



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'EL-OUED

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE ET DE GENIE CIVIL

En vue de l'obtention du diplôme de
Master en Génie Civil
Filière : Génie Civil
Spécialité : Matériaux en Génie Civil

THÈME

**Influence de la granulométrie du gravier et du sable sur
l' évaluation non destructive de la qualité du béton par
ultrason**

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

BEGGAS SALAH EDDINE

SOLTANI TAKI EDDINE

DEBBAR HOUSSINE

ENCADREUR:

Dr. MASMOUDI FOUZI

Devant le jury composé de:

HACHEM RAFIKA	EXAMINATEUR
LABYED BACHIR	EXAMINATEUR

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

en fin de ce travail, nous remercions d'abord Dieu de nous avoir donné la volonté et la patience, qui nous a accordé le succès, pour terminer ce travail. Nous tenons aussi à exprimer notre profonde gratitude au Mr Masmoudi fouzi qui nous a encadrer dans notre recherches, et de m'avoir accepté, supporté et soutenu physiquement et moralement sans relâche pendant les bons et les mauvais moments pendant cette recherche . Nous remercions également sincèrement tous les professeurs du Département de génie civil et d'hydraulique.

Nous remercions également les personnels du Laboratoire des Travaux Publics

laboratoire NEZOLAB

Résumé

Traditionnellement ; la méthode normalisée utilisée, pour évaluer la qualité du béton dans les ouvrages en béton comprend, les essais de résistance à la compression, effectués sur des éprouvettes coulées au même moment. Mais cette méthode a beaucoup d'inconvénients qui proviennent du fait que :

- les résultats ne sont pas immédiatement disponibles
- le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage, les conditions de cure ou le compactage peuvent être différents
- les propriétés de résistance d'une éprouvette dépendent de sa grosseur et de sa forme

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

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

- Les ultrasons UPV (ultrasonique pulse velocity).

Mots-clés :

Contrôle non destructif – scléromètre – ultrason - résistance à la compression - éprouvette – carotte – régressions.

Abstract

Traditionally; the standardized method used to assess the quality of concrete in concrete structures includes the compressive strength tests, carried out on specimens cast at the same time. But this method has a lot of disadvantages which come from the fact that:

- results are not immediately available
- the concrete of the specimens may be different from that of the structure, the curing conditions or the compaction may be different
- the resistance properties of a test piece depend on its size and shape

Of particular importance is the development of reliable methods for non-destructive evaluation of the properties of concrete in situ. These methods are based on the fact that certain physical properties of concrete can be related to strength and can be measured by non-destructive means.

Among the most popular and commonly used non-destructive methods, due to their simplicity and lower cost, to assess the strength of concrete on site are:

- UPV ultrasound (ultrasonic pulse velocity).

الملخص

عادت الطريقة المعهودة لتقييم مقاومة الخرسانة للضغط في المنشأة الخرسانية تتضمن التجارب المنجزة على عينات مصبوبة في الموقع أننا صب الخرسانة في المنشأة. إلا أن هذه الطريقة لها العديد من العيوب الناتجة عن عدم إمكانية الحصول الفوري على النتائج بالإضافة إلى إمكانية الحصول على خصائص غير مطابقة لخصائص خرسانة المنشأة، ذلك لاختلاف طريقة العلاج، خصائص مكان حفظ و تصلب العينات و الدمك و من ناحية أخرى فان خصائص مقاومة العينات تعتمد على شكلها و حجمها

تطور أساليب ناجعة للتقييم غير المتلف في عين المكان لخصائص الخرسانة يثبت إنها ذات أهمية خاصة، حيث تعتمد هذه الطرق على حقيقة الخصائص الفيزيائية للخرسانة التي يمكن أن تكون لها علاقة بالمقاومة و التي يمكن قياسها بوسائل غير متلفة للخرسانة

من بين هذه الوسائل نجد الأكثر شيوعا والتي تستخدم عادة لسبب بساطتها و لكونها غير مكلفة و سرعة تقييمها للخرسانة في الموقع

جهاز سرعة الموجات فوق الصوتية

كلمات البحث : مراقبة غير متلفة، جهاز قياس ، مقاومة الضغط، موجات فوق صوتية ، عينة

Liste de tableaux

Chapiter II :

Tab II.1	analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF P 18-554 / Sable touta Échantillon de masse: 1000 g	31
Tab II.2	analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF P 18-554 / Sable djamaa Échantillon de masse: 1000 g	31
Tab II.3	analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF P 18-554 / gravier (3/8) touta Échantillon de masse: 1500 g	32
Tab II.4	analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF P 18-554 / gravier (8/15) touta Échantillon de masse: 1500 g	32
Tab II.5	analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF P 18-554 / gravier (15/25) touta Échantillon de masse: 1500 g	33
Tab II.6	Nature et qualité du sable en fonction de l'ES [DAD 19]	36
Tab II.7	résultats Coefficient d'absorption d'eau .	39
Tab II.8	Correspondance entre classes granulaires et largeurs des grilles à fentes	41
Tab II.9	Classe granulaires, poids d'échantillons et boulets équivalent .	43
Tab II.10	Classification par le norme [N.F. P18.573].	45
Tab II.11	détermination de G (coefficient granulaire) .	55
Tab II.12	de valeur du terme correcteur K . N°01	56
Tab II.13	de valeur du terme correcteur K . N°02	59
Tab II.14	de valeur du terme correcteur K . N°03	62
Tab II.15	de valeur du terme correcteur K . N°04	65
Tab II.16	de valeur du terme correcteur K . N°05	68
Tab II.17	de valeur du terme correcteur K . N°06	71
Tab II.18	La norme NF EN 206 classe l'affaissement du béton en cinq groupes	75
Tab II.19	Formulation n°01 (sable 0/3 concasse + gravier 3/8)	80
Tab II.20	Formulation n°02 (sable 0/3 concasse + gravier 15/25)	81
Tab II.21	Formulation n°03 (sable 0/3 concasse + gravier 8/15)	82
Tab II.22	Formulation n°04 (sable DJAMAA + gravier 3/8 + gravier 8/15)	83
Tab II.23	Formulation n°05 (sable DJAMAA + gravier 3/8 +gravier 15/25)	84
Tab II.24	Formulation n°06 (sable DJAMAA + gravier 3/8 + gravier 8/15 + gravier 15/25)	85
Tab II.25	coefficients correcteurs de forme par rapport à l'éprouvette de référence 16*32	87
Tab II.26	Formulation n°01 avec correction	87
Tab II.27	Formulation n°02 avec correction	88
Tab II.28	Formulation n°03 avec correction	89

