur la résistance.....	16

Chapitre 2 : Essais destructifs et non destructifs

Fig.2.1.. : éprouvette cylindrique pour essai de compression.....	18
Fig.2.2 : Résistances de compressions relatives du béton.....	19
Fig.2.3 : essai de carottage.....	19
Fig.2.4 : méthode de carottage	20
Fig.2.5 : Principe du Scléromètre.....	21
Fig.2.6 :appareil de scleromètre.....	22
Fig.2.7: Vue en Coupe schématique du marteau de rebondissement de Schmidt type N.....	22
Fig.2.8: vue en coupe schématique du fonctionnement du marteau de rebondissement de Schmidt.....	23

Fig.2.9: Grille de mesure sur ouvrage.....	24
Fig.2.10 : point de mesure par scléromètre.....	24
Fig.2.11: Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter.....	25
Fig.2.12 : influence de la condition d'humidité de la surface (appareil horizontal).....	25
Fig.2.13: comparaison entre gravier dur et gravier doux (appareil vertical).....	26
Fig.2.14 : influence de différents types de granulats sur la valeur de l'indice de rebondissement des éprouvettes cylindriques.....	26
Fig.2.15: Schéma du diagramme du circuit de la vitesse de propagation.....	30
Fig.2.16 : Appareil d'auscultation sonique avec oscilloscope.....	30
Fig.2.17 : corrélation entre la résistance et la vitesse ultrasonique.....	31
Fig.2.18 : effet des dosage en granulats sur la relation entre la résistance et la vitesse d'impulsion.....	31
Fig.2.19 : effet des conditions humides sur la relation entre la vitesse d'impulsion et la résistance à la compression.....	32
Fig.2.20: Mesures en transparence (directe).....	34
Fig.2.21 : Mesures en surface.....	34
Fig.2.22: Mesures semi directe.....	34
Fig.2.23: schema general d'un penetrometere.....	35
Fig.2.24 : Appareil de test de résistance à l'arrachement.....	36
Fig.2.25: essai de radioactive	36
Fig.2.26: Représentation schématique du principe de la mesure par impact-écho.....	37
Fig.2.27: méthode de radar.....	37
Fig.2.28:application de la technique de mesure de la résistivité du béton sur situ.....	38
Fig.2.29: Présentation du covermeter en cours d'utilisation.	39

Chapitre 3 : Matériaux et essais

Fig.3.1 : ciment meftah.....	40
Fig.3.2: sable fin (de LAGHOUAT) et grossier (BOUZEGZA).....	41
Fig.3.3 : Gravier 8/15 et 15/25 de BOUZEGZA.....	41
Fig.3.4: Adjuvent ATA FLOW 120.....	42
Fig.3.5: Malaxage du béton.....	45

Fig.3.6: Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	45
Fig.3.7: fabrication des éprouvettes.....	46
Fig.3.8 : conservation des éprouvettes dans l'eau.....	46
Fig.3.9 : conservation des éprouvettes à l'air.....	46
Fig.3.10: Appareil du scléromètre utilisé.....	47
Fig.3.11 : appareil de l'ultrason utilisé.....	48
Fig.3.12: presse hydraulique (2000 kN).....	48
Fig.3.13: pesage des éprouvettes.....	49
Fig.3.14 : ponçage des éprouvettes à l'aide de la pierre abrasive.....	49
Fig.3.15 : Etalonnage de l'ultrason à l'aide du barreau de calibrage.....	50
Fig.3.16: le graissage des faces d'éprouvette avec la vaseline.....	50
Fig.3.17 : Mesure du temps de parcours des ondes ultrasonores.....	50
Fig.3.18 : Essai de scléromètre (mesure l'indice de rebondissement).....	51
Fig.3.19: essais d'écrasement des éprouvettes.....	52

Chapitre 4 analyses des résultats et discussion

Fig. 4.1 : Corrélation Résistance- Indice de rebondissement proposée pour l'ensemble des différents bétons.	56
Fig. 4.2 : Corrélation Résistance-Indice de rebondissement proposée pour l'ensemble de résultats de B1	57
Fig. 4.3 : Corrélation Résistance-Indice de rebondissement proposé pour l'ensemble de résultats de B2.	58
Fig. 4.4 : Corrélation Résistance-Indice de rebondissement proposé pour l'ensemble de résultats de B3	59
Fig. 4.5 : Corrélation Résistance – Indice de rebondissement fonction du l'âge.	60
Fig. 4.6 : Comparaison entre différents modèles de corrélation établis par divers auteurs pour des bétons fabriqués en laboratoire et conservé dans l'eau.	61
Fig. 4.7 : Corrélation Résistance – Vitesse ultrasonique proposée pour l'ensemble des différents bétons.	62
Fig. 4.8 : Corrélation Résistance- Vitesse ultrasonique proposé pour l'ensemble des résultats de B1	63
Fig. 4.9 : Corrélation Résistance-Vitesse ultrasonique proposé pour l'ensemble des résultats de B2	64

Fig. 4.10 : Courbe de corrélation de Résistance-Vitesse ultrasonique proposé pour l'ensemble des résultats de B3.	65
Fig. 4.11 : Courbe de corrélation résistance – vitesse ultrasonique fonction de l'âge du béton.	66
Fig. 4.12 : Comparaison entre différents modèles de corrélation Résistance – Vitesse ultrasonique établis par divers auteurs pour des bétons fabriqués en laboratoire et conservés dans l'eau.	67
Fig.4.13 : Corrélation combinée entre les é mesure non destructifs (indice de rebondissement « I » et la vitesse ultrasonique « V »).	68

Chapitre 1

Qualité du béton

1.1. Généralité

Le matériau béton, est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction avec environ 7 milliards de mètres cubes mis en œuvre annuellement. Simple en apparence, il est en réalité très complexe, avec une diversité d'applications et de méthodes de formulations. La qualité et le potentiel du matériau béton dans la structure dépend bien sûr, des matériaux de base qui entrent dans la formulation mais également des opérations de : malaxage, mise en œuvre, vibration et cure (protection contre la dessiccation). La résistance à la compression du béton est la propriété la plus importante avec les indicateurs de durabilité [1]. Dans ce chapitre, nous allons examiner les différents facteurs ayant une influence sur cette résistance, et sur lesquels on pourra compter pour l'amélioration de la qualité du béton.

1.2. La qualité de béton

La qualité de béton se base sur les matériaux et la mise en œuvre dans le chantier. La bonne construction est grâce à la qualité du béton premièrement ainsi que sa composition.

1.2.1. Propriétés de béton à l'état frais

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage. L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de béton ordinaire elle est principalement influencée par la nature et le dosage du liant, la forme des granulats, la granularité et la granulométrie et le dosage en eau. Parmi les essais qui nous permettent de calculer l'ouvrabilité d'un béton.

1.2.2. Ouvrabilité du béton

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend apte à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés. L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures.

De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité : type et dosage en ciment, forme des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau. Il ne faut cependant pas considérer que le dosage en eau peut être augmenté au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'améliorer l'ouvrabilité. Un excès d'eau se traduit, entre autres inconvénients, par un phénomène de « ressuage », qui est la création à la surface d'une pièce

en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation. Les autres conséquences d'une trop forte teneur en eau sont :

- la diminution de la compacité et, corrélativement, des résistances ;
- une porosité accrue ;
- un risque de ségrégation des constituants du béton ;
- un retrait augmenté ;
- un état de surface défectueux se traduisant notamment par du bullage.

La teneur en eau doit être strictement limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité et d'hydratation du ciment.

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance ; sa mesure peut être effectuée facilement sur chantier avec la méthode du cône d'Abrams ou « slump test », qui est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique.

1.2.2.1. Affaissement aux cônes d'Abram

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm. Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide. (NF EN 12350-2) [40]

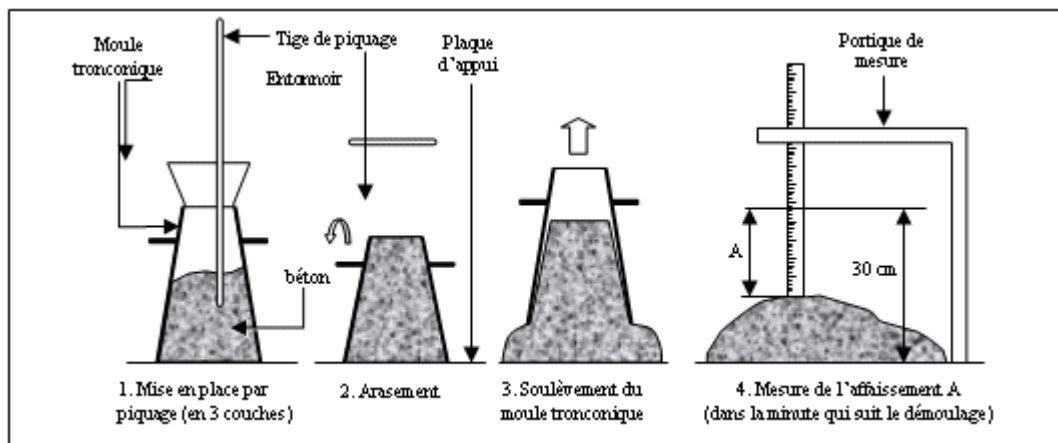


Fig.1.1 : Essai affaissement au cône d'Abrams.

On peut classer comme suit les qualités d'ouvrabilité (plasticité) du béton en fonction de l'affaissement au cône : [NA 16002] [27].

Tableau 1.1 : Classe la qualité d’ouvrabilité du béton en fonction de l’affaissement au-cône d’Abrams [27].

Affaissement en (mm) au cône d’Abrams	Consistance du béton	Classe
10 à 40	Ferme	S1
50 à 90	Plastique	S2
100 à 150	Très plastique	S3
160 à 210	Fluide	S4
≥220	Très fluide	S5

1.2.2.2. Méthode Vébé

Cet essai est particulièrement utile pour taster les bétons de faible ouvrabilité. La dimension maximale des granulats ne doit pas dépasser 40 mm. Dans cet essai la consistance est définie par le temps que met un cône de béton à remplir un volume connu, sous l’effet d’une vibration donnée. Plus ce temps est court et plus le béton sera considéré comme fluide.

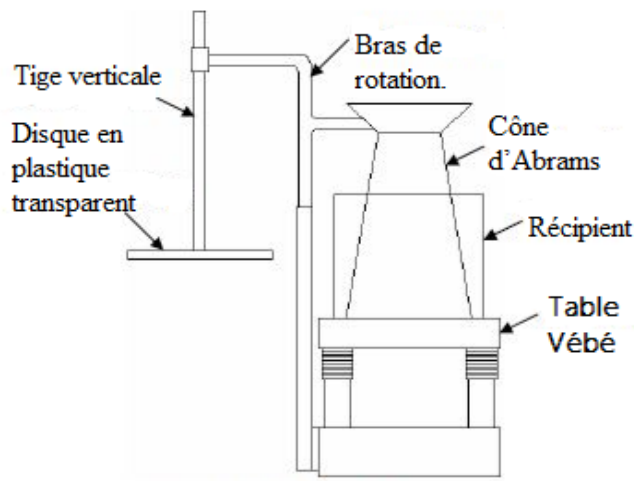


Fig. 1.2: Consistomètre de vébé.

La consistance est définie par le temps que met le béton pour couvrir la face intérieure du disque définie par la norme NF EN 12350-3 [26].

Plus le temps est court et plus le béton sera considéré comme fluide.

Tableau 1.2: Consistance en fonction de temps de classe vébé [32].

Classe vébé	V0	V1	V2	V3	V4
Temps à essai vébé	≥31s	30s à 21s	20s à 11s	10s à 5s	≤45s

1.2.2.3. Méthode d'étalement sur table de choc

Cet essai est particulièrement adapté aux bétons très fluides, fortement dosés en super plastifiant. Le diamètre du plus gros granulats ne doit pas dépasser 40 mm. La consistance est appréciée dans cet essai par l'étalement que connaît un cône de béton soumis à son propre poids et à une série de secousses. Plus l'étalement est grand et plus le béton est réputé être fluide. La norme (NF EN 12350-5) [39] définit les classes d'étalement sur tableau (1.3). Plus le diamètre moyen est grand, plus le béton est fluide.

Tableau 1.3 : Classe de diamètre d'étalement.

Classe de consistance	Diamètre d'étalement (mm)
F1	≤340
F2	350 à 410
F3	420 à 480
F4	490 à 550
F5	560 à 620
F6	≥630

1.2.2.4. Méthode d'étalement à la table à secousses

Cet essai est une mesure testant plus particulièrement l'aptitude du béton à s'étaler par écoulement, en effet il donne des valeurs faibles pour les bétons présentant une bonne cohésion et donne en revanche des valeurs plus élevées lorsque le béton a tendance à la ségrégation.

Tableau 1.4 : Pourcentage d'augmentation du diamètre total de D [27].

Pourcentage	Consistance
10% à 30%	Très ferme
30% à 50%	Ferme
50% à 70%	Plastique
70% à 100%	Très plastique

1.2.2.5. Essai v-funnel (BAP)

V-funnel est l'une des essais sur le béton frais qui en utilisant spécialement pour les BAP donc le V-funnel est dispositif complet de détermination de temps d'écoulement d'un entonnoir en V d'un BAP. Les résultats est de calculer le temps d'écoulement au cône pour

déterminer la viscosité du BAP Le temps d'écoulement comparer entre 8s et 14s pour un bon écoulement de BAP [34].



Fig.1.3 : Consistomètre de v-funnel.

1.2.2.6. Essai boit en L

Les résultats de cet essai s'expliquent par le remplissage de H2/H1. On prendre la valeur de ce rapport H2/H1 est supérieur à 0.8 qui montre un bon écoulement de BAP (NF NE 12350-10) [35].



Fig. 1.4 : Consistomètre de Boite en L.

1.2.3. Résistance à la compression de béton

Généralement le béton résiste particulièrement bien la compression par contre très mal à la traction. La résistance à la compression est la caractéristique la plus importante d'un béton durci.

1.3. Facteurs influençant l'évolution de la résistance à la compression

1.3.1. Qualité du ciment

Le ciment est une grande influence sur la résistance du béton. L'une des caractéristiques de la qualité d'un ciment est sa classe de résistance exprimée en MPa (25 MPa, 32, 40, 50 ...). Cette dernière est la résistance à la compression simple mesurée à 28 jours d'âge sur des éprouvettes en mortier normalisé. La résistance à la compression du béton ainsi étudié devra également répondre simultanément aux deux conditions suivantes : [27]

- $f_{CE} \geq f_{c_{28}} + \lambda (CE - C_{min})$
- $f_{CE} \geq 1.1 f_{c_{28}}$

Avec :

- F_{ce} : la résistance moyenne à la compression du béton obtenue sur trois éprouvettes ;
- $F_{c_{28}}$: la résistance caractéristique spécifiée du béton à 28 jours ;
- CE : la résistance à la compression du ciment à 28 jours ;
- C min : la valeur minimale de la résistance à la compression du ciment à 28 jours (classe minimale garantie à 99%) ;
- λ : un coefficient pris égal à 1 sauf justification de la relation entre la résistance du béton et celle du ciment utilisé ;

Figure (1.5) montre l'évolution des résistances en compression d'un béton gâché avec trois ciments différents : un CPA HPR, un CPA 45R, un CPJ 45.

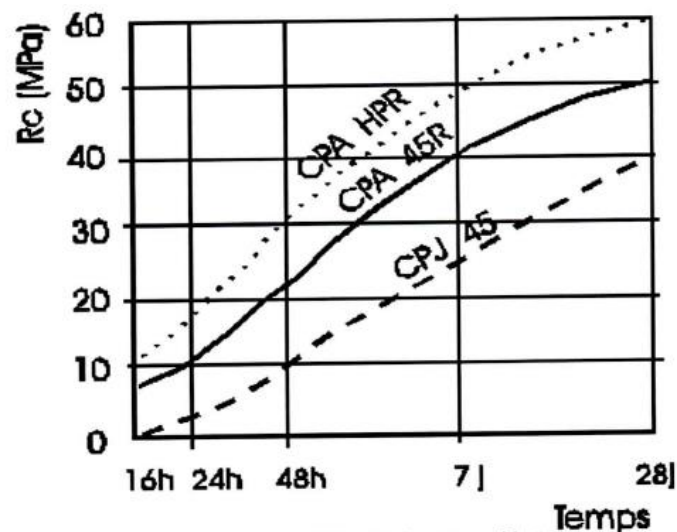


Fig. 1.5: Influence de la nature du ciment sur l'évolution des résistances en compression du béton [4].

Pratiquement, les résistances du béton croissent linéairement en fonction de la finesse de mouture du liant, surtout aux jeunes âges. La figure (1.6) montre l'évolution de la résistance en compression du béton en fonction de la finesse du ciment.

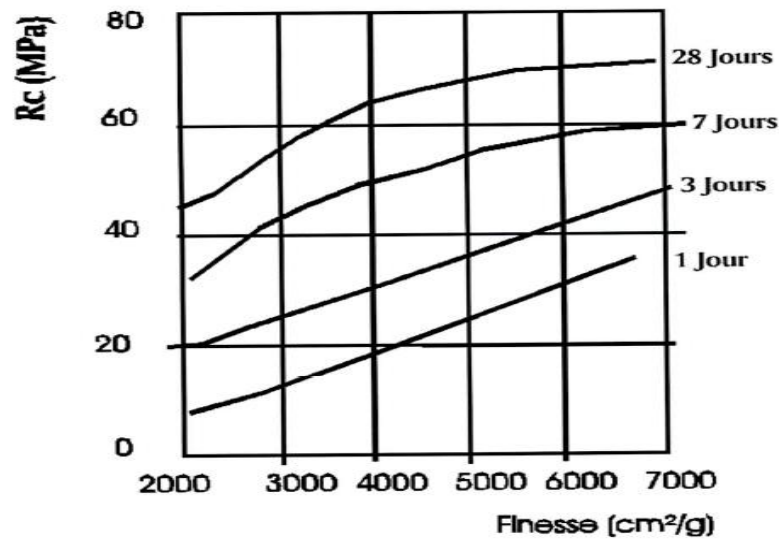


Fig. 1.6: Evaluation de la résistance à la compression du béton en fonction de la finesse du ciment [4].

1.3.2. Qualité du granulat

Les granulats sont s'appeler aussi les matériaux inertes (sable, gravier ou cailloux), qui agglomérés par un liant constituent le squelette du béton. Les granulats participent à la résistance caractéristique et à la durabilité du béton. Il contient essentiellement par leur nature et qualité, granularité, forme, D_{max} , propreté, module de finesse [1].