Tab II.29	Formulation n°04 avec correction	90
Tab II.30	Formulation n°05 avec correction	91
Tab II.31	Formulation n°06 avec correction	92

Chapiter III :

Tab III.1	Formulation n°01 / Conversion par rapport à 16*32 cm Résultat Ultrason vitesse et BAR	93
Tab III.2	Formule n°01 (sable 0/3 concasse + gravier 3/8)	93
Tab III.3	Formulation n°02 / Conversion par rapport à 16*32 cm	95
Tab III.4	Formulation n°02 (sable 0/3 concasse + gravier 15/25)	95
Tab III.5	Formulation n°03 / Conversion par rapport à 16*32 cm Résultat Ultrason vitesse et BAR	97
Tab III.6	Formulation n°03 (sable 0/3 concasse + gravier 8/15)	97
Tab III.7	Formulation n°04 / Conversion par rapport à 16*32 cm Résultat Ultrason vitesse et BAR	99
Tab III.8	Formulation n°04 (sable DJAMAA + gravier 3/8 + gravier 8/15)	99
Tab III.9	Formulation n°05 / Conversion par rapport à 16*32 cm Résultat Ultrason vitesse et BAR	101
Tab III.10	Formulation n°05 (sable DJAMAA + gravier 3/8 +gravier 15/25)	101
Tab III.11	Formulation n°06/ Conversion par rapport à 16*32 cm Résultat Ultrason vitesse et BAR	103
Tab III.12	Formulation n°06 (sable DJAMAA + gravier 3/8 + gravier 8/15 + gravier 15/25)	103
Tabl III.13	Variation du pourcentage de la résistance normale par écrasement atteint en 7J et 14J pour les différentes formulations	106

Liste des Figures

Chapitre I :

Fig I.1	Scléromètre	8
Fig I.2	Appareil de mesure	9
Fig I.3	Appareil d'auscultation sonique 58-E48 avec oscilloscope	11
Fig I.4	appareil numérique	13
Fig I.5	Courbe d'estimation la résistance à la compression in situ par utilisation conjointe de la mesure de la propagation d'ondes ultrasoniques et des résultats d'essai au scléromètre selon U. BELLANDER (1977)	14
Fig I.6	Schématisation d'un milieu élastique	16
Fig I.7	Catégorie d'onde acoustique	17
Fig I.8	La longueur d'onde λ	17
Fig I.9	Onde longitudinale [Corapcioglu 1996]	19
Fig I.10	Onde transversale [Corapcioglu 1996]	19
Fig I.11	Onde de Rayleigh	20
Fig I.12	Ondes de Lamb	21
Fig I.13	Onde de plane	21
Fig I.14	onde sphérique	22
Fig I.15	Mesures en transparence (directe)	24
Fig I.16	Mesures en surface	24
Fig I.17	Mesures semi direct	25
Fig I.18	Courbes de calibrages	27
Fig I.19	Courbe RILEM	28

Chapitre II :

Fig II.1	appareil de tamisage / tamis .	30
Fig II.2	essai d'équivalent du sable .	35
Fig II.3	Onde transversale [Corapcioglu 1996]	36
Fig II.4	eassi Masse volumique apparente .	37
Fig II.5	essai Masse volumique absolue .	38
Fig II.6	forme d'un granulat .	40
Fig II.7	Appareillage Coefficient d'aplatissement .	41
Fig II.8	Appareillage- Micro Deval.	42
Fig II.9	Appareillage los Angeles .	45
FigII.10	gravier touta .	46
FigII.11	La qualité du ciment utilisé .	48
Fig II.12	dosage approximatif en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée .	52
Fig II.13	Le Traçage de la courbe granulaire de référence AOB	53

Fig II.14	Traçons les lignes de partage joignant les points à 5% et 95% des courbes successives les pourcentages en volume absolu sont pour chacun des granulats. N° 01	57
Fig II.15	Traçons les lignes de partage joignant les points à 5% et 95% des courbes successives les pourcentages en volume absolu sont pour chacun des granulats. N° 02	60
Fig II.16	Traçons les lignes de partage joignant les points à 5% et 95% des courbes successives les pourcentages en volume absolu sont pour chacun des granulats. N° 03	63
Fig II.17	Traçons les lignes de partage joignant les points à 5% et 95% des courbes successives les pourcentages en volume absolu sont pour chacun des granulats. N° 04	66
Fig II.18	Traçons les lignes de partage joignant les points à 5% et 95% des courbes successives les pourcentages en volume absolu sont pour chacun des granulats. N° 05	69
Fig II.19	Traçons les lignes de partage joignant les points à 5% et 95% des courbes successives les pourcentages en volume absolu sont pour chacun des granulats. N° 06	72
Fig II.20	Essai cône d'Abrams .	74
Fig II.21	Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams	75
Fig II.22	l'éprouvette 15 *15* 15 cm	76
Fig II.23	Appareil utilisateur presse a beton et certificat d'étalonnage	78
Fig II.24	Appareil utilisateur ultrason et certificat d'étalonnage	79
Fig II.25	résistance a la compression des éprouvettes de différentes géométries .	86

Chapiter III :

Fig III.1	Comparaison des résultats de pression et Ultrason N°01 .	94
Fig III.2	Comparaison des résultats de pression et Ultrason N°02 .	96
Fig III.3	Comparaison des résultats de pression et Ultrason N°03 .	98
Fig III.4	Comparaison des résultats de pression et Ultrason N°04 .	100
Fig III.5	Comparaison des résultats de pression et Ultrason N°05 .	102
Fig III.6	Comparaison des résultats de pression et Ultrason N°06 .	104