Les granulats influencent la résistance à la compression du béton par leur :

- Nature et qualité : le choix des granulats est basé essentiellement d'une part sur la dureté satisfaisants et d'autre part sur l'adhésivité suffisante avec la pâte de ciment ;
- Forme : il faut éviter d'employer les granulats en forme de plats ou d'aiguilles.
- D_{max} : la classe granulaire repéré un granulat afin de la différencier de la différencier d'un autre. Cette classification désigne le granulat en indiquant son plus petit diamètre représentatif, d et son plus grand diamètre représentatif, D . Le granulat est appelé d/D .
- Propreté : les granulats employés doivent être propres et exempts de toutes matières étrangères.
- Modules de finesse : des études expérimentales ont montré qu'un bon sable à béton, doit avoir un module de finesse d'environ 2.2 à 2.8.

1.3.3. Qualité de l'eau de gâchage

L'eau joue un rôle déterminant dans la fabrication des mortiers et des bétons à base de liants hydrauliques. Elle agit non seulement pour conduire à la prise de ces matériaux, par réaction entre les constituants anhydres des ciments, mais aussi pour leur conférer certaines de leurs caractéristiques à l'état frais. L'eau utilisée pour formuler le béton doit être conforme à la norme NF EN 1008 [25].

1.3.4. Utilisation des adjuvants

Un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5 % de la masse du ciment) aux bétons, mortiers ou coulis, lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque les modifications des propriétés du mélange, à l'état frais ou durci. La norme européenne NF EN 934-2 [21]. Retient la classification suivante :

- *Plastifiant/réducteur d'eau ;*
- *Super plastifiant/haut réducteur d'eau ;*
- *Rétenteur d'eau ;*
- *Entraîneur d'air ;*
- *Accélérateur de prise ;*
- *Accélérateur de durcissement ;*
- *Retardateur de prise ;*
- *Hydrofuge de masse ;*
- *Plastifiant/réducteur d'eau/retardateur de prise ;*
- *Super plastifiants/haut réducteur d'eau/retardateur de prise ;*
- *Plastifiant/réducteur d'eau/accélérateur de prise ;*

1.3.5. Dosage en ciment et du dosage en eau (rapport C/E)

Le dosage en eau qui se traduit par le rapport Eau/Ciment (E/C) est un paramètre déterminant vis-à-vis de la porosité, de la résistance et donc de la durabilité du béton. Plus le rapport E/C est faible plus ces propriétés sont favorisées. En règle générale le rapport E/C est compris entre 0,4 et 0,6 [27]. La quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du ciment est de l'ordre de 20 à 25 % de la quantité de ciment en masse. Le reste de l'eau permet d'assurer la maniabilité du béton à l'état frais.

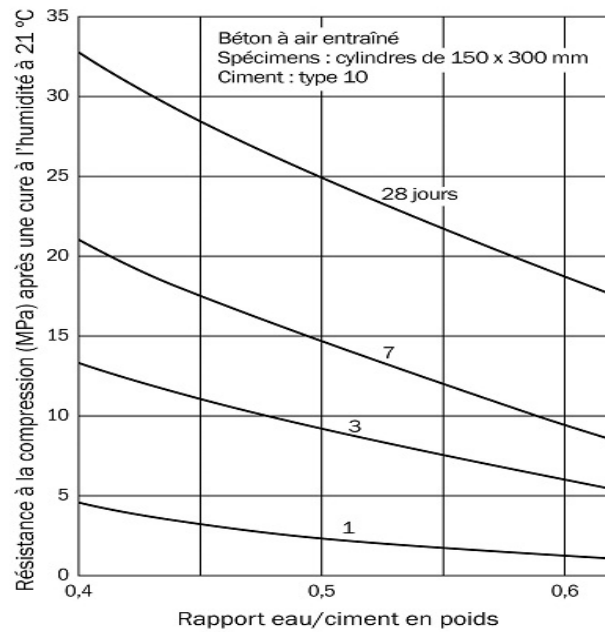


Fig. 1.7 : Influence du rapport E/C sur l'évolution de la résistance à la compression du béton [2].

1.3.6. Granularité (Rapport G/S)

Les appréciations concernant l'influence des proportions relatives de sable et gravier (rapport G/S) ainsi que la continuité ou discontinuité de la courbe granulométrique sur les différentes qualités des bétons sont résumées dans le tableau 1.5. La valeur courante du rapport G/S peut, en général, être prise égale à 2.0, mais on peut la faire varier entre 1.5 et 2.4 selon les caractéristiques du béton recherchées [3].

Tableau 1.5: Principales qualités des bétons en fonction de G/S et de granularité [27].

Désignation	Pour une bonne ouvrabilité	Pour une bonne résistance
Finesse du sable	Plutôt fin	Plutôt grossier
Rapport (G/S)	À diminuer	À augmenter
Dosage en eau	À augmenter	À diminuer
Granularité	Continue préférable	Discontinue légèrement
D max	Plutôt petite	Plutôt port

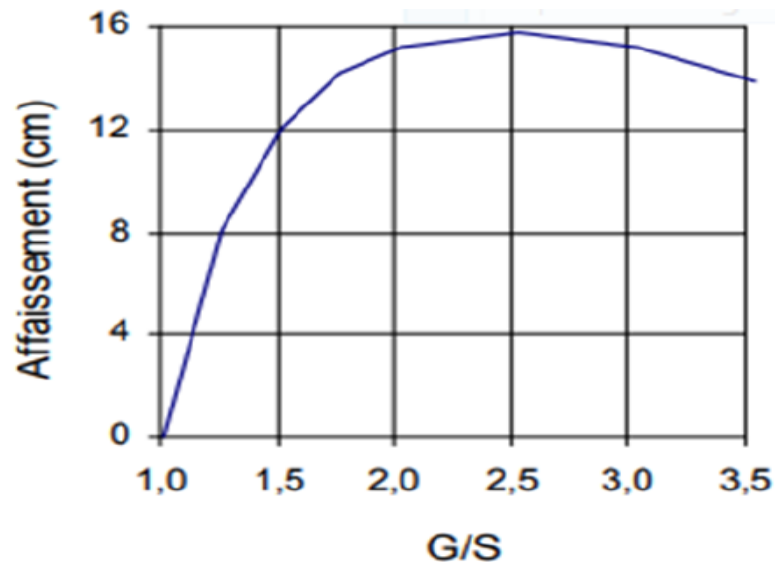


Fig. 1.8 : Effet du rapport G/S dans un béton ayant $C=350 \text{ kg/m}^3$, $E/C = 0,56$ (simulation) [5].

1.3.7. Processus de malaxage du béton

Le malaxage est une phase importante de la fabrication du béton, car il va conditionner la qualité de son homogénéité. Pour assurer la réussite de cette opération, il faut choisir un matériel adapté et déterminer un temps de malaxage suffisant. Le choix d'un appareil (bétonnière ou malaxeur) dépend de sa capacité de production, de son aptitude à malaxer différents types de mélanges (sec, plastique, etc.) pour donner des bétons réguliers.

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

1.3.8. Qualité d'exécution

1.3.8.1. Transport du béton

Le transport du béton frais jusqu'au lieu de coulage fait appel à des matériels très différents, selon qu'il s'agit de parcourir de courtes distances sur un chantier ou qu'il doit être acheminé depuis une centrale de fabrication, parfois éloignée de plusieurs kilomètres. Le temps cumulé de transport et de déchargement doit être limité à 1h 30min environ dans des conditions normales température (voisines de 20°C). Le risque rencontré est une chute de la maniabilité du béton. L'emploi de retardateurs de prise et de plastifiants permet de résoudre ce type de difficultés.

1.3.8.2. Mise en place du béton

Le béton doit être mis en place avant tout commencement de prise par des procédés lui conservant son homogénéité. Leur emplacement sera prévu lors du calepinage pour correspondre à la jonction des éléments constitutifs, de façon à ne pas créer un joint gênant pour l'aspect du parement de béton. Les surfaces de reprise doivent être rugueuses (un repiquage peut parfois s'avérer nécessaire) pour faciliter l'adhérence et humidifiées lorsqu'il s'agit d'un béton déjà durci [6].

1.3.8.3. Vibration du béton

La vibration appliquée au béton frais a pour fonction de favoriser l'arrangement des grains qui sont les constituants du béton. Son rôle est double :

- La mise en place est facilitée : remplissage des moules, enrobage des armatures.
- Le béton obtenu présente une compacité plus forte, avec moins de vides d'air (effets de serrage).

Par voie de conséquence, il est possible de faire des bétons avec un taux d'eau de gâchage plus faible, ce qui a pour effet de diminuer leur porosité, d'accroître leurs caractéristiques mécaniques et leur durabilité et d'améliorer leur aspect de surface.

1.3.8.4. Cure de béton

La cure du béton est la protection apportée pour éviter sa dessiccation et lui assurer une maturation satisfaisante. Elle est particulièrement indispensable pour les dalles et les chaussées, surtout lorsque les conditions atmosphériques sont défavorables.

Les procédés de cure : Ce sont des moyens simples tels que l'humidification renouvelée de la surface ou la mise en place d'une bâche plastique (polyane), ou la pulvérisation de produits de cure qui constituent un film imperméable à la surface du béton.

La durée de cure : La durée de la cure dépend essentiellement des conditions ambiantes et de l'évolution du durcissement du béton. Elle est réalisée soit par la pulvérisation d'un produit de cure, soit par la mise en place d'un film de polyéthylène translucide ou d'un géotextile régulièrement humidifié.

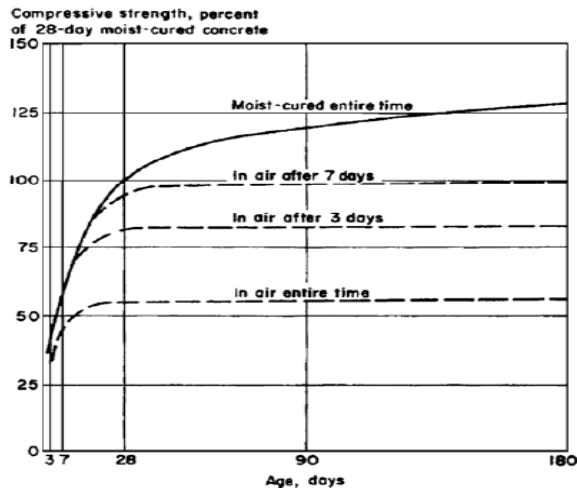


Fig. 1.9: Influence de la durée de cure humide sur l'évolution de la résistance d'un béton ordinaire avec $E/C=0.5$ [4].

1.3.9. Les conditions de murissement du béton

1.3.9.1. Température

Les deux cas extrêmes qui se présentent sur chantier sont : le bétonnage par temps chaud et le bétonnage par temps froid.

Le bétonnage par temps froid :

Le froid est une cause de ralentissement des réactions d'hydratation du ciment, et même à arrêter la prise du béton si la température descend en dessous de 0°C , parce que l'eau de gâchage transforme en glace, et provoque une augmentation de volume qui crée une migration de l'eau dus à la formation de fissures internes. Pour cela, il faut permettre au béton d'atteindre une résistance suffisante, au minimum de 5 MPa, pour résister aux effets du gel. L'évolution des résistances en fonction du temps pour des essais réalisés par Bayfors est montrée sur la figure 1.10. Selon cette figure, nous remarquons l'élévation de la température avec la résistance à court terme, mais cela n'est plus vrai à 28 jours [7]. Selon cette figure, nous constatant que lorsque la température s'élève la résistance à court terme s'élève mais cela n'est plus vrai à 28 jours.

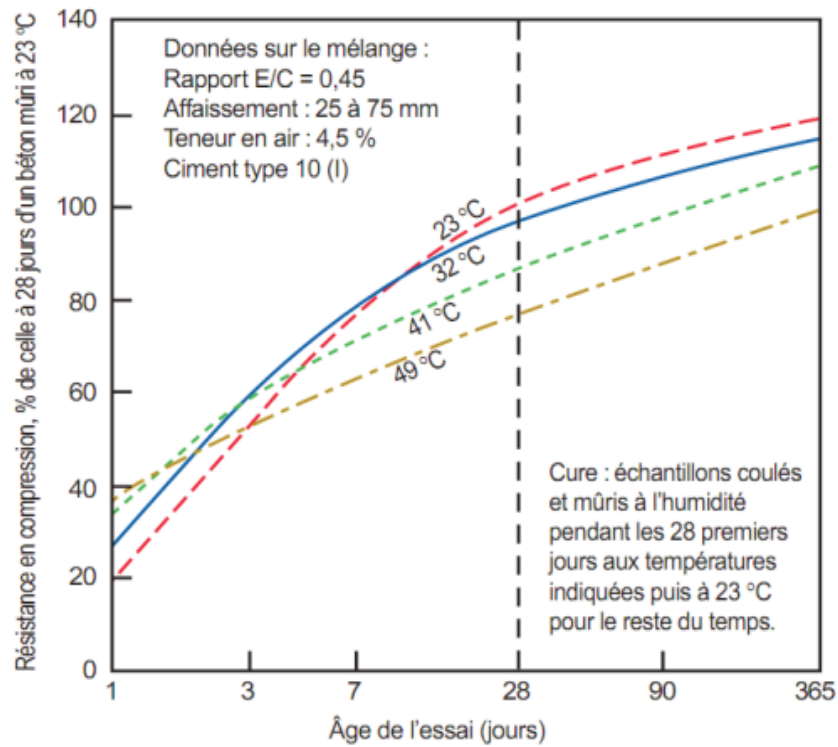


Fig. 1.10: Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton a différentes températures.

Le bétonnage par temps chaud :

Le degré d'hydratation évolue plus rapidement, les réactions d'hydratation du ciment sont accélérées, les temps de prise et de durcissement sont diminués. A température très élève on a une augmentation de sa résistance mécanique pendant une durée très courte et une résistance à long terme faible (Fig. 1.11).

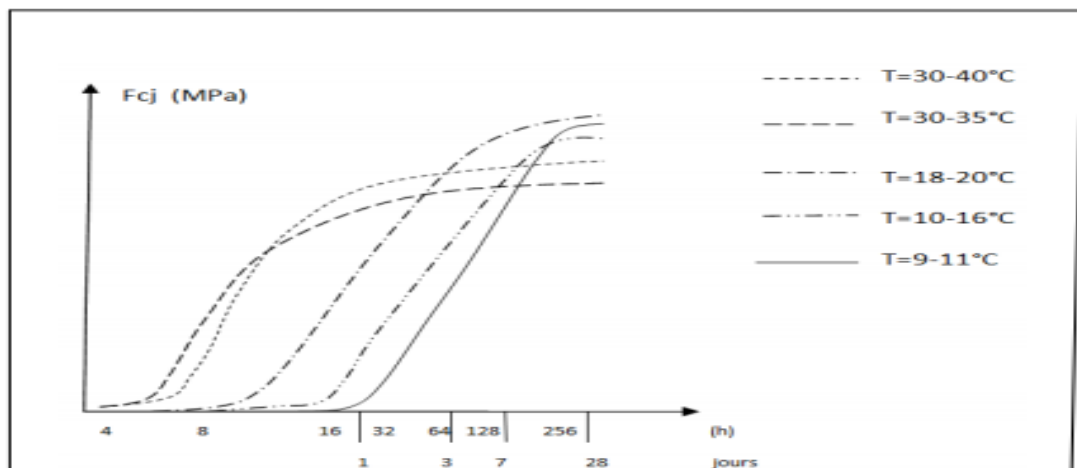


Figure 1.11: Evolution des résistances de bétons conservés à des températures différentes [7].

1.3.9.2. Cure humide

L'état hygrométrique du béton a une importance quant à l'évolution du volume des vides et par conséquent des résistances. L'hydratation du ciment se fait continuellement et s'accompagne d'un remplissage des capillaires par les amas d'hydrates, et la porosité de la pâte se voit ainsi réduite [7].

L'influence de la cure humide sur la résistance du béton est montrée d'une manière très claire par les données de la figure 1.12. Cette dernière montre qu'après 180 jours et avec un rapport E/C donné, la résistance du béton continuellement curé à l'humidité était 3 fois plus grande que celle du béton continuellement curé à l'air. Pour maintenir le processus d'hydratation et assurer une quantité satisfaisante du développement de la résistance, une période minimale de 7 jours pour la cure à l'humidité est généralement recommandée pour un béton à ciment portland normal [7].

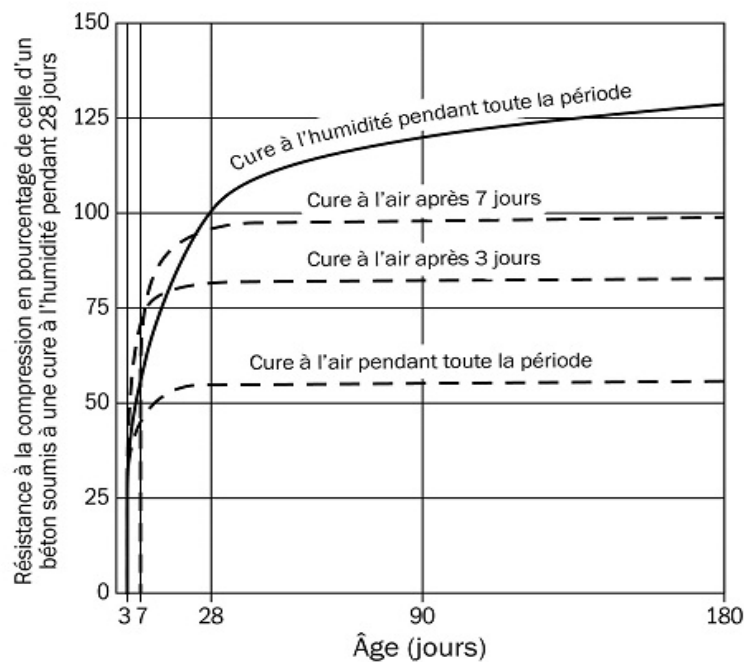


Fig. 1.12 : Influence des conditions de cure sur la résistance [7].

La cure humide influence aussi le fluage et le retrait. Pour le degré du fluage d'un béton donné, les déformations différées sont plus importantes que l'humidité relative est faible. L'accroissement de l'humidité fait dilater le béton alors que la diminution le fait contracter.

1.3.10. Age du béton

Le béton est un matériau vieillissant, ce qui signifie que ses propriétés mécaniques (module d'élasticité, résistance) évoluent en fonction de l'avancement de la réaction

d'hydratation du ciment. La réaction d'hydratation du ciment est une réaction très exothermique. Le durcissement du béton se fait alors avec des élévations de température qui peuvent atteindre 50°C dans les structures massives. De plus, l'hydratation du ciment est une réaction thermo-activée, ce qui signifie que la vitesse à laquelle se fait cette réaction chimique croît avec la température.

La résistance maximum d'un béton s'acquiert progressivement avec le temps, alors qu'au bout de 7 jours de prise, un béton acquies de 40 à 60% de sa résistance finale et de 60 à 80% au bout de 28 jours.

1.4. Durabilité du béton

La durabilité d'un ouvrage est caractérisée par deux éléments. Tout d'abord, la durabilité du maintien de ses fonctions, c'est-à-dire sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lesquelles il a été construit. Le deuxième élément caractéristique d'un ouvrage est le maintien de son niveau de fiabilité et de son aspect esthétique.

Pendant longtemps, les critères de durabilité du béton étaient liés aux performances mécaniques requises à 28 jours, mettant de côté l'action exercée par l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage. En effet, de nombreux phénomènes peuvent nuire à la durabilité du béton : la carbonatation, la corrosion des armatures et l'action des chlorure. C'est ainsi que la norme EN206 [32] « Béton : spécifications, performances, production et conformité » définit différentes classes d'environnement auxquelles le béton sera soumis. En fonction des risques d'agression et de l'environnement de l'ouvrage, les performances du béton et sa durabilité sont donc optimisées [20].

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre une revue bibliographie sur les facteurs influençant la qualité du béton à l'état frais et à l'état durci est réalisée. La qualité du béton est généralement caractérisée par trois paramètres : l'ouvrabilité, la résistance et la durabilité. La qualité du béton dépend des caractéristiques de leurs constituants, en particulier, les granulats qui occupent environ 75% du volume total du béton. Ainsi que l'influence de dosage de ciment, l'eau et les adjuvants sur la qualité de béton qui reste primordiale.

CHAPITRE 2

ESSAIS NON DESTRUCTIFS SUR LE BETON

2.1. Introduction

L'évaluation de la résistance à la compression du béton sur site sur des nouvelles ou anciennes constructions est indispensable. La solution réside au recours aux essais non destructifs (END) qui sont rapide et moins coûteuses.

2.2. Contrôle de la qualité du béton sur site

2.2.1. Essais destructifs

Les essais destructifs, ceux basés sur la détérioration des matériaux contrôlés pour déterminer les performances souhaitées et les propriétés aussi.

2.2.1.1. Essai traditionnel de compression

La caractérisation du comportement en compression est effectuée conformément à la norme [NF EN 12390-3] [31], sur des éprouvettes cylindriques et cubiques de dimensions (16x 32 cm²) et (10 x 10 x 10 cm³) respectivement, mûries à l'eau. Les résultats de la résistance à la compression RC obtenus à 7, 14, 28 jours représentent la moyenne de trois échantillons. Le principe de l'essai est de soumettre une éprouvette cylindrique, cubique ou une carotte à une force croissante et constante jusqu'à rupture de celle-ci afin de déterminer sa résistance à la compression (Fig. 2.1). Les conditions de préparation et de conservation sont définies dans la norme EN 12390-2 (2007) [36]. La résistance relative dans le cas d'utilisation d'éprouvettes cubiques est donnée dans la figure 2.2.



Fig. 2.1 : Eprouvette cylindrique pour essai de compression

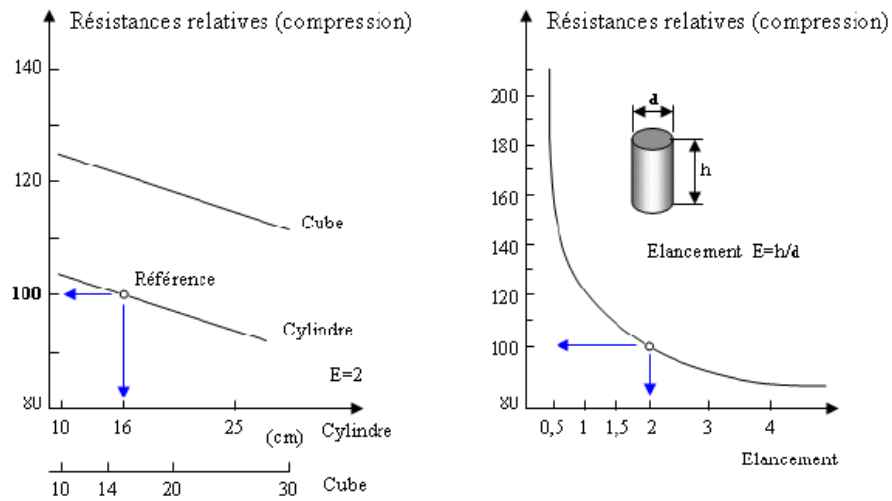


Fig. 2.2 : Résistances de compressions relatives du béton

2.2.1.2. Carottage

Cet essai est encadré par les normes européennes :

- EN 12504-1 [37] : Carottes
- EN 13791[38] : Evaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton.

Le carottage se déroule selon les opérations suivantes (Figures 2.3 à 2.4):

- Repérer préalablement les armatures métalliques internes au béton pour implanter le carottage et éviter les armatures.
- Fixer la carotteuse sur la partie d'ouvrage à partir de laquelle la carotte doit être extraite.
- Carotter à l'aide d'un carottier de diamètre adapté pour l'examen ou l'essai à réaliser.
- Extraire la carotte et la conditionner en fonction de l'essai à réaliser.
- Reboucher à l'aide d'un produit adapté (béton ou mortier sans retrait).



Fig. 2.3 : Essai de carottage

Le diamètre du carottier doit être d'au moins 3 fois le diamètre nominal du plus gros granulat du béton et il est conseillé d'aller jusqu'à 5 fois le diamètre. Pour des bétons dont la taille maximale des granulats est de 25 mm (D), il est recommandé d'utiliser des carottiers de diamètre supérieur à 70 mm. Pour l'estimation de la résistance du béton, l'éprouvette carotée doit avoir un élancement de 2. Cette longueur est obtenue après élimination d'au moins 30 mm à chacune des extrémités de la carotte et en évitant si possible, les inclusions et les défauts apparents très nets de compacité. Cette longueur est évidemment limitée par la zone de béton à carotter. Dans le cas où l'épaisseur du produit est faible, l'utilisation d'éprouvettes carotées d'un élancement inférieur à 1,5 doit faire l'objet d'une concertation préalable entre les parties. L'élancement de 1 est toutefois le minimum.

Pour évaluer sur site la résistance à la compression des structures et des éléments préfabriqués en béton, l'EN 13791[38] peut être utilisée.



Fig. 2.4 : Méthode de carottage

La carotteuse présente de nombreux avantages, entre autres :

- Une grande précision de percement ;
- Le silence de fonctionnement par rapport à un marteau piqueur La possibilité de forer simultanément et sans déviation les armatures présentes dans le béton ;
- L'absence de poussière en raison du travail à l'eau ou à sec avec aspirateur ;

Par ailleurs, l'on retrouve une grande capacité de carottage tant au niveau du diamètre que de la profondeur. Les inconvénients de carottage béton sont :

- Matériel lourd à la manutention ;
- Risques vis à vis de la sécurité ;
- Parfois, difficulté d'extraction de carottes (rupture en partie courante) ;

2.2.2. Essais non destructifs

Il y'a grande variétés de méthodes non destructives permettant d'évaluer de nombreuses caractéristiques du béton.

2.2.2.1. Scléromètre (marteau de rebondissement de Schmidt)

La mesure de la dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est simple et facile, rapide, pratiquent de contrôler des régularités des bétons d'un ouvrage. L'augmentation de la dureté du béton avec l'âge contient de méthode d'essai pour mesurer sa résistance à la compression.

Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilise de nos jours il été développe par Ernst Schmidt en (1948) et est connu sous le nom l'essai au marteau Schmidt ou essai au scléromètre. Le marteau de Schmidt est resté le seul instrument connu qui utilise le principe de rebondissement pour les essais sur le béton [1].

Le principe de base de l'essai au scléromètre est que le rebond d'une masse élastique dépend de la dureté de la surface sur la quelle frappe la masse. Dans l'essai au scléromètre une masse approximative de 1.8 kg montée sur un ressort a une quantité potentielle fixe d'énergie qui lui est transmise par un ressort tendu à partir d'une position fixe, ce que l'on obtient en pressant la tête du marteau contre la surface du béton mis à l'essai. Lors de son relâchement, la masse rebondit depuis la tête, toujours en contact avec la surface du béton et la distance qu'elle parcourt, exprimée en pourcentage de l'extension initiale du ressort est appelée l'indice de rebondissement. Cet indice est indiqué par un curseur qui se déplace le long d'une règle graduée [1]. Une description de l'essai est donnée par la norme NF EN 12504-2 [30].

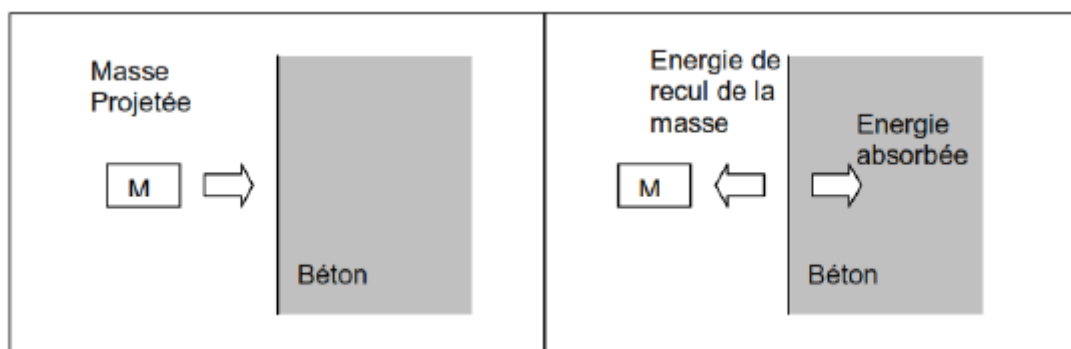


Fig. 2.5 : Principe du Scléromètre.

Il existe plusieurs modèles de scléromètres selon le type de recul ainsi que l'énergie d'impact. Le modèle le plus utilisé est le scléromètre SCHMIDT (Fig. 2.6).



Fig. 2.6 : Appareil de scléromètre (marteau de rebondissement de Schmidt type N).

L'appareil est composé d'une masselotte chargée par un ressort qui se projette sur une tige métallique appelée tige de percussion. Il est livré avec une pierre à polir et un bloc d'étalonnage (Fig.2.7).

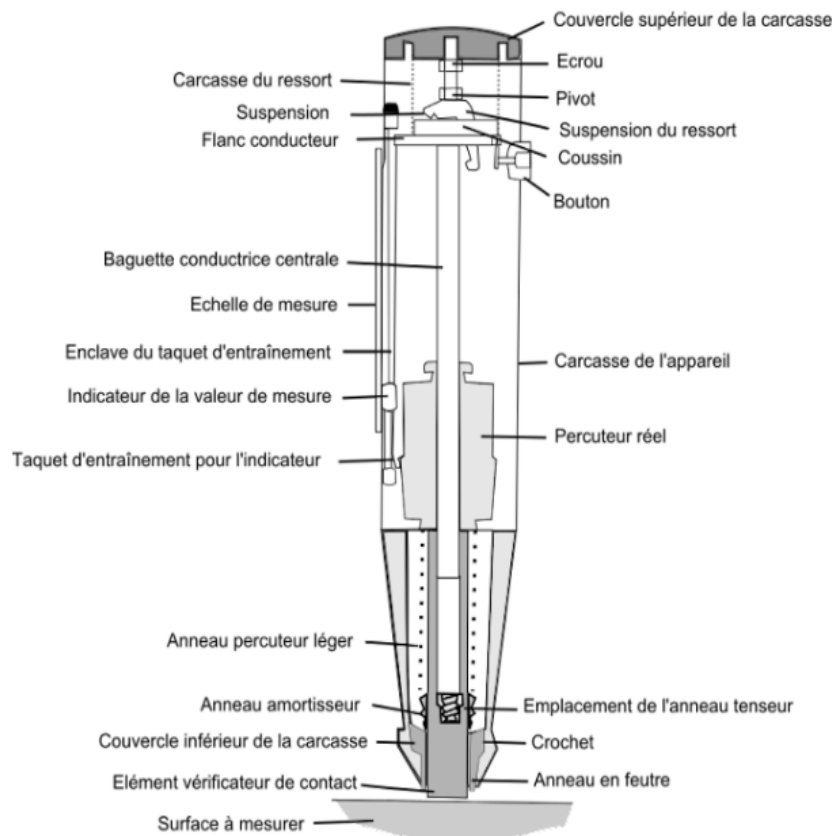


Fig.2.7 : Vue en Coupe schématique du marteau de rebondissement de Schmidt type N.

Pour fonctionner cet essai, premièrement en sélectionnera notre objet (poutre, poteau, voile...) et lissé la surface par leur broche après en prépare l'instrument pour l'essai, libérer la tige de sa position verrouillée en poussant violemment la tige le béton, ce qui permet au corps de s'éloigner lentement du béton. Ceci fait sortie la tige du corps et le verrou attache la masse du marteau à la tige (Fig.2.8. a). La tige est alors maintenue perpendiculaire à la surface du béton et en poussant lentement le corps vers le béton (Fig.2.8. b). Ce mouvement va tendre qui tient la masse au corps. Quand le corps est poussé à la limite, le verrou est automatiquement libéré, et l'énergie stockée en ressort venant propulser la masse vers le bout de la tige et par là, la surface du béton (Fig.2.8.c). la tige de percussion réagit et retransmet le rebondissement à la masse (Fig.2.8. d).

Lors de rebondissent, le curseur coulisse avec la masse et il s'arrête à la distance maximale ou la masse atteint après le rebondissement. Un bouton du côté du corps est poussé pour fermer à clef la tige dans la position rétractée et l'indice de rebondissement est indiqué sur une échelle linéaire solidaire du bâti de l'instrument [8].

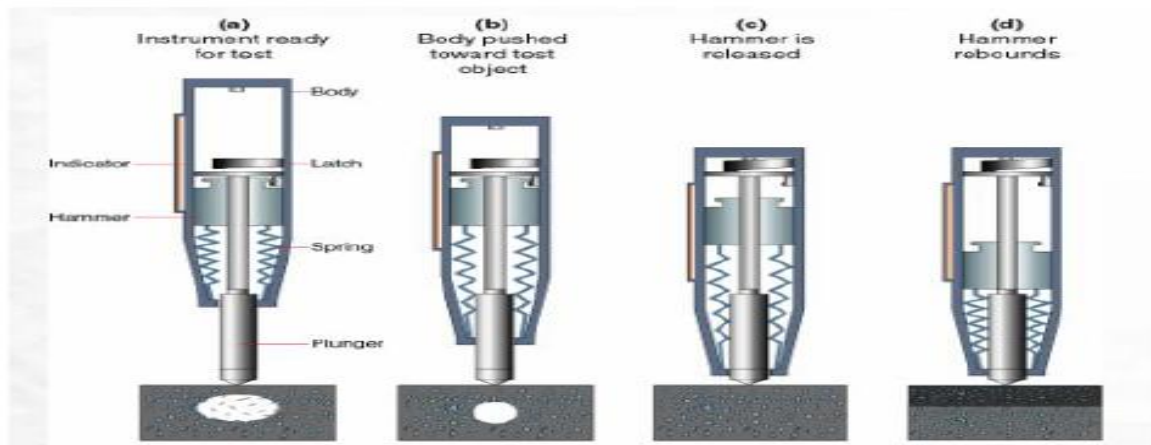


Fig. 2.8: Coupe schématique du fonctionnement du marteau de rebondissement de Schmidt. [8].

La surface de mesure doit être divisée en zones de 400 cm² au moins, et structurée en une grille de points de mesure ayant pour espacement $d = 30$ à 50 mm (Fig. 2.9 et 2.10). Les points de mesures extrêmes doivent être au moins à 30 mm des bords de la surface testée. Effectuer au moins 10 à 12 mesures successives dans la même zone et de trouve leur moyenne exprimée sous forme de nombre entier [13].

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

Cet appareil peut être effectué à la position horizontale, au bien vertical vers le haut ou vers le bas, ou bien dans n'importe quel angle intermédiaire (Fig.2.11), à condition que le marteau soit fermement maintenu de manière à permettre à la tige de frapper perpendiculairement la surface d'essai. Il convient d'utiliser le scléromètre dans une température ambiante comprise entre 10 et 35°C.

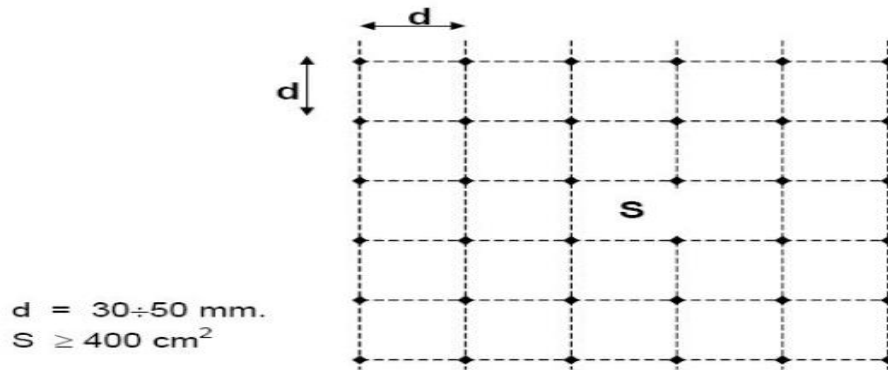


Fig. 2.9: Grille de mesure sur ouvrage [9].



Fig. 2.10 : Points de mesure par scléromètre

L'indice de rebondissement est la mesure enregistrée sur une échelle graduée fixe par rapport au bâti de l'appareil de scléromètre, après la projection d'une masselotte chargée par ressort sur une tige métallique en contact avec la surface du béton. Cette mesure est fonction de l'angle d'inclinaison de l'appareil par rapport à l'horizontal. L'indice de rebondissement est très influencé par les propriétés intrinsèques du béton ; selon que l'impact de l'essai se produit juste sur le granulats ou sur la pâte de ciment.