Table des matières

Remerciements	I
Abstract	Ii
ملخص	Iii
Resumé	
Table des matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction	1
CHAPITRE I : étude bibliographique Sur le béton Les Essais béton (E.D/E.N.D)	
I.1 Introduction	2
I. 2 Méthodes destructives	2
I. 2-1 But	2
I. 2-2 Principe	2
I. 2-3 Caractérisation du béton par méthodes destructives	2
I-3 Méthodes semi-destructives	3
I-4 Méthodes non destructives	3
I-4-1 Historique	4
I-4-2 Introduction:	5
I-4-3 Définition des essais non destructifs:	5
I-4-4 les domaines d'application :	6
I-4-5 le But :	6
I-4-6 Avantages de ces méthodes :	6
I-5 les Méthodes D'essais	6
I-5-1 Essai au scléromètre	7
I-5-2 Les méthodes acoustiques : soniques et ultrasoniques.	9
I-5-3 Les méthodes électromagnétiques	11
I-5-4 Les méthodes électriques	11
I-5-5 Les méthodes thermiques	12
I-5-6 Les méthodes radiographiques	12
I-5-7 Les méthodes optiques	12
I-5-8 Les inspections visuelles	13

I-5-9 Méthodes combines	13
I-6 Spécialisation en Les ultrasons	15
I-6-1 Définitions d'ondes acoustiques	15
I-6-2 Les techniques acoustiques	16
I-6-3 Caractéristique des ondes acoustiques	17
I-6-4 Différents types d'ondes	17
I-6-4-1 Les ondes longitudinales et transversales	18
I-6-4-2 Les ondes de surface	19
I-6-4-3 ondes de LAMB	20
I-6-4-4 Onde plane et ondes sphérique	21
I-6-5 La production des ultrasons	22
I-6-6 Les propriétés des ultrasons	22
I-6-7 Le Mode Opératoire	23
I-6-7-1 Travaux préparatoires	23
I-6-7-2 Points de mesures	23
I-6-7-3 Distances minimales entre points de mesures	23
I-6-7-4 Étalonnage de l'appareil	23
I-6-8 Manières de mesure	23
I-6-8-1 Mesure en transparence (directe)	23
I-6-8-2 Mesures en surface (indirecte)	24
I-6-8-3 Mesures semi directe	24
I-6-9 Interprétation Des Résultats De Mesure Aux Ultrasons	25
I-6-10 Corrélation entre la vitesse de propagation du son et la résistance du béton	26
I-6-11 Paramètres influents la vitesse des ultrasons	26
I-6-12 Autres interprétations possible	27
I-7 Conclusion	28
CHAPITRE 2 : Etude expérimentale	
II-1 les essai	30
II-1-1 Analyse granulométrique	30
II-1-2 Module de finesse (Mf)	33
II-1-3 Équivalent de sable	34
II-1-4-1 Masse volumique apparent	36
II-1-4-2 Masse volumique absolue	37
II-1-5 Coefficient d'absorption d'eau	38
II-1-6 Coefficient d'aplatissement	40
II-1-7 Essai Micro Deval	42
II-1-8 Essai los Angeles	44
II-1-9 Propreté superficielle de gravier	46
II-2 L'eau de gâchage	47

II-3 ciment utilise	48
II-4 Formulations du béton	50
II-4-1-1 Les différentes méthodes de composition des bétons	51
II-4-1-2 Méthode de Dreux-Gorisse	51
II-4-2 Formule n°01 (sable 0/3 + gravier 3/8)	55
II-4-3 Formule n°02 (sable 0/3 + gravier 15/25)	58
II-4-4 Formule n°03 (sable 0/3 + gravier 8/15)	61
II-4-5 Formule n°04 (sable 0/3 djamaa + gravier 8/15 et gravier 3/8)	64
II-4-6 Formule n°05 (sable 0/3 djamaa + gravier 15/25 et gravier 3/8)	67
II-4-7 Formule n°06 (sable 0/3 djamaa + gravier 15/25, gravier 8/15 et gravier 3/8)	70
II-5 Essai d'ouvrabilité au cône d'Abrams	73
II-6 Nature de essais (DIS et N D)	76
II-7 Les résultats des essais	80
II-8 Effet de la forme de l'éprouvette	85
II-9 Les résultats des essais avec correction	87
Chapitre 03 : analyse de résultat	
III-1 Résultat Pour La Formulation N°01 :	93
III.2 Résultat Pour La Formulation N°02	95
III-3 Résultat Pour La Formulation N°03	97
III-4 Résultat Pour La Formulation N°04	99
III-5 Résultat Pour La Formulation N°05	101
III-6 Résultat Pour La Formulation N°06	103
Analyse de résultats	105
conclusion	107
Références bibliographiques	108

INTRODUCTION

INTRODUCTION :

Lors de l'expertise des ouvrages en béton, l'expert peut être amené à s'interroger sur la capacité de la structure à remplir ses fonctions à la suite de modification des conditions d'exploitation (augmentation des charges appliquées) ou modifications de fonctionnement de l'ouvrage résultant de transformations structurelles volontaires (aménagement divers, extension...) ou subies des désordres tels que la dégradation du béton ; d'où la nécessité de connaître omni d'autres observations, la qualité du béton formant la structure.

Dans cette perspective, et parmi d'autres techniques, les méthodes d'inspection par les ultrasons sont intéressantes de par leurs aspects non- destructifs et pour leurs sensibilités à l'évolution des paramètres mécaniques du matériau béton. Cependant, leurs sensibilités à beaucoup de paramètres d'influence venant de la composition du béton (ciment, agrégats,...) ainsi que l'influence du temps et aussi l'absence de critères d'évaluation généralisée ou de procédures normalisées demeurent un frein à leur généralisation.