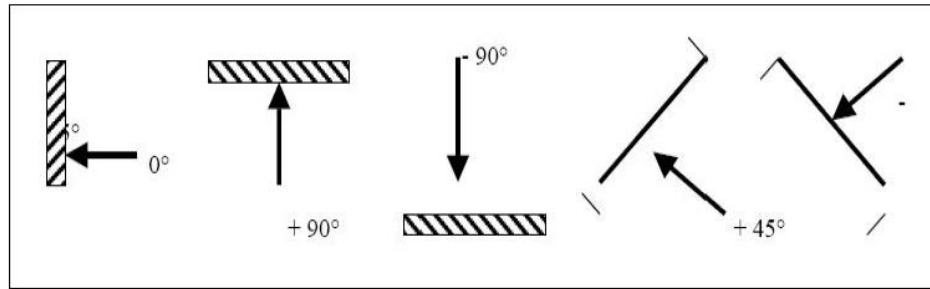


Fig. 2.11: Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter

L'essai est donc affecté par les facteurs suivants [10] :

- **Texture de la surface :** L'indice de rebondissement se trouve diminué par la rugosité de la surface.
- **Dimension, forme et rigidité de l'élément à tester :** Pour des éléments de petites dimensions (poutrelle, éprouvette), tout mouvement de l'élément entraîne une diminution de la valeur de l'indice de rebondissement. Pour y remédier, l'élément à tester doit être rigidement maintenu.
- **Age de l'élément à tester :** Des valeurs plus élevées de l'indice de rebondissement sont obtenus pour un béton de 7 jours que pour un béton de 28 jours.
- **Humidité extérieure et intérieure du béton :** Le degré de saturation du béton a un effet décisif sur la valeur de l'indice de rebondissement. Les essais sur des éprouvettes de béton à l'état saturé donnent des valeurs de l'indice de rebondissement 5 points en moins que lorsque les éprouvettes ont été testées à l'état sec (Fig.2.11).

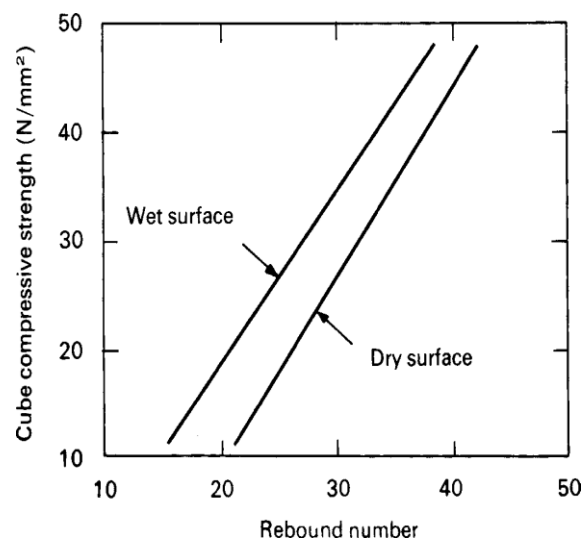


Fig.2.12 : Influence de la condition d'humidité de la surface (appareil horizontal) [11].

- **Type des granulats :** Pour des valeurs de la résistance à la compression égales, le béton fabriqué avec des granulats concassés donne des valeurs de l'indice de rebondissement de 7 points inférieures que pour un béton fabriqué avec des granulats naturels (Fig.2.13). La figure 2.14 montre une étude faite pour 4 différents types de granulats pour la fabrication d'éprouvettes destinées à l'essai au scléromètre (rebond Hammer).

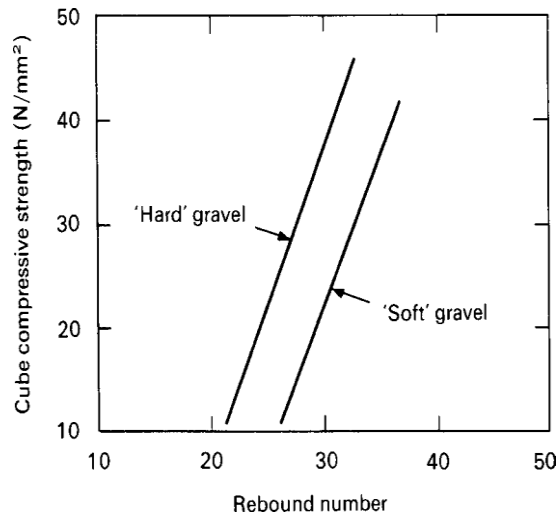


Fig. 2.13 : Comparaison entre gravier dur et gravier doux (appareil vertical) [11].

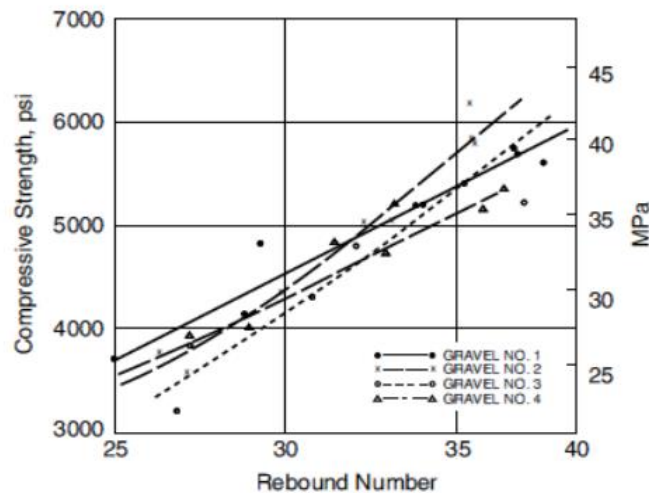


Fig. 2.14 : Influence de différents types de granulats sur la valeur de l'indice de rebondissement des éprouvettes cylindriques [8].

Type de ciment : les variations de la finesse du ciment Portland sont peu susceptibles d'être significatif, leur influence sur la corrélation de la résistance est moins de 10% [11]. Le ciment à dosage élevé en alumine peut avoir une résistance à la compression 100% plus

élevée que la résistance estimée en utilisant une courbe de corrélation basée sur le ciment Portland ordinaire [8].

- **Carbonatation de la surface du béton :** La surface de carbonatation affecte sérieusement les essais au scléromètre. Dans des vieux bétons, l'épaisseur de la surface de carbonatation peut atteindre quelques millimètres ; dans ce cas les valeurs de l'indice de rebondissement peuvent être 50% supérieures que pour une surface de béton sans carbonatation [8].

2.2.2.2. Modèles de corrélation entre la résistance et l'indice de rebondissement

Plusieurs modèles de corrélation ont été proposés par différents chercheurs comme la montre dans le tableau (2.1).

Tableau 2.1 : Corrélations proposées par différents auteurs entre la résistance à la compression R(MPa) et l'indice de rebondissement I [1].

Auteurs	Expression	Fc (MPa)	Moule	Type d'agrégats	Note
Ravindrajah et al. (1988)	$F_c = 7.25e^{0.08R}$	15.0 à 75.0	Cube 100mm	Granite (Dmax=20mm)	
Almeida (1993)	$F_c = 1.040R^{1.115}$ $F_c = 1.041R^{1.115}$	40.1 à 120.3	Cube 150mm	Granite Dmax=25mm	1 ^{er} et 2 ^{eme} groupe de test
Gonçalves (1995)	$F_c = 1.73R - 34.3$	18.0 à 42.0	Carotte 70x70mm		28 jours à 3 mois
Qasrawi (2000)	$F_c = 1.353R - 17.393$	6.0 à 42.0	Cube 150mm	Variable	Conservation à l'air
Soshiroda et voraputh (1999)	$F_{c_{28}} = 161R^{28-1.37}$ $F_{c_{28}} = 147R^{28-16.85}$	20.0 à 65.0	Cube 150mm	Gravier	V1-1 jour V2- 28jours
Proceq-digischmidt	$F_{c_7} = 1.4553R^7 - 22.817$ $F_{c_{14}} = 1.398R^{14} - 20.17$	25.1 à 33.1	Cube 200mm	Gravier Dmax=32mm	7 jours 14 jours à 56 jours
Pascal et al. (2000)	$F_c = 0.000135R^{3.4424}$	30.0 à 150.0	Cube 150mm	Calcaire Dmax=15mm	-
Lima et silva (2000)	$F_c = 0.0501R^{1.8428}$	25.1 à 33.1	Cylindre		-

2.2.2.3. Méthode de calcul par la courbe de calibrage

Cette méthode est utilisée dans les usines de préfabrication où les matières premières sont relativement constantes. La courbe de calibrage est déterminée en effectuant l'essai au scléromètre sur au minimum 30 éprouvettes. L'arrête de l'éprouvette ne devrait pas être

inférieure à 15 cm. Les éprouvettes doivent être soumises au même régime de durcissement que celui des éléments préfabriqués. Dans le cas où les mesures sclérométriques sont effectuées sur la face de coulage du béton de l'élément préfabriqué, il est recommandé de faire pareil pour les éprouvettes.

Après les essais au scléromètre, les éprouvettes sont soumises à un essai de compression lent dont la durée est plus d'une minute. Les résultats obtenus sont portés sur un graphique représentant la courbe d'étalonnage dont le tracé concorde mieux avec les résultats expérimentaux en appliquant la méthode des moindres carrés.

La méthode de rebondissement a été introduite dans plusieurs normes comme la norme américaine ASTM C 805 « Méthode d'essai standard pour l'indice de rebondissement du béton durci » [14] et la norme européenne NF EN 12504-2 [30] « Essais pour béton dans les structures -partie 2 : Essais non destructifs – Détermination de l'indice de rebondissement ».

2.2.3. Ultrason (Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique)

Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de l'auscultation sonique consiste à mesurer le temps de propagation d'un train d'ondes entre deux points. Une partie de l'auscultateur, le transducteur, produit des ultrasons. Grâce aux propriétés piézoélectriques des matériaux, l'énergie électrique émise est transformée en énergie mécanique ultrasonore. Connaissant la distance « l » de l'émetteur au récepteur, il est possible de connaître la vitesse « v » de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité comme il a été décrit dans le tableau (2.2).

Tableau 2.2 : Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion [2].

Vitesse de propagation des impulsions (m/s)	Qualité du béton
Supérieure à 4500	Excellente
3500-4500	Bonne
300-3500	Moyenne
Inférieure à 3000	Douteuse

Trois types de propagation des ondes mécaniques sont créés quand la surface d'un milieu solide élastique est soumise à une charge dynamique ou vibratoire (ondes de compression, ondes de cisaillement et ondes de surface). Les ondes de compression se propagent à travers le milieu solide d'une manière identique aux ondes sonores qui se propagent dans l'air.

Chaque type d'onde se propage avec sa vitesse caractéristique qui dépend seulement des propriétés élastiques et de la densité du milieu comme le montre l'équation (II.1). En béton, les vitesses des ondes de cisaillement et de surface sont généralement 60% et 55% respectivement, de celle des ondes de compression. Alors ces dernières sont les plus importantes puisqu'elles sont les plus rapides et fournissent généralement des informations plus utiles. Pour un milieu solide élastique et homogène, la vitesse des ondes de compression (onde P) est donnée par l'équation (2.1) [15,29].

$$V = \sqrt{\frac{E.A}{\rho}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Où :

$$K = \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}$$

V : vitesse des ondes de compression ; E : est le module d'élasticité dynamique du béton ; ρ : est la masse volumique du béton ; μ : est le coefficient de poisson.

Pendant l'essai, le temps de propagation d'une impulsion ultrasonique traversant le béton est enregistré et la vitesse va être calculé par l'équation (2.2) [13].

$$V = \frac{L}{T} \dots\dots\dots (2.2)$$

Où :

V : la vitesse d'impulsion(m/s) ; L : la longueur du parcours (m) ; T : le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur. La qualité du béton est estimée généralement comme suit :

- 2500 m/s ≤ V < 3200 m/s béton de faible résistance ;
- 3200 m/s ≤ V < 3700 m/s béton de moyenne résistance ;
- 3700 m/s ≤ V < 4200 m/s béton à haute résistance ;
- V ≥ 4200 m/s béton à très haute résistance ;

L'appareillage est constitué d'un générateur d'impulsions électrique, d'une paire de transducteurs, d'un amplificateur et d'un dispositif électronique de mesure de temps permettant de mesure la durée écoulée entre le départ d'une impulsion générée par le transducteur-émetteur et son arrivée au transducteur-récepteur. Un barreau de calibrage est fourni pour permettre d'obtenir une ligne de référence de mesurage de vitesse. L'équipement peut inclure une batterie rechargeable et une unité de chargement, et également muni d'un afficheur pour le temps mesuré. Il peut également être relié à un oscilloscope, ou à tout autre dispositif d'affichage, pour observer la nature de l'impulsion reçue Figures (2.15 & 2.16).

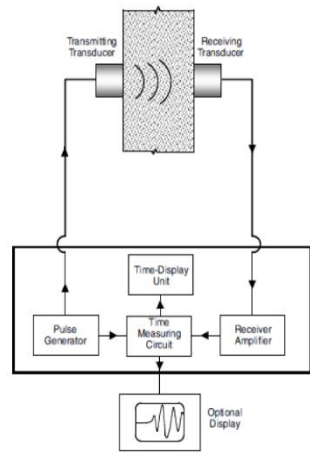


Fig. 2.15: Schéma du diagramme du circuit de la vitesse de propagation [15].



Fig. 2.16 : Appareil d'auscultation sonore avec oscilloscope.

La méthode de la vitesse d'impulsion est utilisée pour l'évaluation de la résistance à la compression du béton mais aussi pour la recherche de défauts proches de la surface dans les structures en béton, l'évaluation du durcissement du béton lors de la construction d'une méthode de béton coulé sur place et de coffrages glissants et l'évaluation de la profondeur des fissures. Malgré qu'il n'existe pas de relation physique directe entre la résistance à la compression du béton et la vitesse ultrasonique de propagation, la résistance peut être évaluée en établissant au préalable des courbes graphiques corrélant les deux paramètres (Fig.2.17).

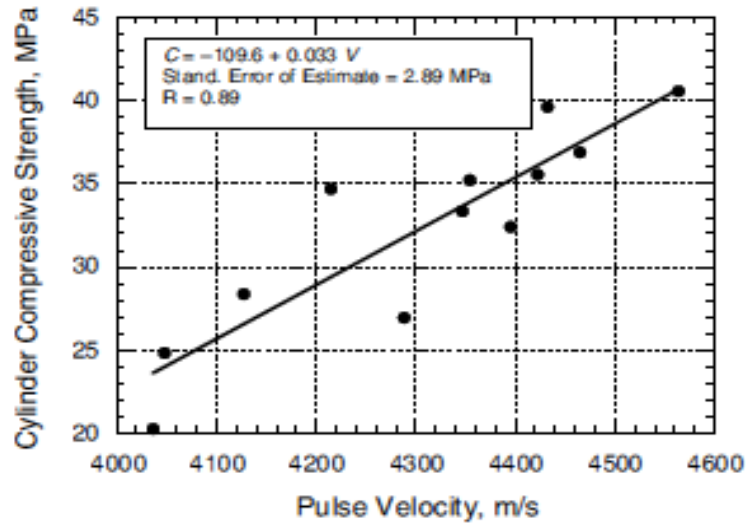


Fig. 2.17 : corrélation entre la résistance et la vitesse ultrasonique [15].

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

- **Dimension et type des granulats, granulométrie, teneur** : La vitesse d'impulsion est très affectée par le type et la teneur en granulats. Pour une même composition de béton et une même résistance à la compression, le béton composé avec de granulats arrondis à la plus faible vitesse de propagation, les granulats concassés par contre donnent une valeur plus élevée de la vitesse de propagation (Fig. 2.18).

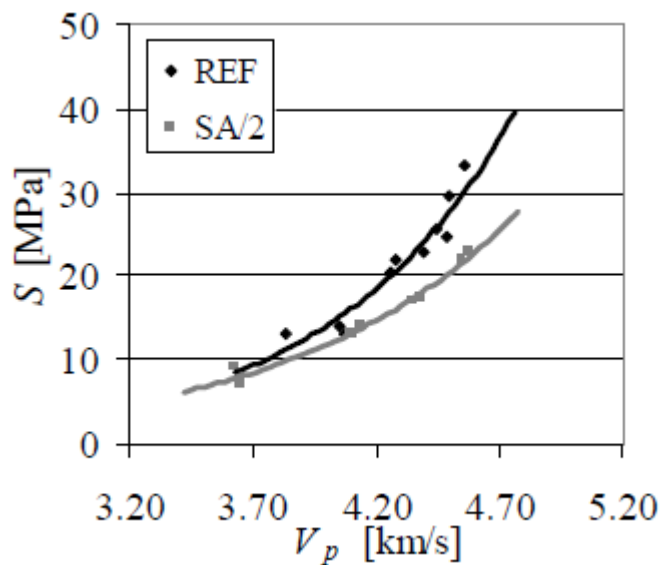


Fig. 2.18 : Effet des dosages en granulats sur la relation entre la résistance et la vitesse d'impulsion [16].

- **Type de ciment :** Le type de ciment n'a pas d'influence directe sur la vitesse de propagation. Le taux d'hydratation diffère d'un ciment à un autre et ceci influence la vitesse de propagation.
- **Le rapport eau/ciment (E/C) :** Lorsque le rapport E/C augmente, la résistance du béton à la compression et la valeur de la vitesse de la propagation correspondante diminue en supposant la même composition de béton.
- **L'âge du béton :** Le phénomène est similaire à celui du développement de la résistance à la compression du béton.
- **Positionnement du transducteur :** Un contact impropre peut mener à des lectures erronées de la vitesse de propagation.
- **Température du béton :** la variations de la température ente 10°C et 30°C n'entraînent pas un effet significatif sur la vitesse de l'impulsion. Pour les températures non comprises dans cette plage, des corrections indiquées sur le tableau [15,30].

Tableau 2.3 : Correction de la vitesse d'impulsion due à la variation de la température [15].

Température du béton (C°)	Correction (%)	
	Béton séché à air	Béton saturé d'eau
60	+5	+4
40	+2	+1.7
20	0	0
0	-0.5	-1
Au-dessous de -4	-1.5	-7.5

- **L'humidité et condition de cure du béton :** La valeur de la vitesse de propagation pour un béton saturé est plus élevée jusqu'à 5% que pour un béton qui durcit à l'air (Fig. II.19). Néanmoins l'influence de l'humidité est moins importante sur les bétons à hautes résistances que pour les bétons avec des résistances normales.