Ce mémoire vise à mieux comprendre les méthodes non destructives basées sur la propagation des ondes ultrasonores pour l'évaluation de la qualité du béton des ouvrages et à étudier les paramètres d'influence entrant dans la composition du béton tel que les agrégats, le dosage en ciment ..., ou les effets du temps tel que l'âge du béton, sur l'estimation des caractéristiques mécaniques du matériau béton par l'examen et la comparaison en laboratoire des essais non destructifs utilisant les ondes ultrasonores et les essais destructifs qui sont les essais de compression classiques sur les mêmes éprouvettes tout en variant les paramètres d'influences cités ci-dessus.

CHAPITRE I :

étude bibliographique Sur le béton

Les Essais béton

(E.D/E.N.D)

Chapitre 01

I.1- Introduction :

Le béton est un matériau de construction qui trouve son champ d'utilisation pratiquement, dans tous les domaines de génie civil pour les avantages économiques et techniques qu'ils présentent mais d'une manière générale les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, notamment lors de la confection du béton et lors de sa mise en œuvre. Les méthodes habituelles d'évaluation de la qualité du béton, dans le domaine de la construction sont celles relatives aux essais destructifs à la compression et à la traction effectués sur des éprouvettes prélevées lors de la réalisation de l'ouvrage. Mais lors de la mise en œuvre, plusieurs paramètres liés à la qualité sont concernés en raison du non respect des règles élémentaire de mise en œuvre. Et par conséquent des doutes sont émis sur la qualité des bétons (mise en œuvre). Ces doutes mèneront vers un contrôle sur les ouvrages réalisés. Plusieurs méthodes de contrôle de qualité peuvent être envisagées, les plus couramment utilisées sont :

- méthodes les destructives
- Les méthodes non destructives

I -2 Méthodes destructives :

La plupart des propriétés des bétons sont en général évaluées par des essais sur des échantillons ayant été confectionnés avec la même gâchée que les ouvrages (éprouvettes normalisées 16/32 par exemple) ou bien ayant été prélevés (carottes) directement sur les ouvrages à ausculter [Bungey and Millard 1996]. Ces essais sont destructifs. Les mesures des résistances R_c et R_t sont par exemple réalisées avec des presses (compression, traction par fendage, par flexion, les cas où il est impossible de prélever un échantillon sur la structure, ou si l'on souhaite suivre l'évolution d'une caractéristique au cours du temps. Les principales techniques d'auscultation du béton couramment utilisées en génie civil sont présentées dans les ouvrages de Malhotra and Carino [Malhotra and Carino 1991], Bungey and Millard [Bungey and Millard 1996], ou Breyse and Abraham [Breyse and Abraham 2005].

I-2-1 But :

L'essai permet de déterminer la résistance à la compression dite sur cylindre du béton. On en déduira alors la résistance caractéristique.

1-2-2 Principe :

L'essai est effectué sur l'éprouvette cylindrique par compression entre les plateaux d'une presse. Pour que les faces de chargement soient planes et perpendiculairement à l'axe de l'éprouvette, il est impératif de rectifier l'éprouvette.

I-2-3 Caractérisation du béton par méthodes destructives :

Les essais destructifs sont réalisés sur des éprouvettes ou sur des échantillons extraits de la structure considérée. Le carottage suit une procédure normalisée [ASTM C42/C 42M- 13].

Chapitre 01

Les méthodes destructives nous permettent de tester les propriétés mécaniques du matériau jusqu'à la rupture. Les informations peuvent être obtenues en profondeur. Les agressions chimiques et la porosité peuvent également être évaluées. La variabilité des propriétés évaluées par les méthodes destructives est importante, ce qui conduit à une grande incertitude des modèles probabilistes étudiés ultérieurement.

Pour exemple, les travaux de Pfister [Pfister 2014] conduisent à évaluer l'état du béton du bâtiment Punta Perotti en Italie, âgé de 10 ans et exposé à des conditions environnementales agressives en raison de la proximité de la mer et du vent. Le test de résistance mécanique de compression (RC) est réalisé sur 103 échantillons extraits de planchers de deux étages. Les valeurs moyennes et coefficients de variation de RC de deux étages sont respectivement **33 MPa** et 18.3 % puis **28.2 MPa** et 14.4 %. Ce résultat nous montre la variabilité importante des tests in situ.

Les techniques destructives sont privilégiées dans le cas des produits fabriqués en série où le coût de détruire quelques éprouvettes issues de ces produits est négligeable. Dans le cas des structures en génie civil demandant une haute maîtrise en terme de sécurité, le carottage doit être limité et optimisé. Il est même parfois interdit.

I-3 Méthodes semi-destructives :

Une série de méthodes permet d'évaluer in situ la résistance mécanique en surface du béton. Leur utilisation est assez répandue et quelque fois normalisée comme la norme européenne EN 13791 [EN 13791 2007]. Des scléromètres permettent de mesurer la dureté de la surface de béton. La hauteur de rebond d'une masse projetée avec une certaine vitesse sur la surface du béton permet de remonter à la résistance en surface du béton. Cet appareil ne donne qu'une information locale sur les propriétés du béton. D'autres méthodes telles que les essais de résistance à la pénétration (sonde Windsor) ou des essais d'arrachement d'une tige métallique scellée dans le béton (pull-out) fournissent également des informations locales sur la résistance à la compression du béton en surface. Ces méthodes sont partiellement destructrices car elles laissent des impacts et des trous dans le parement (que l'on peut reboucher facilement). Ces méthodes sont couramment utilisées sur les ouvrages et peuvent donner des informations très utiles aux maîtres d'œuvres. Cependant, la précision reste faible et l'information n'est que locale. 25

I-4 Méthodes non destructives :

Comparée au développement des méthodes d'évaluation non destructive dans le domaine des structures en acier, l'évolution de ces techniques pour les ouvrages en béton se fait plus lentement. Cela peut s'expliquer par la complexité du matériau béton, et notamment son hétérogénéité à l'échelle macroscopique, par rapport à l'acier [Carino 2003]. De ce fait, il est