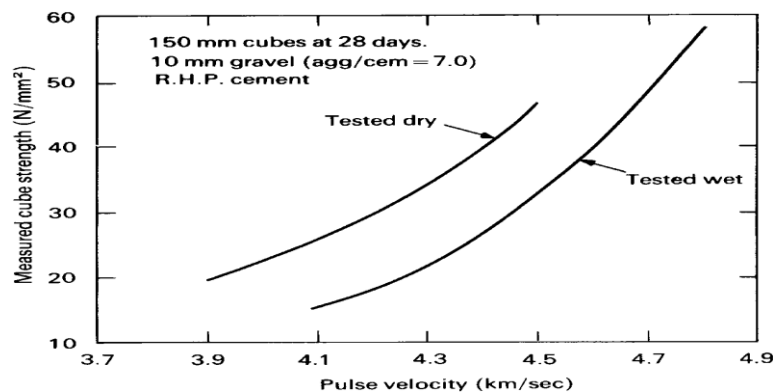


Fig. 2.19 : Effet des conditions humides sur la relation entre la vitesse d'impulsion et la résistance à la compression [11].

- **Niveau de contrainte :** Quand le béton est sujet à de très grandes contraintes avec des cycles répétés, des fissures se développent ce qui va réduire la valeur de la vitesse de propagation.
- **Présence de barres de renfort :** La vitesse de propagation de l'acier est 1.4 à 1.7 fois celle du plein béton. Alors il est préférable quand il est possible, d'éviter de tester à l'endroit de présence des barres de renfort.

2.2.3.1. Modèles de corrélation entre la résistance et la vitesse ultrasonique

Il est possible d'obtenir une assez bonne corrélation entre la résistance d'une éprouvette cubique à la compression et la vitesse de diffusion d'une impulsion. Plusieurs expressions de corrélation ont donné par différents chercheurs présentés dans le tableau (2.4) :

Tableau 2.4 : Expression des autres auteurs pour la corrélation de f_c et V .

Auteur	Fonctions de régression	Plage de résistance	Spécimens	Granulats
Ravindrajah et al (1988)	$R=0.060\exp(1.44V)$	15.0 à 75.0	Cube 100mm	Granite Dmax=20mm
Almeida (1993)	$R=0.0133V^{5543}$ $R=0.011V^{5654}$	40.1 à 120.3	Cube 150mm	Granite Dmax=25mm
Gonçalves (1995)	$R=0.02V-65.4$	18.0 à 42.0	Carotte 70mmx70mm	/
Pascale et al (2000)	$R=10^{-28}V^{8.1272}$	30.0 à 150.0	Cube 150mm	Calcaire Dmax=15mm
Qasrawi (2000)	$R=36.72V-129.077$	6.0 à 42.0	Cube 150mm	Variable
Soshiroda et Voraput (1999)	$R_{28}=44.52V_1-126.83$ $R_{28}=54.18V_{28}-206.27$	20.0 à 65.0	Cube 150mm	Gravier
Soshiroda et al (2005)	$R_{28}=1.941\exp(0.815V_1)$ $R_{28}=0.356\exp(1.110V_3)$ $R_{28}=0.131\exp(1.293V_7)$ $R_{28}=0.043\exp(1.498V_{28})$	12.45 à 96.2	Cube 150mm	Gravier
Phoon et al (1999)	$R=124.4V^2-857.0+E$	35.0,55.0 et 75.0	Cube 150mm	Granite Dmax=20mm
Hoobs et kebir (2006)	$R=2.289V^2-48.0224V+24.271$	20.0 à 49.0	Cube 150mm	Gravier Dmax=20mm
Elvery et ibrahim (1976)	$R=0.012\exp(2.27V)+6.4$	15.0 à 60.0	Cube 100mm	Gravier Dmax=19mm
Yun et al (1988)	$R=0.329V-1065$	5.0 à 30.0	Carotte 150mmx300mm	Gravier Dmax=25mm Dmax=40mm

Il y a trois configurations possibles dans lesquelles les transducteurs peuvent être arrangés :

- **Mesures en transparence (directe) :** Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester Figure (2.20) :

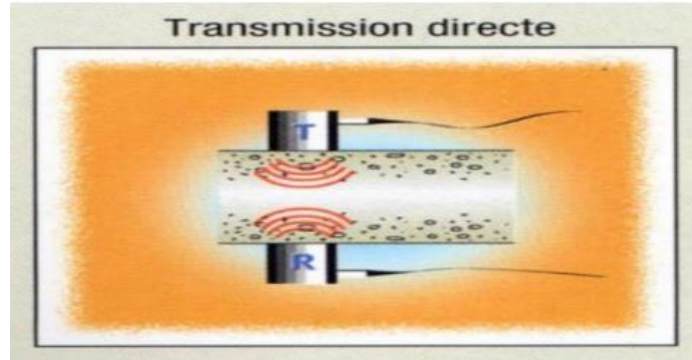


Fig. 2.20: Mesures en transparence (directe).

- **Mesures en surface (indirecte) :** Elles sont utilisées plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur. L'émetteur est maintenu en un point fixe, le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance.

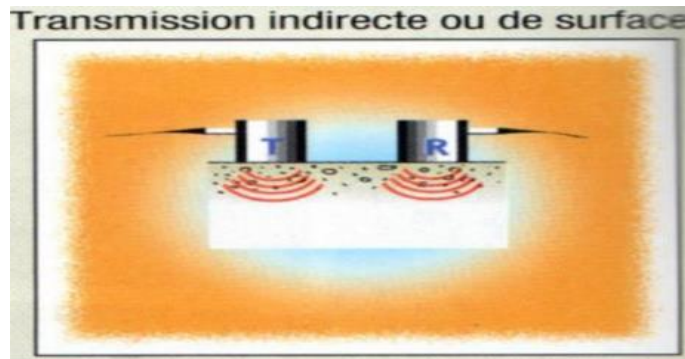


Fig. 2.21 : Mesures en surface.

- **Mesures semi directe :** Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les éléments de structure où on ne peut pas utiliser les deux autres manières (Fig. 2.22).

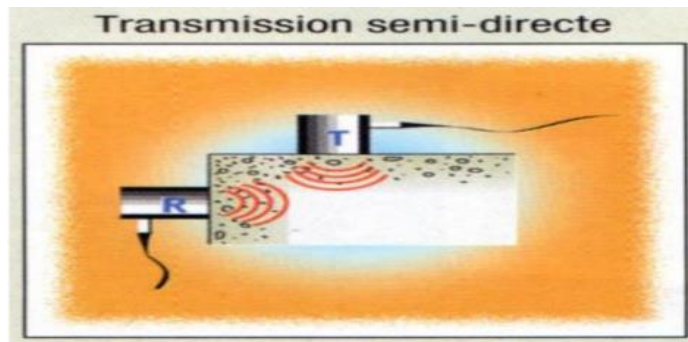


Fig. 2.22: Mesures semi directe.

La précision des résultats est fonction de la précision de l'étalonnage et de l'uniformité de la composition du béton de l'ouvrage et du béton des éprouvettes utilisées pour l'étalonnage.

Dans l'essai de propagation des ultrasons la propriété du béton que l'on mesure est effectuée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance effective du béton.

L'essai est adapté par plusieurs normes comme ASTM-C 597-2, « Standard test Methods for pulse Velocity through concrete [18] et la norme européenne EN 12504, « Testing concrete in structure part 4 « Détermination of ultrasonic pulse Velocity [29].

2.2.4. La résistance à la pénétration

La sonde de Windsor est généralement reconnue comme le meilleur moyen pour exécuter l'essai de résistance à la pénétration. L'équipement comprend un pistolet à poudre, des sondes en alliage durci, des cartouches chargées, une jauge de profondeur pour mesurer la pénétration des sondes et d'autres accessoires connexes (Fig. 2.23). Une sonde de 0.25 po (6.5 mm) de diamètre et de 3.125 po (8.0 cm) de longueur est enfoncée dans le béton au moyen d'une charge de poudre de précision. La profondeur de la pénétration fournit une indication de la résistance du béton à la compression. L'instrument doit être étalonné selon le type de béton et le type et la grosseur des granulats utilisés [12].

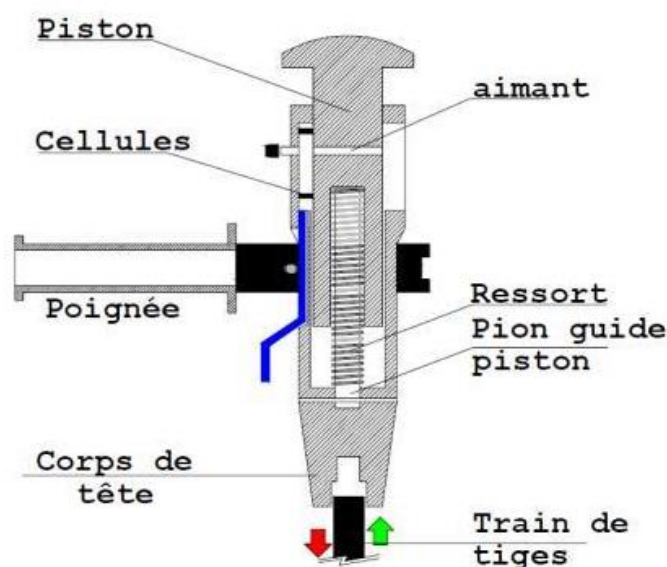


Fig.2.23: schéma general d'un penetrometer.

2.2.5. Impact-écho

Cette méthode permet d'évaluer facilement l'épaisseur de plaques en béton (Fig.2.24). Elle peut être une alternative à la gammagraphie pour la recherche des vides dans les

conduits. Cette méthode pourrait être utilisée en préalable à la gammagraphie pour en limiter l'utilisation à la quantification des défauts, évaluation possible du module d'Young dynamique sous réserve de la connaissance de l'épaisseur et de la densité du béton, obtenue par des mesures de calibration [19].

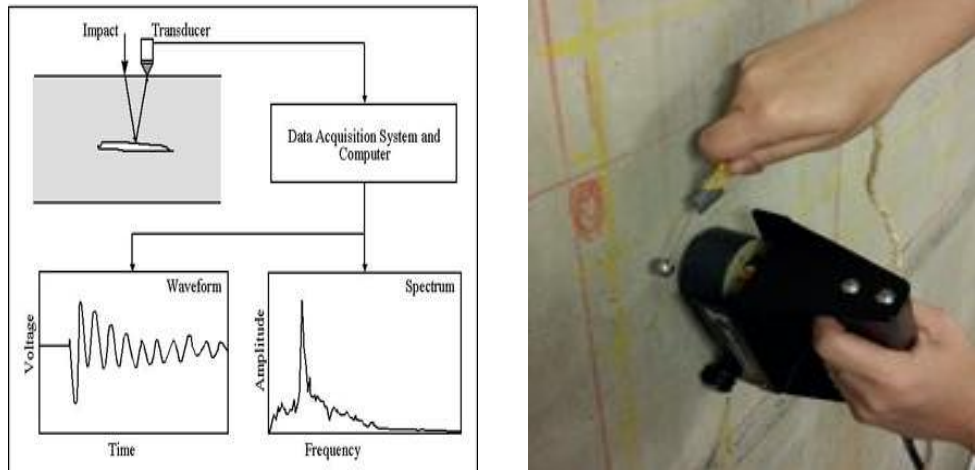


Fig. 2.24 : Représentation schématique du principe de la mesure par impact-écho.

2.2.6. Méthode du radar

Le matériel est composé d'un système électronique portable pouvant inclure un écran de visualisation, d'une antenne haute fréquence blindée (Fréquence centrale > 800 MHz) reliée au système d'acquisition radar par l'intermédiaire d'un câble, et d'un codeur en distance (Fig.2.25). Le principe de la méthode est l'émission d'impulsions électromagnétiques qui se réfléchissent partiellement sur des interfaces ou des hétérogénéités présentant des contrastes électromagnétiques. Les échos sont enregistrés sous forme de traces temporelles.



Fig. 2.25 : Méthode du radar

2.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons axé la revue bibliographique sur deux essais non destructifs à savoir le scléromètre et l'ultrason qui sont les deux essais principaux utilisés en Algérie pour l'évaluation de la résistance à la compression du béton sur site. La revue a montré que les essais sont rapides et moins coûteux mais les résultats sont affectés par plusieurs facteurs et une corrélation basée sur les matériaux locaux dans les conditions locales est indispensable pour une meilleure précision de l'estimation.

Chapitre 3 :

Matériaux et Essais

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présentera les différents matériaux (gravier, sable et ciment) utilisés dans cette étude, et leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Et on décrira les calculs de formulations des bétons étudiés, ensuite on va décrire aussi les différents essais destructifs et non destructifs avec leurs procédures et normes.

3.2. Caractérisation des matériaux utilisés

3.2.1. Ciment

On a utilisé un ciment composé type CEM II A 42.5 de la cimenterie de Meftah (Fig. 3.1). Les caractéristiques du ciment sont données dans le tableau (3.1).



Fig 3.1 : Ciment de Meftah

Tableau 3.1 : Caractéristique de différents ciments.

Provenance	Type de ciment	Classe de résistance	Densité absolue (g/cm ³)
Cimenterie de Meftah	CEM II A	42.5	3.03

3.2.2. Sable

Pour un bon module de finesse du sable utilisé, on a combiné deux types de sable : roulé fin (40%) et concassé grossier (60%) (Fig.3.2) dont les propriétés physiques d'identification sont présentées sur le tableau (3.2).



Fig. 3.2: Sable fin (de Laghouat) et grossier (Bouzegza).

Tableau 3.2 : Propriétés physiques d’identification de différents sables utilisés

Type de sable	Provenance	Classe de granulat	Densité absolue NF EN 1097-6 [23]
Fin	Laghouat	/	2.62
	Hassi Bahbah	/	2.59
Grossier	Bouzegza	0.4	2.69
	Bouira	0.4	2.61

3.2.3. Gravier

Le gravier utilisé est un gravier concassé à deux classes (8/15,15/25) provenant de la carrière Bouzegza de la région de Boumerdes et la carrière de Hamlaoui Sour-Ghozlane (Bouira) (Fig. 3.3) dont des propriétés physiques [23] d’identification sont présentés dans le tableau (3.3).



Fig 3.3 : Gravier 8/15 et 15/25 de Bouzegza.

Tableau 3.3 : Propriétés physiques d'identification des différents sables utilisés

Type de gravier	Classe granulaire	Provenance	Densité absolue (g/cm ³) NF EN 1097- 6[23]
Gravier 1	8/15	Bouzegza	2.69
		Bouira	2.68
Gravier 2	15/25	Bouzegza	2.69
		Bouira	2.7

3.2.4. Eau de gâchage

L'eau de gâchage est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite l'application du béton. Une eau potable conforme à la norme norme FN EN 1008 [25] a été utilisé pour la confection du béton.

3.2.5. Les adjuvants

Pour assurer une ouvrabilité satisfaisant avec réduction d'eau de gâchage, on a employé un adjuvant superplastifiant de type « ATA-FLOW 120 » avec un dosage inférieur ou égal à 0.5 % à 1.5% en masse du poids de ciment du béton.



Fig 3.4: Adjuvant ATA FLOW 120.

3.3. Présentation des chantiers étudiés

Les essais ont été réalisés dans trois projets situés dans la région centre de l'Algérie avec des matériaux différents et différents modes de production du béton et différentes entreprises de réalisation et bureaux d'études de suivi.

3.3.1. Projet N°1

C'est un projet de construction, conçu pour un lycée 1000 place au niveau du site des 7000 logement en location-vente à Douira wilaya d'Alger.

Le béton est des produits au niveau du chantier au moyen d'une bétonnière avec des matériaux provenant des région Blida et Boumerdes. La mise en place du béton est effectuée par grue. Le coffrage utilisé pour les éléments de structure en réalisé avec des planches en bois.

3.3.2. Projet N°2

C'est un projet de construction, conçu pour pôle universitaire à réalisation de 1500/3500 places pédagogique, implanté à El-Affroun wilaya de Blida, confiné a une entreprise ETB TCE Belaidi Mohamed. Le projet de Lot N°3 d'institut 500 places pédagogique (salle de travaux pratique).

Le béton est des produits au niveau du chantier au moyen d'une centrale à béton avec des matériaux provenant des région Blida et Boumerdes. Le béton est transporté par camion de malaxeur et sa mise en place est effectuée par grue et également par pompage.

3.3.3. Projet N°3

C'est un projet de construction, conçu pour une 250 logement promotionnels public ENPI à Sidi-Benour à Mehelma wilaya d'Alger réalisé par l'entreprise GCIBX. Le béton est produit au niveau du chantier au moyen d'une centrale à béton avec des matériaux provenant des région Blida et Hassi-Bahbah et Bouira. Il est transporté par camion de malaxeur.

Le ciment Meftah (CEM II /A 42.5) a été utilisé dans les trois projets.

Pour les projets 1 et 2 le sable utilisé provient de Laghouat et Bouzegza dont le module de finesse est 0.9 et 3.05. Le gravier est un gravier concassé (8/15 et 15/25) provenant la carrière de Bouzegza ou de Boumerdes. Un adjuvant superplastifiant de type ATA FLOW 120 utiliser avec un dosage de 1 à 1.5% du poids du ciment. Quant au projet N°3, le sable provient de Hassi Bahbah et celui de Sour-Ghozlane. Le gravier utilisé est un gravier concassé (8/15 et 15/25) provenant de Sour Ghozlane.

3.3.4.1. Formulation des bétons

La formulation du béton a été basé sur la méthode de Dreux-Gorisse [27]. La méthode permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaire à la fonction d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges.

Le tableau 3.4 présente les formulations utilisées dans les trois projets.

Tableau 3.4 : Formulation des différents bétons étudiés

Dosages pondéraux des constituants (kg/m ³)		Désignation des différents bétons		
		B1	B2	B3
		E/C=0.45	E/C=0.45	E/C=0.44
Ciment		350	350	410
Sable	Fin	209	209	/
	Grossier	634	634	/
Gravier	8/15	659	659	/
	15/25	426	426	/
Eau de gâchage		158	158	180
Super plastifiant		2.8	2.8	/

3.3.4.2. Préparation des mélanges

Après avoir laver et ensuite séché les granulats utilisés, tous les mélanges ont été gâchés dans un malaxeur de béton à axe verticale à cuve fixe d'une capacité de 100 litres (Fig.3.5). Les constituants ont été introduits dans l'ordre suivant : gravier, ciment et sable. Après un malaxage à sec de l'ordre d'une minute, l'eau de gâchage est ajoutée et le malaxage se poursuit pendant au moins deux minutes pour obtenir un mélange homogène.

Pour les cas des bétons adjuvants, la quantité d'eau est introduire en deux proportions, après le malaxage à sec des matériaux, on introduit la première quantité d'eau (70%) et on malaxe pendant une minute. Après, on ajoute la deuxième quantité (30%) mélangez avec la quantité de superplastifiant à introduire, le malaxage se poursuit après pendant deux minutes.



Fig 3.5 : Malaxage du béton.

3.3.4.3. Essai réalisées sur béton frais

Après chaque malaxage, en mesuré l’ouvrabilité selon la norme NF EN 12350-2 [40] par méthode cône d’Abrams (Fig.3.6 et tableau (3.5)).

Tableau 3.5 : affaissement au cône d’Abrams.

Type de ciment	Ciment Meftah	
Rapport E/C	E/C= 0.45	E/C= 0.44
Affaissement de béton (cm)	21	21



Fig 3.6: Essai d’affaissement au cône d’Abrams.

3.3.4.4. Environnement de conservation

Le prélèvement du béton a été effectué sur chantier. Le béton a été confectionné dans des moule cylindrique (16x32 cm) d’arête conformément à la norme NF EN 12390-2 [28].

Le serrage des éprouvettes a été réalisé par piquage. Ensuite par une légère vibration manuelle (Fig.3.7).



Fig 3.7: Fabrication des éprouvettes.

Après 24 heures de la confection, les éprouvettes en question ont été démoulées et conservées selon un seul mode : dans l'eau en laboratoire a la température à 20°C (Fig. 3.8). Les spécimens conservés dans l'eau ont été séchés à l'atmosphère de laboratoire pendant 24 heures avant l'âge d'essai (Fig.3.9).



Fig 3.8 : Conservation des éprouvettes dans l'eau.

3.3.4.5. Répartition du nombre d'éprouvettes

Le nombre total d'éprouvette confectionnées sont 54 éprouvettes, organisés selon l'âge (7 et 28 jours) et selon l'environnement de conservation. Le tableau (3.6) ci-dessous représente cette répartition.

Tableau 3.6 : Répartition du nombre d'éprouvettes confectionnées

Mode de conservation	Age (Jour)	Nombre des éprouvettes	
		Ciment de Meftah	
		E/C=0.45	E/C=0.44
Eau en labo	7	18	9
	28	18	9

3.3.4.6. Essais sur béton durci

Les essais non destructifs ont été effectués à l'aide d'un scléromètre et d'un ultrason dans les modèles sont suivants :

- Le scléromètre est un type N/L et de modèle N-34 (Fig.3. 9) ;



Fig 3.9: Appareil du scléromètre utilisé.

- L'ultrason est typé Pundit Lab avec des transducteurs 40 mm et diamètre et de 500 kHz de fréquence (Fig.3.10) ;



Fig. 3.10 : Appareil de l'ultrason utilisé.

- Les essais destructifs par écrasement des éprouvettes ont été réalisés à l'aide d'une presse hydraulique de classe A C44L2 et de charge maximale 2000 kN (Fig. 3.11).



Fig. 3.11: Presse hydraulique (2000 kN).

3.3.5. Préparation des éprouvettes

Les essais destructifs et non destructifs ont été effectués sur les éprouvettes à l'âge de 7 et 28 jours. Au début de chaque essai, les éprouvettes ont été pesées à l'aide d'une balance (Fig. 3.12).



Fig. 3.12 : Pesage des éprouvettes.

Ensuite on a un ponçage des deux faces de chaque éprouvette à l'aide d'une pierre (Fig.3.13) afin de les préparer aux essais non destructifs.



Fig 3.13 : Ponçage des éprouvettes à l'aide de la pierre abrasive.

3.3.6. Essais ultrasoniques

Avant de procéder aux essais à l'ultrason, on a pris le soin de vérifier le bon fonctionnement par étalonnage de l'appareil en utilisant le barreau de calibrage (Fig.3.14). Pour chaque éprouvette, les essais à l'ultrason ont été effectués en deux sens selon la méthode par transmission direct de telle façon que le sens de mesure du temps de transit soit perpendiculaire au sens de confection. Sur les faces opposées de l'éprouvette on a placé les deux transducteurs en interposant entre eux une couche mince de vaseline (gel) (Fig. 3.15), puis l'enregistrement du temps de transit en micro second est réalisé (Fig. 3.16).



Fig 3.14 : Etalonnage de l'ultrason à l'aide du barreau de calibrage.



Fig 3.15: Le graissage des faces d'éprouvette avec la vaseline.



Fig 3.16 : Mesure du temps de parcours des ondes ultrasonores.

Le résultat d'essai à ultrason correspondant à chaque éprouvette est la valeur de la mesure effectuée, et par conséquent la vitesse des ultrasons calculée est exprimée à 0.01 km/s près selon la norme NF EN 12504-4 [29].

3.3.7. Essais sclérométriques

Quant aux essais au scléromètre on a d'abord essuyé toutes les traces de la vaseline appliqué auparavant, puis la mise en place de l'éprouvette entre les plateaux de la presse de façon que le sens de compression soit parallèle au sens de confection. Après avoir régler la vitesse de chargement, on a maintenu l'éprouvette entre les plateaux par compression sous une charge de 20 kN.

Les essais au scléromètre ont été effectués à la position horizontale de l'appareil sur les trois faces l'éprouvette maintenue (Fig. 3.17), qui sont au nombre de neuf par face. Alors, le résultat d'essai correspondant à chaque éprouvette est la valeur médiane de l'ensemble des lectures effectuées sue les trois faces et exprimé sous forme de nombre entier conformément à la norme européenne NF EN 12504-2 [30].



Fig 3.17 : Essai de scléromètre (mesure l'indice de rebondissement).

3.3.8. Ecrasement des éprouvettes

Finalement les essais destructifs ont été effectuées par écrasement d'éprouvette sous une charge appliquée jusqu'à la rupture, alors le résultat d'essai correspond à chaque éprouvette est la valeur de la charge finale de rupture selon la norme européenne NF EN 12390-3 [31]

.



Fig 3.18: Essais d'écrasement des éprouvettes.

3.4. Résumé des variables étudiées

Dans cette partie expérimentale, les essais destructif et non destructif ont été effectués sur des éprouvettes confectionnées par différents types de bétons, fabriqués sur chantier ou à la centrale à béton et conservées dans l'eau au laboratoire. Le béton testé est basé sur une variation de quatre paramètres (type de ciment, rapport E/C, Dmax de granulats et l'âge). L'organigramme (Fig.3.19) présente les variables de l'étude expérimentale réalisée au laboratoire.

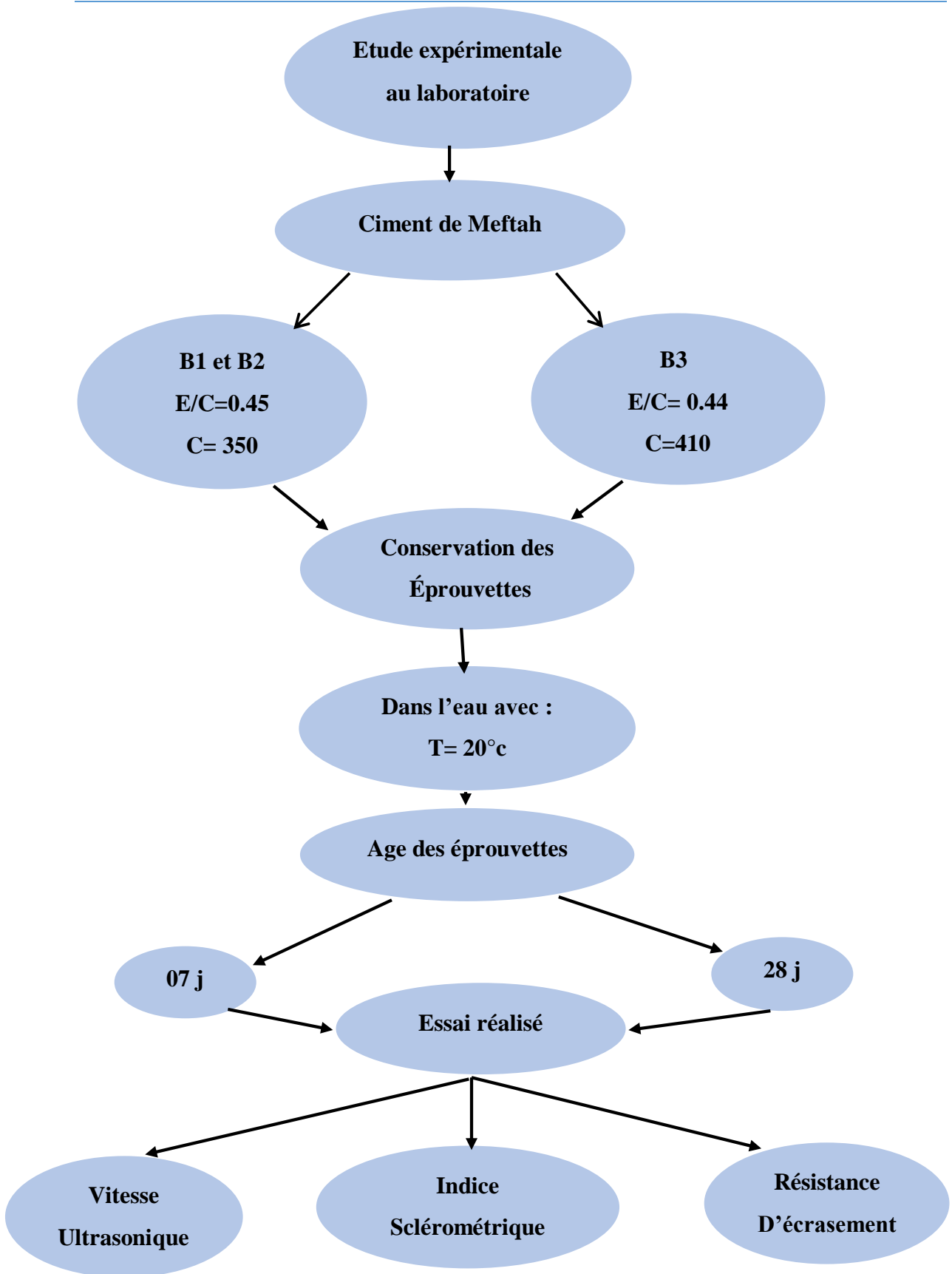


Fig.3.19 : Organigramme de l'étude expérimentale en laboratoire.

Chapitre 4

Analyse des résultats et discussion

4.1. Introduction

Les résultats obtenus par les essais de compression et les essais non destructifs (ultrasons, scléromètre) sont présentés dans ce chapitre. Des corrélations entre les essais destructif (résistance à la compression par l'écrasement) et les essais non destructifs (ultrasons, scléromètre) sur des éprouvettes qui sont confectionnées en laboratoire et conservés selon un seul mode : à l'eau du laboratoire sont présentées.

4.2. Présentation des résultats

Les résultats obtenus, à partir des essais destructifs et non destructifs à différents âges, sur les différents projets avec conservation dans l'eau, sont présenté dans s tableaux 4.1 et 4.2.

Tableau 4.1 : résultats des essais destructifs et non destructif sur des éprouvettes conservés dans l'eau des différents bétons B1 et B2.

Mélange	Conservation		à l'air			
	Age (Jours)	Epr	Densité (Kg/l)	Vu (Km/s)	Ind R	Résist (MPa)
B1	7	1	2,4	5,11	38,4	32.80
		2	2,43	5,15	37,8	32
		3	2,4	5,16	38,1	35.20
		4	2,53	5,03	39,2	30
		5	2,37	5,07	36,12	28.40
		6	2,4	5,11	39,8	29.90
		7	2,4	5,12	39,1	27.40
		8	2,38	5,09	35,4	26.60
		9	2,37	5,12	39,7	27
	28	1	2,41	5,07	39,4	36.20
		2	2,4	5,15	38,2	38.80
		3	2,42	4,98	36,9	38
		4	2,41	5,02	38,7	34.40
		5	2,4	5,14	37,5	38
		6	2,42	5,3	39,12	35.10
		7	2,38	5,02	39,2	32.90
		8	2,39	5,01	38,1	32.60
		9	2,41	5,12	38,5	32.50
B2	7	1	2,41	5,32	39,7	29.90
		2	2,10	5,31	38,9	34.30
		3	2,41	5,10	38,7	32.70
		4	2,38	5,06	38,17	28.70
		5	2,39	5,03	37,9	30
		6	2,40	4,98	39,4	30.20
		7	2,42	5,23	38,4	29.10
		8	2,40	5,12	37,6	29.60
		9	2,41	5,01	39,1	30.20
	28	1	2,40	5,20	38,7	41.50
		2	2,43	5,12	40,6	40.10
		3	2,40	5,03	39,4	36.30
		4	2,41	5,40	40,3	38.20
		5	2,42	4,98	38,7	38.60
		6	2,39	5,14	39,2	38.10
		7	2,40	5,23	37,8	35.50
		8	2,42	5,10	40,3	37.70
		9	2,39	5,03	39,8	40

Tableau 4.2 : Résultats des essais destructifs et non destructif sur des éprouvettes conservés dans l'eau des différents bétons B3.

Conservation			à l'eau			
Mélange	Age (Jours)	Epr	Densité (kg/l)	Vu (km/s)	Ind R	Résist (MPa)
B3	7	1	2.43	4.78	39.80	33.50
		2	2.41	4.97	38.40	34.80
		3	2.38	5	39.10	35.50
		4	2.40	4.88	37.90	27.70
		5	2.43	5.01	38.30	30
		6	2.41	5.02	39.18	26.20
		7	2.39	4.90	37.60	26.60
		8	2.40	4.96	38.40	29.60
		9	2.42	5.02	39.80	28
	28	1	2.41	5.01	40.70	38
		2	2.42	5.02	40.10	38.20
		3	2.40	5.01	39.40	34.60
		4	2.39	4.98	40.20	35.30
		5	2.41	5.12	39.70	34.90
		6	2.41	5.12	38.50	32.50
		7	2.40	5.02	39.60	38
		8	2.42	5.21	40.40	38.20
		9	2.40	5.01	39.60	34.60

4.3. Analyse des résultats d'essai au scléromètre

4.3.1. Corrélation entre la résistance et l'indice de rebondissement

La figure 4.1, tracé sur la base des résultats individuels des éprouvettes, présente une courbe de corrélation établie entre les résistances à la compression par écrasement « R » et les indices de rebondissement « I » correspondants (courbe base I). Cette corrélation est développée sur l'ensemble des différents bétons conservés dans l'eau et testés à différents âges.

L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme linéaire présentée par l'équation (4.1) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.396$

$$\mathbf{R} = 0.771 \mathbf{I} + 3.2379 \dots\dots\dots (4.1)$$

Avec : **R** en MPa

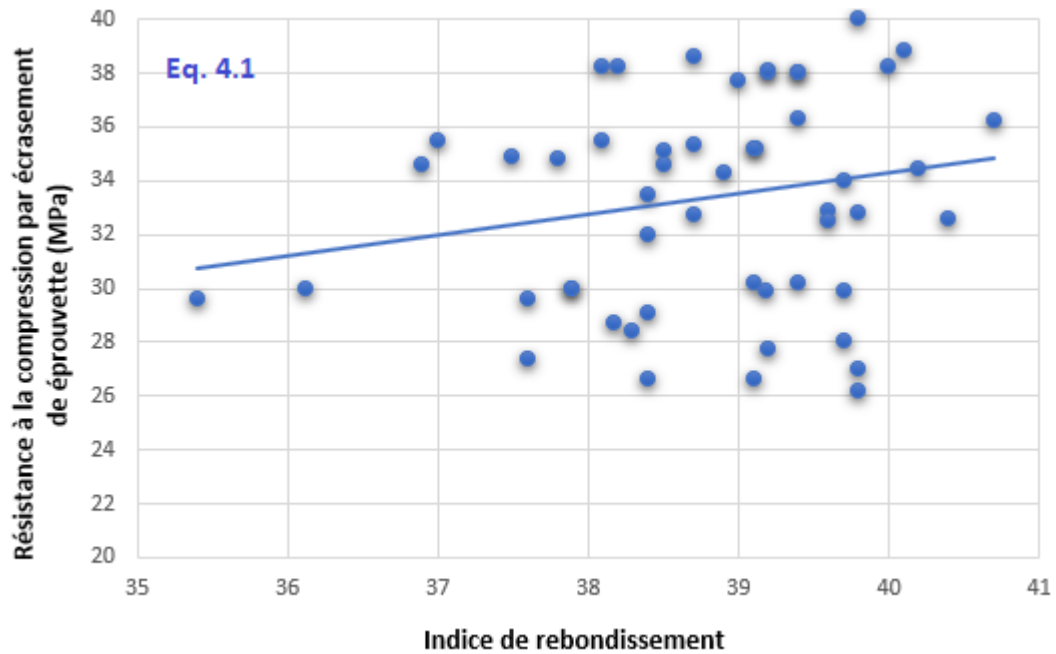


Fig. 4.1 : Corrélation Résistance- Indice de rebondissement proposée pour l’ensemble des différents bétons.

La figure 4.1 montre qu’il existe une faible corrélation ($R^2= 0.396$) par rapport au résultat de Khodja [2] ($R^2= 0.966$) entre la résistance à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants à l’ensemble des bétons.

4.3.2. Analyse des résultats d’essais au scléromètre dans chaque projet

4.3.2.1. Corrélation entre la résistance et l’indice de rebondissement du projet 1(B1)

La figure 4.2, présente une courbe de corrélation établie entre les résistances à la compression par écrasement « **R** » et les indices de rebondissement « **I** » pour le projet B1.