Chapitre 01

difficile de transférer les technologies développées pour l'acier au domaine de l'auscultation du béton. En 2000, une revue faite par le Comité Technique « Non Destructive Evaluation » de la RILEM recensait plus de 115 méthodes d'évaluation des propriétés du béton [Burghardt 2000]. Actuellement, ces méthodes d'auscultation non destructives sont utilisées mais elles ne sont pas encore totalement reconnues par la communauté de l'END (physiciens, électriciens, mécaniciens...), et par conséquent, elles ne sont pas encore systématiquement utilisées (et réciproquement) [Carino 2003]. L'OECD-NEA (1998) précise qu'il y a un manque général de confiance dans les techniques END car il y a très peu d'avis indépendants sur leur applicabilité, leur capacité, leur précision et leur fiabilité. De plus, il n'existe souvent pas de consensus possible, ni de norme appropriée. Les méthodes d'END sont souvent utilisées pour mesurer un phénomène précis,

comme par exemple évaluer la résistance en compression du matériau, alors qu'elles pourraient s'inscrire dans le cadre d'un vaste programme de surveillance de l'ensemble d'une structure [McCann et Forde 2001]. Les méthodes non destructives utilisées aujourd'hui pour l'auscultation des structures en béton peuvent être classées en sept catégories qui sont décrites succinctement dans les paragraphes suivants **[NET 1]**.

- Le niveau élevé atteint par la physique vers le milieu du xx e siècle s'est manifesté également dans les méthodes d'essai des constructions. un vieux désir du constructeur, celui de prévoir la charge qui provoquerait la rupture d'une structure ou d'un élément sans les détruire et même sans les altérer commençait à se matérialiser. Ainsi apparaissent les essais non destructifs qui contrôlent la qualité directe de la construction. Pour cela on va décrire dans ce chapitre les principales méthodes non destructives en soulignant leurs avantages et leurs inconvénients.

I-4-1 Historique:

Williams en (1936) a lancé le premier essai non destructif, Après ça et pendant le développement de domaine de la construction, une gamme d'essais non destructifs in-situ, a été développée, par tant de chercheurs dans ce domaine comme : Ernest Schmilt (1948), Jones (1962), Whitehurst (1966), Malhotra (1976). Bungey (1982) a présenté une enquête complète de littérature pour les méthodes non destructives normalement utilisées pour l'essai et l'évaluation du béton,. Au milieu des années soixante Skramtaev et Leshchinsky (1966) ont proposé pour la première fois l'utilisation de deux méthodes non destructifs ensembles.

Le travail le plus fondamental à ce sujet a été présenté par Facaoaru (1969). En (1991) Leshchinsky a récapitulé les avantages des essais non destructifs comme la réduction de la consommation de travail de l'essai, une diminution de la consommation de travail des travaux préparatoires, peu de dommages structuraux, l'utilisation d'équipement d'essai moins cher, par rapport à l'essai destructif. Ces avantages sont sans valeur si les résultats ne sont pas fiables.

Chapitre 01

Au cours de cette période, plusieurs méthodes non destructives d'évaluation ont été mises au point. [NET1]

I-4-2 Introduction:

Les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, si pour cette raison que depuis longtemps il y a une demande accrue pour des méthodes plus précises et, en même temps, plus souples d'évaluation de la qualité du béton. Pour cela on recourt aux essais non destructifs (E.N.D) du béton qui en utilisant des méthodes non destructives Les avantages de ces essais par rapport aux autres peuvent être résumés comme suit :

- - Essai d'une construction sans la détruire, ni nuire à sa capacité de service ;
- - Possibilité d'obtenir des informations dans des domaines inaccessibles aux méthodes classiques (par exemple : observation in situ du durcissement du béton dans l'ouvrage, détermination et observation dans le temps du degré de corrosion des ouvrages) ;
- - Supplément d'informations de caractère local, sous forme de données se rapportant à un grand volume de matériau, donc possibilité d'obtenir un tableau plus complet de l'homogénéité du matériau dans l'ouvrage ;
- - Economie de matériaux, de temps et d'outillages d'essai par la possibilité de faire les essais sur le matériau dans l'ouvrage même ou sur une seule éprouvette un nombre pratiquement infini de fois, due à la rapidité de l'exécution de ce type d'essais et aussi au fait qu'on peut remplacer certains outillages coûteux et dont la manipulation est délicate par des appareils simples et transportables

I-4-3 Définition des essais non destructifs:

Les essais non destructifs (E.N.D) représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées aux structures de bâtiments, ouvrage d'art ou de génie civil. Comme leur nom l'indique il s'agit de mesures n'endommageant pas les constructions. Etant entendu que quelques désordres mineurs peuvent être apportés à la structure sans toutefois modifier ni sa performance ni son apparence. Une importante caractéristique des essais non destructifs est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre les changements des propriétés du béton dans le temps.

Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction. La signification de ces essais se développera considérablement à l'avenir, parce que sa technologie de mesure automatisée et la réduction de la taille de l'appareillage de mesure ouvriront des applications entièrement nouvelles. Ces essais sont rapides et légers à mettre en œuvre, et apportent de

Chapitre 01

surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage, dans le cadre des contrôles d'ouvrages neufs ou en construction et comme diagnostic d'état d'ouvrages anciens.

I-4-4 les domaines d'application :

Les essais non destructifs permettent de contrôler la qualité de la construction et mesurer de façon indirecte les caractéristiques des matériaux à savoir :

- La résistance
- l'homogénéité
- La porosité
- La durabilité

I-4-5 le But :

Ces essais sont rapides et faciles à mettre en œuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage, dans le cadre de contrôles d'ouvrages neufs ou en construction comme de diagnostics d'état d'ouvrages anciens.

I-4-6 Avantages de ces méthodes :

Les méthodes non destructives présentent les avantages suivants :

- La performance ou l'apparence de la structure n'est pas modifiée ;
- La possibilité de suivre le changement des propriétés du béton dans le temps ;
- Une plus grande sécurité, et une meilleure planification de la construction ;
- Une progression plus rapide et plus économique.

I-5 les Méthodes D'essais :

Il existe deux types de méthodes pour l'estimation de la résistance de compression du béton. Les premiers, englobent les méthodes qui ne mesurent pas directement la résistance mais d'autres propriétés du béton, à partir desquelles, une estimation de la résistance peut être obtenue. Ces méthodes incluent les tests suivants :

- ❖ **I-5-1** Essai au scléromètre
- ❖ **I-5-2** Les méthodes acoustiques : soniques et ultrasoniques.
- ❖ **I-5-3** Les méthodes électromagnétiques
- ❖ **I-5-4** Les méthodes électriques
- ❖ **I-5-5** Les méthodes thermiques

Chapitre 01

- ❖ I-5-6 Les méthodes radiographiques
- ❖ I-5-7 Les méthodes optiques
- ❖ I-5-8 Les inspections visuelles
- ❖ I-5-9 Méthodes combinées

I-5-1 Essai au scléromètre :

L'essai au scléromètre consiste à projeter une masse sur la surface du béton avec une énergie initiale constante. Suite au choc, une partie de l'énergie est absorbée par le béton, l'autre partie provoque le rebondissement de la masse. L'énergie d'impact est produite par un système de ressorts dont l'amplitude du mouvement de recul est fonction de :

L'énergie de recul Caractéristiques des systèmes de ressorts

La mesure de la dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité ; elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité des bétons d'un ouvrage.

La détermination de la dureté est basée sur la mesure du recul que subit un dispositif mobile (commandé par un ressort) à la suite d'une collision entre le dispositif et la surface du béton.

Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilisé de nos jours. Il a été développé par ERNST SCHMIDT EN (1948) et est connu sous le nom l'essai au marteau Schmidt ou essai au scléromètre. Le marteau de Schmidt (photo I.1)) est resté le seul instrument connu qui utilise le principe de rebondissement pour les essais sur le béton selon R.F FELDMAN (1977). En (1984) T.AKASHI ET S.AMASAKI ont déclaré que malgré son apparente simplicité, l'essai au scléromètre sous-tend des problèmes complexes d'impact et de propagation de l'onde qui lui sont associés.

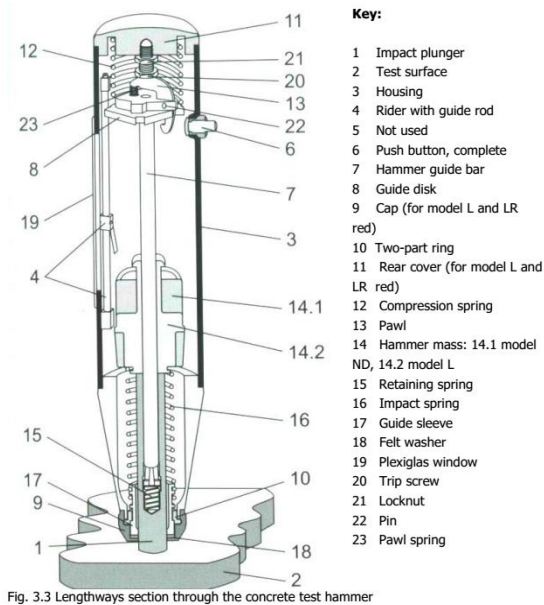


Fig I. 1: scléromètre

Principe :

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 laquelle 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 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.

Quelques modèles de scléromètres impriment le relevé des résultats sur un rouleau de papier paraffiné. L'indice de rebondissement est une mesure arbitraire, car elle dépend de l'énergie emmagasinée par le ressort et de la dimension de la masse.

Chapitre 01

Appareillage :

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

L'appareil est composé d'une masselotte chargée par un ressort qui se projette sur une tige métallique appelée tige de percussion. Il est livré avec une pierre à polir et un bloc d'étalonnage. [NET 1]

I-5-2 méthodes acoustiques : soniques et ultrasoniques: [NET 1]

Les techniques d'auscultation reposant sur la propagation d'ondes mécaniques sont largement employées dans les domaines de la métallurgie [Garnier et al. 2009]. Elles sont dérivées des méthodes géophysiques sismiques et reposent sur l'interprétation, soit en temps, soit en fréquence, de l'onde enregistrée en fonction de l'onde émise. Les principales techniques sont :

les Ultrasons (US), les Ondes de Surface (OS) [Hévin 1998, Hassaim 1999, Al Wardany 2005], la Tomographie Acoustique (TO) [Côte 1988, Sahebi 1996, Kharrat1997], l'Emission Acoustique (EA) et l'Impact-Echo (IE) Principe.

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

Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables sont utilisées dans le récepteur JONS.R ET FACAOARU (1969).

La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.

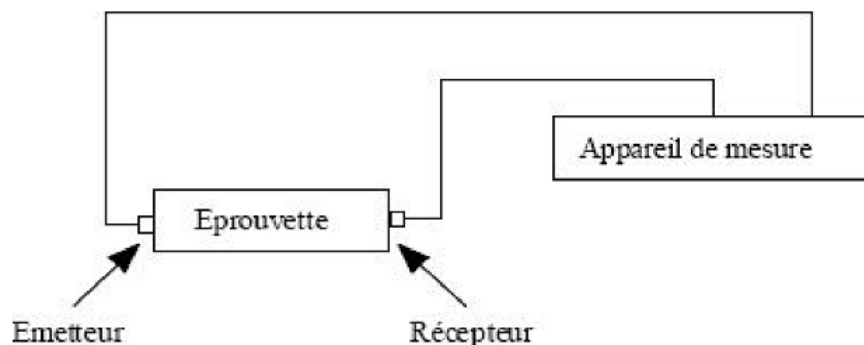


Fig I.2 : Appareil de mesure

Chapitre 01

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonique et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variables tel que l'Age du béton, les conditions d'humidité, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et les fissures. La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions.