L’expression proposé à cette corrélation est une relation de forme exponentielle présenté par l’équation (4.2) avec un coefficient de corrélation $R^2= 0.2985$

$$\mathbf{R} = 2.0524 \exp (0.0702 \mathbf{I}) \dots\dots\dots (4.2)$$

Avec : **R** en MPa

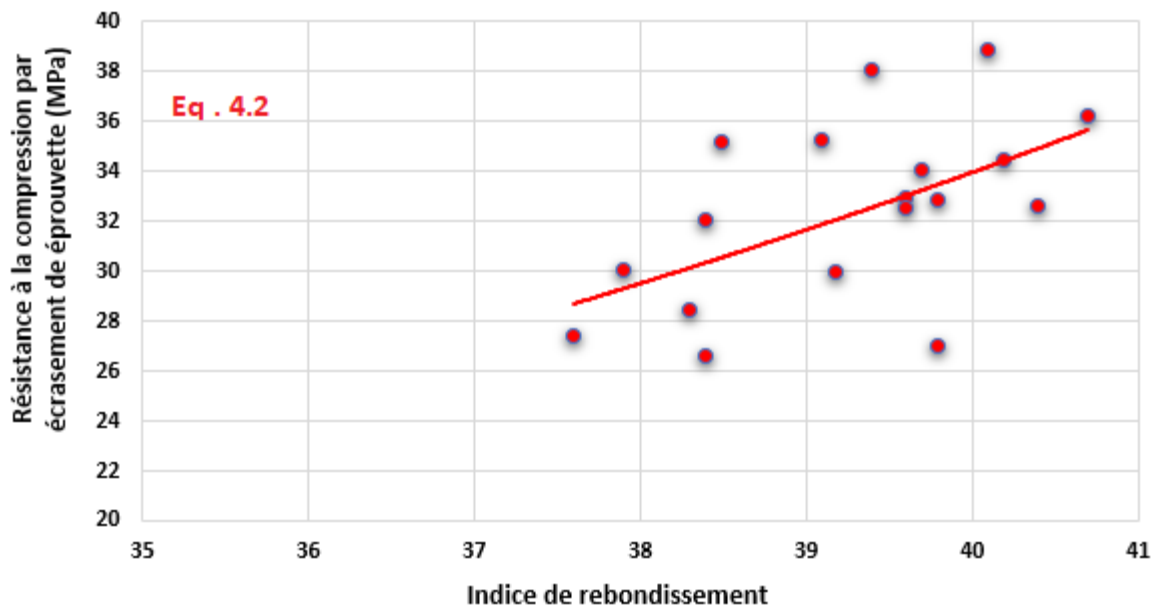


Fig. 4.2 : Corrélation Résistance-Indice de rebondissement proposée pour l'ensemble de résultats de B1

D'après la figure 4.2 on peut dire qu'il existe un coefficient de corrélation ($R^2= 0.2985$) est acceptable entre la résistance à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants.

4.3.2.2. Corrélation entre la résistance et l'indice de rebondissement du projet 2(B2)

A partir de cette figure 4.3, une corrélation entre les résistances à la compression par écrasement « R » et les indices de rebondissement « I » correspondants a été proposé.

L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme puissance présentée par l'équation (4.3) avec un coefficient de corrélation $R^2= 0.159$. Ceci montre que la corrélation est relativement faible.

$$R = 0.0062 I^{2.3549} \dots\dots\dots (4.3)$$

Avec : **R** en MPa



Fig. 4.3 : Corrélation Résistance-Indice de rebondissement proposé pour l'ensemble de résultats de B2.

4.3.2.3. Corrélation entre la résistance et l'indice de rebondissement du projet 3(B3)

La figure 4.4, présente une courbe de corrélation établie entre les résistances à la compression par écrasement « R » et les indices de rebondissement « I » correspondants.

L'expression proposé à cette fiable corrélation est une relation de forme puissance présenté par l'équation (4.4) avec un coefficient de corrélation $R^2= 0.4237$

$$R = 5 I - 0.5 I^{3.6} \dots\dots\dots (4.4)$$

Avec : **R** en MPa

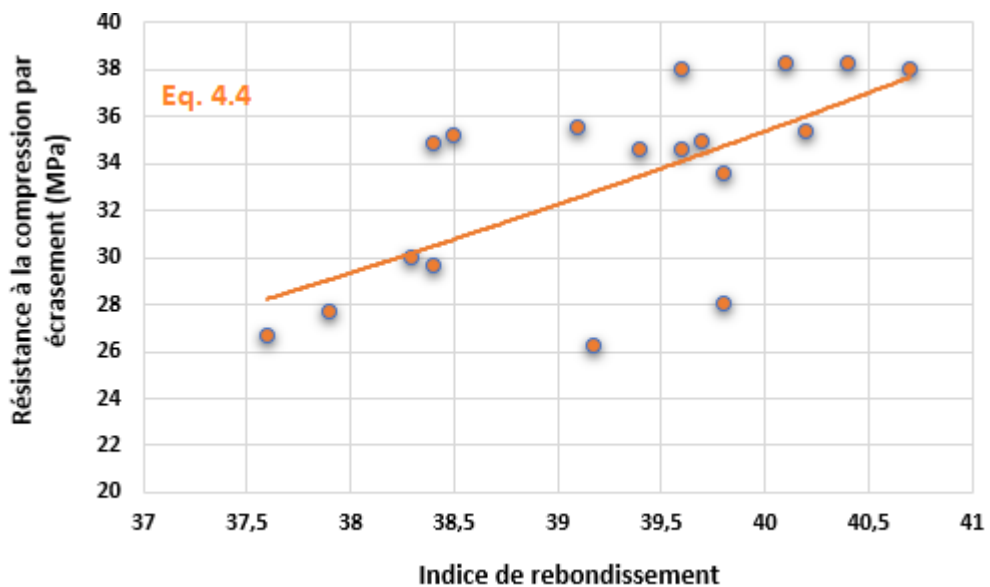


Fig. 4.4 : Corrélation Résistance-Indice de rebondissement proposé pour l'ensemble de résultats de B3.

4.3.3. Effet de l'âge du béton sur corrélation Résistance-Indice

Pour avoir l'effet de l'âge de vieillissement du béton sur corrélation Résistance-Indice, on a proposé pour chaque âge d'essai une équation de régression de forme puissance (tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Différentes corrélation Résistance - Indice proposé les différents âges du béton.

Age du béton	Equation de corrélation	Coefficient de corrélation
7 jours	$R= 0.1019 I^2 - 6.8201 I + 144.12$	0.4556
28 jours	$R=0.1121 I^2 - 7.7961 I + 163.23$	0.6125

La figure 4.5, présente une comparaison entre les différents modèles proposés entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique pour les différents âges du béton et la courbe base I.

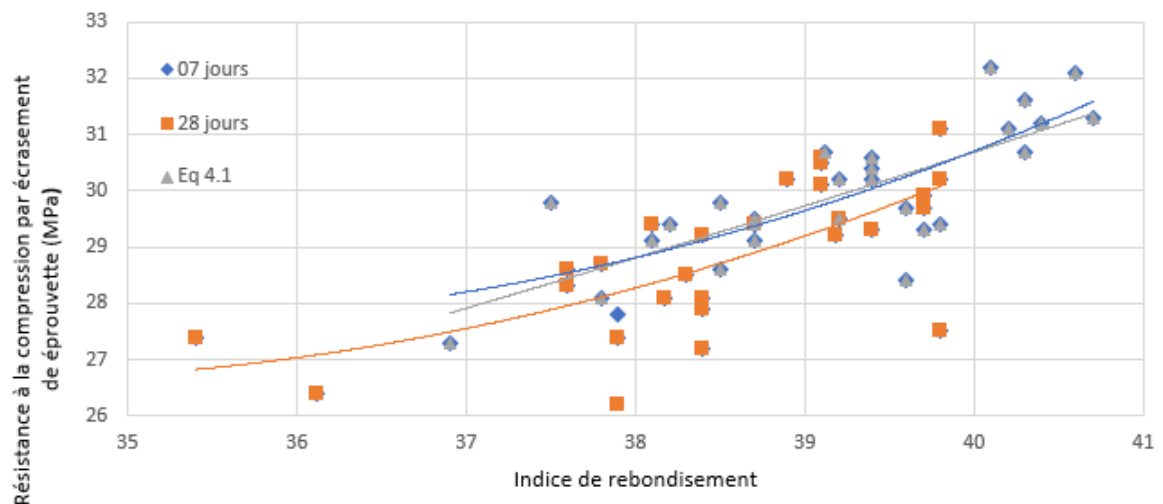


Fig. 4.5 : Corrélation Résistance – Indice de rebondissement fonction du l'âge.

D'après la figure 4.5 on peut conclure que l'indice de rebondissement augmente en fonction de l'âge du béton. On remarque aussi que la courbe base I (4.1) est confondue avec

celle proposée pour les bétons de 7 jours mais elle surestime la résistance du béton à 28 jours.

4.3.4. Etude de comparative aux autres modèles R=f(I)

De nombreuses corrélations entre la résistance à la compression par écrasement « R » et l'indice de rebondissement « I », ont été proposé par différents chercheurs sur des bétons fabriqués en laboratoire :

- Khodja [2] a proposé une relation de forme puissance pour le cas de conservation à l'eau de l'équation (4.10) avec un coefficient de corrélation R²= 0.960 et une erreur type s = 3.980.

$$R = 0.057 I^{1.8} \dots\dots\dots (4.10)$$

Avec : R en MPa

- Boukhelkhal [24] ont proposé une relation de forme puissance présenté par l'équation (4.11) avec un coefficient de corrélation R²= 0.959 et une erreur type s = 3.261 MPa.

$$R = 0.009 I^{2.221} \dots\dots\dots (4.11)$$

La figure 4.6 montre une comparaison entre les différents modèles de corrélation des équations (4.10) à (4.11) des bétons fabriqués au chantier et conservé à l'eau dans laboratoire et la courbe fournie par l'appareil d'équation (4.6).

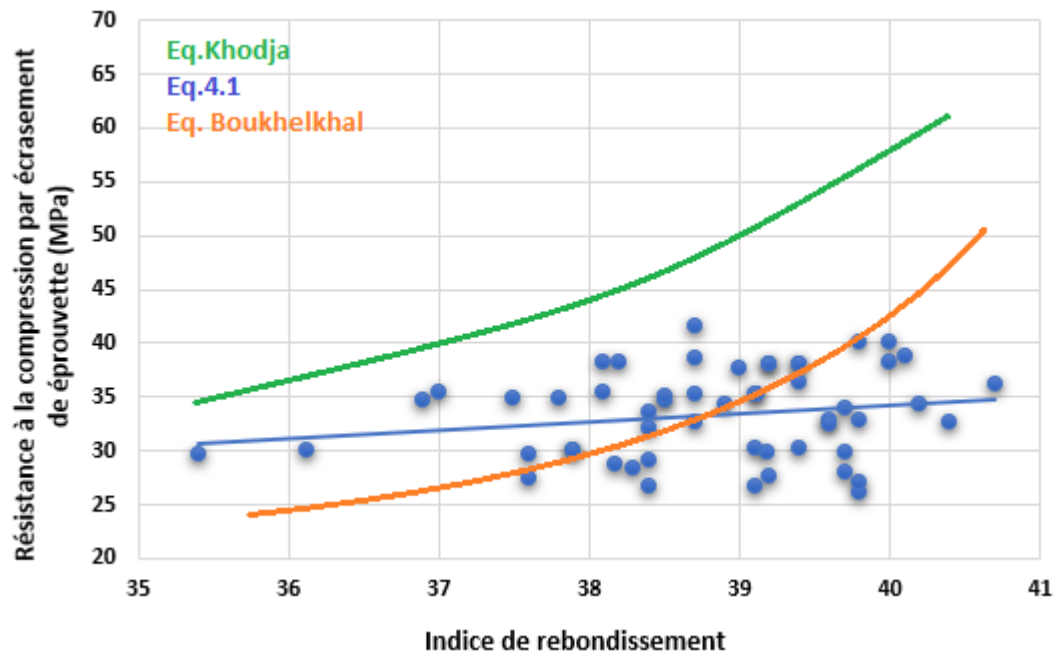


Fig. 4.6 : Comparaison entre différents modèles de corrélation établis par divers auteurs pour des bétons fabriqués en laboratoire et conservés dans l’eau.

D’après la figure 4.6 on note que la courbe proposée de l’équation (Eq. Khodja) est supérieure par rapport la courbe d’équation (Eq. Boukhelkhal). Cependant, les deux courbes sont un peu proches par rapport la courbe proposée de l’équation (4.1). Ceci peut être aussi s’expliquer par le mode de conservation des bétons à tester qui sont tous conservés à l’eau.

La courbe proposée par équation (Eq. Khodja) et (Eq. Boukhelkhal) présente un écart remarquable par rapport aux courbes des équations (4.1) malgré ayant le même mode de conservation (l’eau). Cette différence s’explique probablement par le non blocage des éprouvettes entre les plateaux de la presse lors des essais au scléromètre.

4.4. Analyse des résultats d’essai à l’ultrason

A partir de cette figure 4.7, une corrélation a été établie entre les résistances à la compression par écrasement « R » et les vitesses ultrasoniques « V » par une forme exponentielle présentée par l’équation (4.6) avec un coefficient de corrélation $R^2= 0.0918$

$$R = 5.7576 \exp (0.3461 V) \dots\dots\dots (4.6)$$

Avec : **R** en MPa & **V** en km/s.

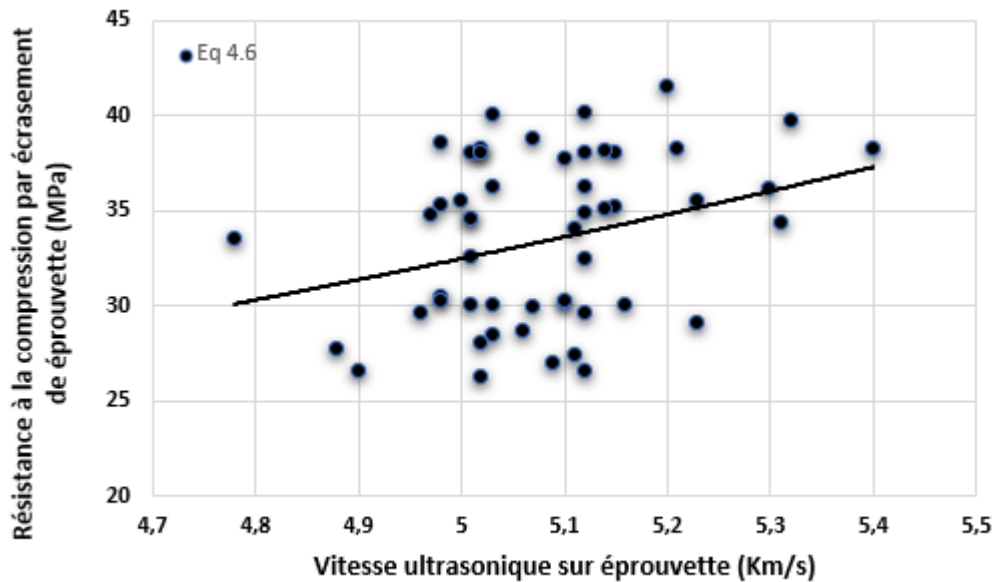


Fig. 4.7 : Corrélation Résistance – Vitesse ultrasonique proposée pour l’ensemble des différents bétons.

D’après la figure 4.7 on peut dire qu’il existe une corrélation faible ($R^2 = 0.0918$) par rapport au résultat de khodja [2] ($R^2=0.950$) entre la résistance à la compression par écrasement et les vitesses ultrasonique correspondants pour l’ensemble des différents bétons examinés à différents âges.

4.4.1. Analyse des résultats d’essais à l’ultrason dans chaque projet

4.4.1.1. Corrélation entre la résistance et vitesse ultrasonique du projet 1(B1)

Cette figure 4.8, tracée sur la base des résultats individuels des éprouvettes, présente une courbe de corrélation établie entre les résistances à la compression par écrasement « R » et les vitesses ultrasoniques « V ». L’expression proposée à cette corrélation est relation de forme exponentielle présentée par l’équation (4.7) avec un coefficient de corrélation $R^2=0.497$. La corrélation peut être considérée comme une faible corrélation.

$$R = 4.3712 \exp (0.3948 V) \dots\dots\dots (4.7)$$

Avec : **R** en MPa & **V** en km/s.

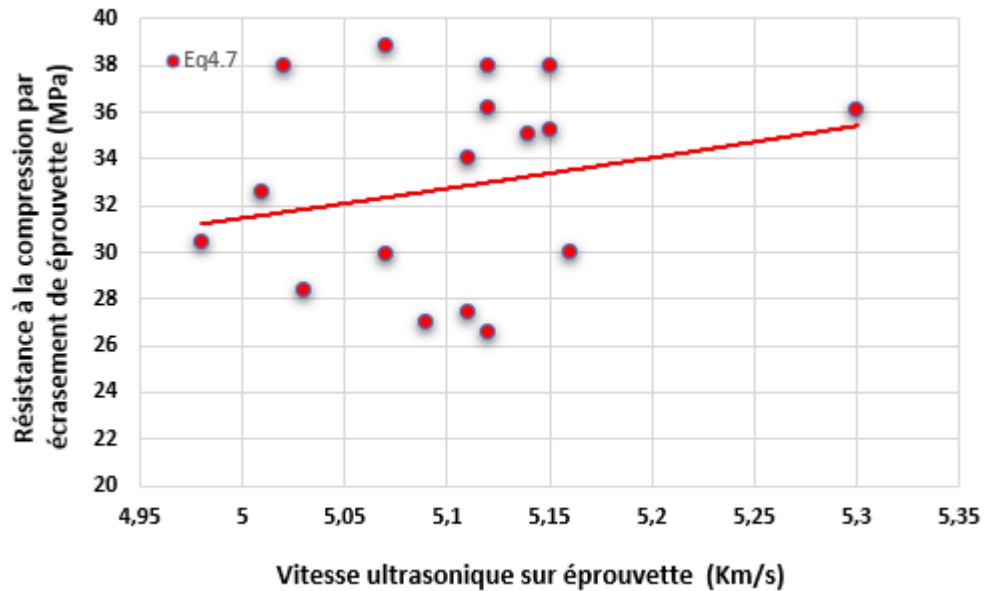


Fig. 4.8 : Corrélation Résistance- Vitesse ultrasonique proposé pour l’ensemble des résultats de B1.

4.4.1.2. Corrélation entre la résistance et vitesse ultrasonique du projet 2(B2)

La figure 4.9, tracée sur la base des résultats individuels des éprouvettes, présente une courbe de corrélation établie entre les résistances à la compression par écrasement « **R** » et les vitesses ultrasoniques « **V** ». Cette corrélation est développée sur l’ensemble des différents bétons testé à différents âges. L’expression proposée à cette corrélation est relation de forme exponentielle présentée par l’équation (4.8) avec un coefficient de corrélation acceptable $R^2= 0.606$. La corrélation est jugée acceptable.

$$R = 8.4498 \exp (0.2744 V) \dots\dots\dots (4.8)$$

Avec : **R** en MPa & **V** en Km/s.

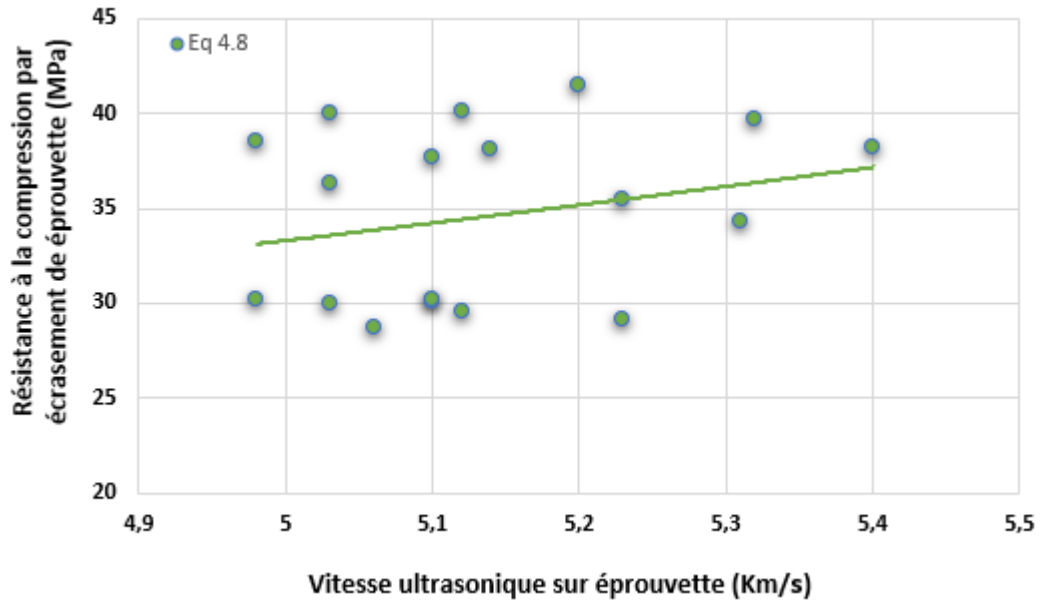


Fig. 4.9 : Corrélation Résistance-Vitesse ultrasonique proposé pour l'ensemble des résultats de B2.

4.4.1.3. Corrélation entre la résistance et vitesse d'ultrasonique du projet 3(B3)

La figure 4.10, tracée sur la base des résultats individuels des éprouvettes, présente une courbe de corrélation établie entre les résistances à la compression par écrasement « R » et les vitesses ultrasoniques « V ». Cette corrélation est développée sur l'ensemble des différents bétons testé à différents âges. L'expression proposée à cette corrélation est relation de forme exponentielle présentée par l'équation (4.9) avec un coefficient de corrélation faible $R^2=0.1446$

$$R = 2.6563 \exp (0.5029 V) \dots\dots\dots (4.9)$$

Avec : **R** en MPa & **V** en km/s.

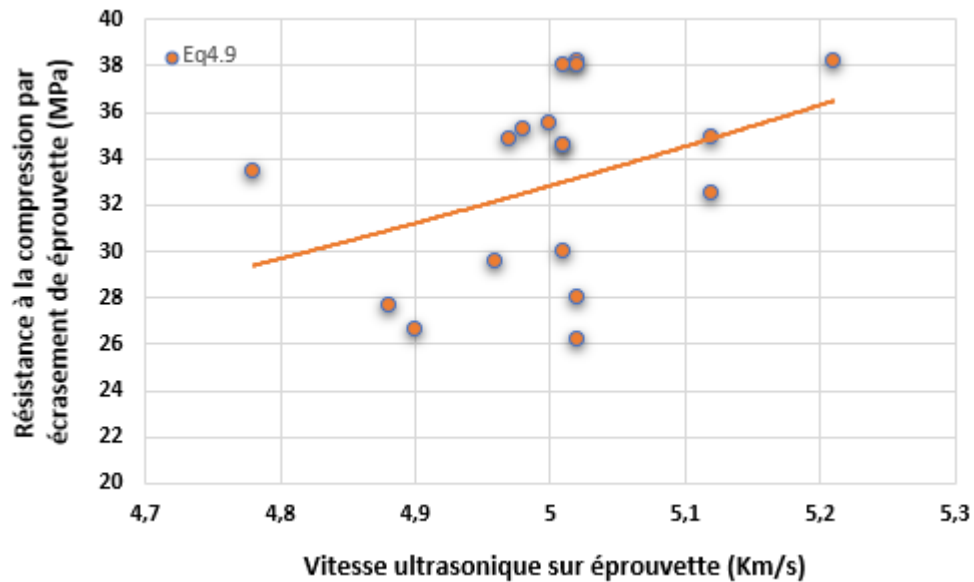


Fig. 4.10 : Courbe de corrélation de Résistance-Vitesse ultrasonique proposé pour l'ensemble des résultats de B3.

4.4.2. Effet de l'âge du béton sur corrélation Résistance-vitesse

Pour avoir l'effet de l'âge de vieillissement du béton sur corrélation Résistance-vitesse, on a proposé pour chaque âge d'essai une équation de régression de forme puissance (tableau 4.9).

Tableau 4.4 : Différentes corrélation Résistance - Indice proposé les différents âges du béton.

Age du béton	Equation de corrélation	Coefficient de corrélation	Erreur type
7 jours	$R = 0.1612 \exp(1.395 V)$	0.866	2.226
28 jours	$R = 0.944 \exp(0.738 v)$	0.855	2.845

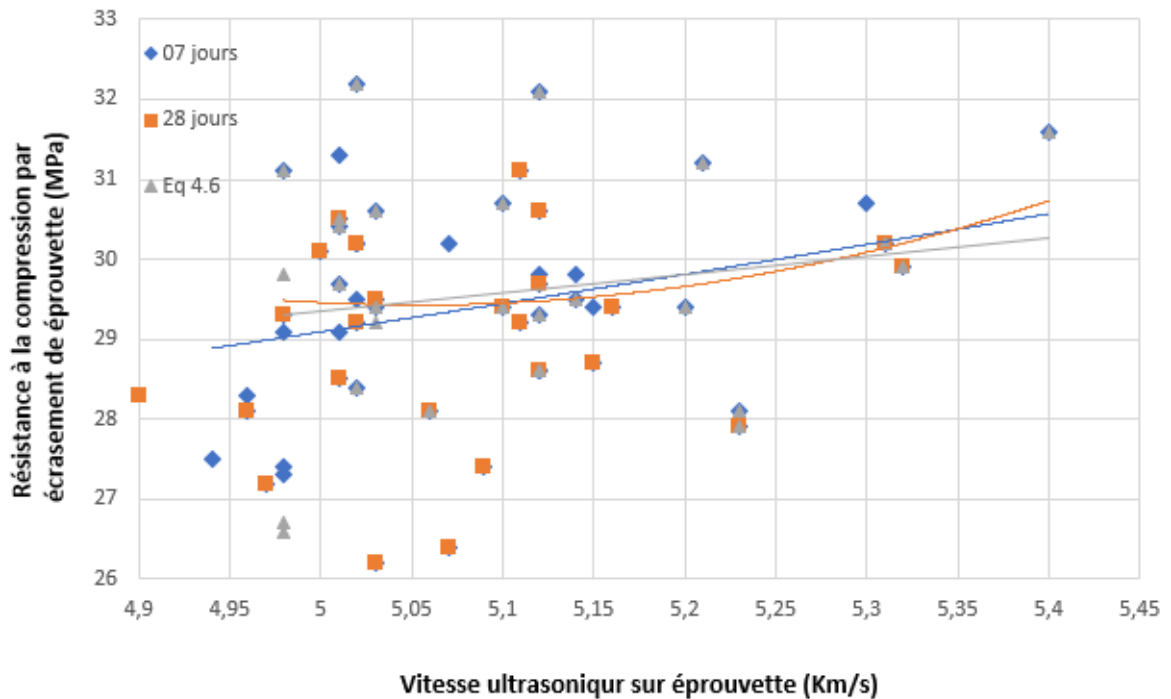


Fig. 4.11 : Courbe de corrélation résistance – vitesse ultrasonique fonction de l’âge du béton.

D’après la figure 4.11 on constate que la vitesse ultrasonique augmente en fonction de l’âge du béton, on remarque aussi que la courbe base V (4.6) est confondre avec celle proposé pour les bétons de 7j et 28 jours.

4.4.3. Etude comparative aux autres modelés $R = f(I)$

De nombreuses corrélations entre la résistance à la compression par écrasement « R » et la vitesse ultrasonique « I », ont été proposé par différents chercheurs sur des bétons fabriqués en laboratoire :

- Khodja [2] a proposé une relation de forme puissance pour le cas de conservation à l’eau de l’équation (4.12) avec un coefficient de corrélation $R^2= 0.950$ et une erreur type $s = 5.417$ MPa.

$$R = 0.008 \exp (1.839 V) \dots\dots\dots (4.12)$$

Avec : **R** en MPa & **V** en Km/s.

- Boukhelkhal [24] ont proposé une relation de forme puissance présenté par l'équation (4.13) avec un coefficient de corrélation $r = 0.910$ et une erreur type $s = 4.746$ MPa.

$$R = 0.250 \exp (1.053 V) \dots\dots\dots (4.13)$$

Avec : **R** en MPa & **V** en Km/s.

La figure 4.12 montre une comparaison entre les différents modèles de corrélation entre la résistance à la compression par écrasement et la vitesse ultrasonique des équation (Eq. Khodja) à (Eq. Boukhelkhal) des bétons fabriqués au laboratoire et conservé dans l'eau et la courbe fourni par l'appareil d'équation (4.6), en tentant compte de l'échelle des éprouvettes.

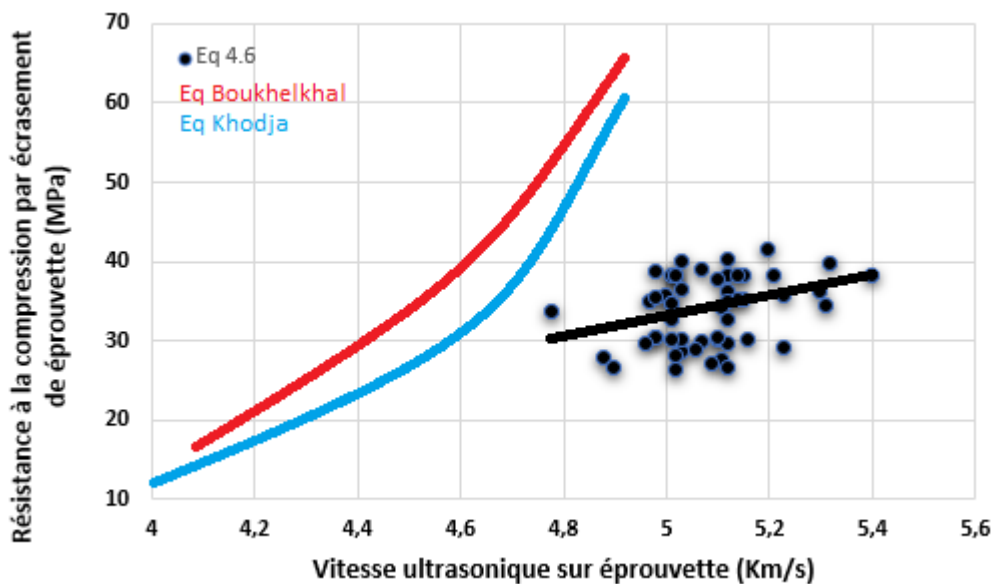


Fig. 4.12 : Comparaison entre différents modèles de corrélation Résistance – Vitesse ultrasonique établis par divers auteurs pour des bétons fabriqués en laboratoire et conservés dans l'eau.

D'après la figure (4.12) on note que les courbes (Eq. Khodja) et (Eq. Boukhelkhal) relation aux bétons conservés dans les conditions humides, donnent des résistances supérieures à celle d'équation (4.6), Donc la conservation du béton à l'eau donne une bonne résistance.

4.6. Conclusion

L'étude corrélative réalisée dans le cadre de notre projet de fin d'étude, nous a permis d'établir des corrélations entre les propriétés mécaniques et physiques avec les résultats des essais non destructifs.

Les courbes de corrélation données dans ce travail prouvent que l'évaluation fiable de la résistance en laboratoire peut seulement être obtenue si la corrélation entre la résistance à la compression et la mesure d'essai non destructif pour le même type de béton est correctement établie.

Références bibliographiques

- [1] Yagoubi. M, « Étude de caractérisation et corrélation aux moyens des essais non-destructifs (NDT) et essai direct d'un béton à haute performance (BHP) à base de matériaux locaux », mémoire de master, 2015, 161p.
- [2] Benyahia.S. K, Ghrici.M, “Corrélations entre essais non destructifs et essais destructifs du béton à faible résistance mécanique,” 2010, pp. 1–11.
- [3] M. D. E. L. Equipement and D. T. R, « Règles d'exécution des travaux de construction d'ouvrages En béton armé », 2010.
- [4] Derbala. A, « contribution aux possibilités d'amélioration de la qualité du béton », mémoire de magister,1999, 208p.
- [5] Amrani. A, Korti.N. F « Amélioration de la qualité du béton des BPE à jeune âge » mémoire de master, 2018, 113p.
- [6] Cim-béton, « G11 : Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, fiches techniques, tome 2 », Collect Tech,2013, pp. 1–135. Available : <http://www.infociments.fr>.
- [7] Ferhat. N, « Influence de la variation des caractéristiques mécaniques sur le comportement des éléments en béton armé » mémoire de master, 2012,81 p.
- [8] Bin Ibrahim. A. N, Bin Ismail.P, Ford.M, « Guidebook on non-destructive testing of concrete structures,» International Atomic Energy Agency, vienne, 2002, 242p.
- [9] Badji. A, Daouadi. I, « Corrélation entre les essais destructifs et les essais non destructifs par les matériaux locaux de la région de Ghardaïa », mémoire de master,2020.
- [10] Hannachi.S, « Evaluation de la résistance à la compression du béton sur site : Application de la méthode combinée » thèse de doctorat, 2015,221p.
- [11] Bungey. J .H, Millard. S. G, « Testing of concrete in structures », Chapman and Hall, 1996, 292p.
- [12] Feidman.R. F, “Essais non destructifs du béton,» CBD, 1977, p.5.
- [13] Qaswari.H. Y, « Concrete strength by combined non destructive Methods Simply and reliably predicted », Cement and Concrete Research, vol. 30, 2000, pp. 739–746.
- [14] ASTM C805-02, « Standard test method for rebound number of hardened concrete » ASTM International,2002, 3p.

- [15] Naik.T. R, Malhotra.V.M, and Popovics.J. S, « The ultrasonic plus Velocity method » Handbook on Non destructive Testing of Concrete, CRC Press LLC, 2004, 19p.
- [16] Trtnik.G, Kavčič.F, and Turk.G, « Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse Velocity and artificiel neural network »,” Ultrasonics, vol. 49, no. 1,2009, pp. 53–60.
- [17] Kaplan.M. F, « The affects of âge and water/cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse Velocity and compressive strength of concrete », Mag. Concr. Res., vol. 11,1959, pp. 85–92.
- [18] American Society for Testing and Material, ASTM C 597-02, « Standard test method for pulse velocity through concrete », ASTM International, vol. 04, 2003, pp. 3–6.
- [19] D. U. Matériau and E. N. Place, « Fiche technique B1-4 »,2018, pp. 1–4.
- [20] <https://www.groupe-pigeon.com/notre-groupe/notre-actualite/durabilite-du-beton>
- [21] NF EN 934-2 « Adjuvent pour béton, mortier et coulis. Partie 2 : Adjuvants pour béton-définitions, exigence, conformité, marquage et étiquetage », AFNOR, 2002, 26p.
- [22] ACI 116R-00 « Cement and concrete terminology », 2000, 73p.
- [23] NF EN 1097-6, “Essais pour d é terminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d’absorption d’eau,” AFNOR,2001.
- [24] Boukhelkhal.D, « Corrélation entre essais non destructifs et essais destructifs de la résistance à la compression du béton : Essais au laboratoire », mémoire de magistère ,2015.
- [25] NF. EN 1008, “Eau de gâchage pour bétons : Spécification d’échantillonnage, d’essais et d’évaluation de l’aptitude à l’emploi, y compris les eaux des processus de l’industrie du béton, telle que l’eau de gâchage pour béton ».”AFNOR,2003.
- [26] NF EN 12350-3 « Essai pour béton frais - Partie 3 : Essai vébé » AFNOR.
- [27] Dreux.G, FESTA.J, « Nouveau Guide du béton et de ses constituants », Edition Eyrolles, 2002, 409p.
- [28] NF EN 12390-2, « Essai pour béton frais. Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes », AFNOR ;2001.
- [29] NF EN 12504-4, « Essais pour béton dans les structures. Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son » AFNOR,2005.
- [30] NF EN 12504-2, « Essais pour béton dans les structures. Partie 2 : Essais non destructifs-Détermination de l’indice de rebondissement », AFNOR,2003.

[31] NF EN 12390-3, « Essais pour béton durci. Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes », AFNOR,2003.

[32] NF EN 206-1, « Concrete-part 1 : spécification, performance, production and conformity », European Standard,2000, 72p, AFNOR.

[33] NA 16002, « Béton : Spécification, Performance et Conformité »,Norme Algérienne,2007.

[34] NF EN 12350-9, « Essai pour béton frais - Partie 9 : Béton autoplaçant – Essai d'écoulement à l'entonnoir en V-funnel », AFNOR,2007.

[35] NF EN 12350-10, « Essai pour béton frais - Partie 10 : Béton autoplaçant - Essai à La boîte en L », AFNOR,2007.

[36] NF EN 12390-2, « Essai sur béton durci. Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes », AFNOR,2001.

[37] EN 12504-1 « Essais pour béton dans les structures – Partie 1 : Carottes – Prélèvement, Examen et essais en compression » ,2000.

[38] NF EN 13791 « Evaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton. ».

[39] NF EN 12350-5« Essai pour béton frais - Partie 5 : Essai d'étalement à la table à choc » AFNOR.

[40] NF EN 12350-2 « Essai pour béton frais Partie 2 : Essai d'affaissement » AFNOR.