Ces facteurs représente un inconvénient majeur des essais non destructifs dans lequel la propriété du béton que l'on mesure est affectée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance du béton. Cette technique pour l'estimation de la résistance du béton in situ n'est pas encore considérée, dans la partie que, comme un outil de remplacement au cylindre standard et aux cubes, mais peut être utilisée comme une technique additionnelle, quand elle sera exécutée avec des essais de carottage.

A l'utilisation de la valeur de la vitesse de propagation d'une onde sonore pour déterminer la résistance du béton, il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique entre les deux selon STURRUP, VECCHIO ET CARATIN (1984).

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés. Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures :

1- Les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes sonores selon STURRUP, VECCHIO ET CARATIN (1984)

2- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs.

Les matériaux d'interposition sont la vaseline de commerce, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaler la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

3- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température. FELDMAN (1977).

Chapitre 01

4- La présence d'acier d'armature dans le béton en particulier l'armature qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de la vitesse BUNGEY (1989). Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.



Fig I. 3 : Appareil d'auscultation sonore 58-E48 avec oscilloscope

I-5-3 Les méthodes électromagnétiques :

Le principe repose sur l'émission d'une onde électromagnétique et sur l'analyse du signal induit et de ses perturbations. On distingue principalement 3 types de méthodes :

l'auscultation basse fréquence (pachomètre), le radar et la méthode capacitive. Ce sont les développements des antennes à hautes et très hautes fréquences (1,5 GHz) qui ont permis la transposition de ces méthodes géophysiques au génie civil. La méthode RADAR, utilisée notamment à la surface des tabliers de ponts [Rhazi et al. 2003] permet, par un balayage très rapide d'avoir une image en trois dimensions de la structure. Ainsi, on peut déterminer la profondeur des armatures [Dérobert et al. 2001], l'épaisseur de différentes couches présentes dans le béton, une estimation de la teneur en eau [Laurens 2001, Sbartaï 2005] et de la contamination par les chlorures [Klysz 2004]. Généralement couplée avec des mesures du potentiel et de vitesse de corrosion, elle renseigne sur l'état d'avancement de la corrosion des armatures [Balayssac et al. 2002].

I-5-4 Les méthodes électriques :

Résistivité, potentiel et Vitesse de corrosion Elles reposent sur la mesure des intensités des courants, et/ou des différences de potentiel au sein du matériau, dues soit à des réactions

Chapitre 01

électrochimiques naturelles dans le matériau cas de la corrosion), soit à des sollicitations artificielles. Cette famille regroupe les mesures de la résistivité électrique [Lataste 2002], du potentiel de corrosion, et de la vitesse de corrosion [Andrade et al. 1996].

I-5-5 Les méthodes thermiques :

Dans le domaine du contrôle non destructif d'ouvrages, les méthodes thermiques sont émergentes. L'apparition récente de la thermographie infrarouge (TIR) a permis aux méthodes thermiques de s'immiscer dans le domaine de l'auscultation des ouvrages [Sirieix et al. 2005]. Il s'agit alors de mesurer la réponse d'un ouvrage aux variations de températures naturelles ou artificielles (respectivement pour les méthodes dites passives ou actives).

Les mesures sont effectuées dans le domaine spectral de l'infrarouge dit moyen, entre 2 et 15 μm [Gaussorgues 1999].

I-5-6 Les méthodes radiographiques :

Il s'agit des techniques classiques de radiographie : la surface à ausculter est exposée à un rayonnement (γ ou X selon la méthode), qui après avoir traversé le matériau impressionne un film photographique. On distingue parmi ces méthodes la gammagraphie, la radiographie et la radioscopie [Rondelle et al. 2005].

I-5-7 Les méthodes optiques :

Les méthodes optiques de mesure de champs ont l'avantage de ne pas interagir avec l'objet ausculté. Certaines méthodes, comme la photoélasticimétrie, le moiré et l'holographie ont été employées par le passé (il y a environ une vingtaine d'années) mais se sont confrontées à des difficultés de mise en œuvre sur le terrain. Avec le développement de l'informatique et de la vidéo, ces techniques sont aujourd'hui des méthodes dont l'utilisation est de plus en plus simple. Mais il ne faut pas perdre de vue la difficulté d'interprétation qui demande encore aujourd'hui une très bonne connaissance de la mesure et de la physique des phénomènes mis en jeu.

Parmi cette grande famille, nous pouvons citer trois techniques de mesure optiques :

- la photogrammétrie,
- la projection de franges et
- l'interférométrie.

Ces méthodes sont, de manière générale, de plus en plus courantes dans le monde industriel et notamment en génie civil [Taillade 2005].

I-5-8 les inspections visuelles :

L'inspection visuelle [Graybeal et al. 2002] est la plus simple et la plus immédiate des techniques d'auscultation non destructive d'une surface. Les pathologies les plus courantes sont décrites afin d'aider à la détection, à la reconnaissance et au diagnostic.

Les progrès technologiques récents permettent de soutenir cette méthode, en offrant des capteurs complémentaires de l'œil (appareils numériques), des moyens d'enregistrement (pour un suivi dans le temps) ainsi que des procédés d'analyse d'image pour l'interprétation.



FigI. 4 : appareil numérique

Cette méthode reste néanmoins très subjective puisque les résultats sont étroitement liés à l'expérience et au jugement de l'inspecteur.

Le suivi topographique des ouvrages est aussi un moyen d'inspection très important qui permet de suivre les déformations d'ouvrages dans le temps.

I-5-9 Méthodes combinées :

Il est possible de combiner deux ou plusieurs méthodes non destructives à la fois et dont les résultats, introduits dans un traitement unique garantissent au résultat final obtenu une précision supérieure. A titre d'exemple MAMILLAN ET BOUINEAU (1980) on déduit de leur recherche sur ce sujet une méthode combinée qui permet une appréciation de la résistance de béton in situ en relation avec l'indice scléro-métrique et la vitesse de son. Indépendamment du type d'essai non destructif utilisé, les données proportionnées et fiables de corrélation avec des données standard de la résistance à la compression en 28 jours sont habituellement nécessaires pour évaluer l'exactitude de la méthode non destructive. En outre, la corrélation avec des résistances à la compression en place employant des carottes de un ou deux endroits peut fournir des conseils en interprétant des résultats d'essai non destructifs; ceux-ci peuvent alors être employés pour examiner de plus

Chapitre 01

grandes parties de la structure. Le soin devrait être pris pour considérer l'influence des tailles et des endroits variables des éléments structuraux Cette solution est particulièrement avantageuse lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires.

Par exemple, lorsqu'une augmentation du taux d'humidité augmente la vitesse de son, mais diminue l'indice de rebondissement enregistré avec l'essai au scléromètre BELLANDER (1977) figure (1).

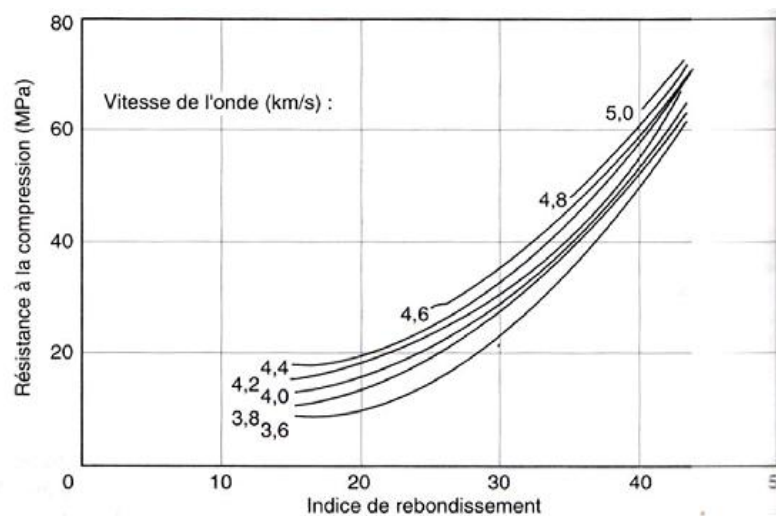


Fig I.5 : Courbe d'estimation la résistance à la compression in situ par utilisation conjointe de la mesure de la propagation d'ondes ultrasoniques et des résultats d'essai au scléromètre selon U. BELLANDER (1977)

La RILEM (1993) propose des recommandations sur l'utilisation combinée d'essais non destructifs.

Cette technique est utilisée pour la détermination de la résistance en compression en tenant compte à la fois vitesse de propagation de son et l'indice de rebondissement est la méthode combinée ; elle permet d'attendre une précision accrue. Le principe reste identique et on a recours à un béton standard qui possède une courbe d'étalonnage spécifique.

Principe :

Dans notre étude on a basé sur la combinaison de deux essais non destructifs le plus largement répandus; essai de vitesse ultrason et l'essai de scléromètre. Le principe de cette méthode consiste à déterminer la résistance en compression du béton à partir des abaques donnant la variation de la résistance du béton en fonction de la vitesse des ultrasons

Chapitre 01

et de l'indice de rebondissement $[R(V, N)]$. Cette résistance est corrigée par des valeurs des coefficients d'influences des différents constituants et de leur nature. Ou bien à partir des formules d'estimation d'après les résultats des essais au laboratoires.

Cette technique est utilisée pour la détermination de la résistance en compression en tenant compte à la fois vitesse de propagation de son et l'indice de rebondissement est la méthode combinée ; elle permet d'attendre une précision accrue. Le principe reste identique et on a recours à un béton standard qui possède une courbe d'étalonnage spécifique.

La méthode a été développée pour essayer d'augmenter la fiabilité des essais non destructifs en détectant la résistance du béton.

D'après une enquête de RILEM, il existe actuellement diverses méthodes combinées telle que:

- Vitesse des ondes ultrasonores longitudinales – dureté des empreintes.
- Vitesse des ondes ultrasonores longitudinales – dureté superficielle par indice de rebondissement.
- Vitesse des ondes ultrasonores- atténuation ou amortissement des ondes ultrasonores.
- Vitesse des ondes ultrasonores- atténuation de la fréquence propre.
- Vitesse des ondes ultrasonores- atténuation des rayons.
- Vitesse des ondes ultrasonores-vitesse des ondes ultrasonores transversales.
- Dureté au choc par rebondissement- dureté par empreinte.

I-6 Spécialisation en Les ultrasons :

I-6-1 Définitions d'ondes acoustiques :

Les ultrasons sont des ondes acoustiques, donc mécaniques, de fréquence supérieure à la fréquence de coupure de l'oreille humaine, soit environ 15 kHz. La vitesse de propagation d'une onde devient plus élevée lorsque le temps de transmission de l'information d'une particule élémentaire constituant la matière à sa voisine est plus facile. Elle dépend du niveau de cohésion de la matière. Ainsi, les vitesses de propagation d'une onde dans l'air, l'eau ou l'aluminium sont approximativement et respectivement égales à 340 m/s, 1500 m/s et 6000 m/s. Selon la nature du milieu (fluide ou solide), une onde est entièrement décrite par une grandeur scalaire comme la pression ou par une grandeur vectorielle comme le déplacement particulaire. Dans ce dernier cas, l'onde est alors une onde

Chapitre 01

élastique. Les ondes ultrasonores se propagent moins bien dans les gaz que les sons audibles, d'autant plus mal que leur fréquence est élevée.

L'onde ultrasonore est une vibration mécanique qui se propage dans un milieu élastique (solide, liquide ou gaz) et dont la fréquence se trouve au-delà des fréquences audibles.

L'onde sonore est une onde mécanique qui nécessite un milieu matériel élastique et déformable pour se propager (figure 6).

Les corps possèdent une certaine élasticité, ils ont la possibilité de se déformer sous l'action des forces extérieures et reprennent leur forme initiale lorsque celles-ci sont supprimées.

Un milieu élastique peut être schématisé grossièrement par des petites masses élémentaires (figurant les particules) réparties régulièrement dans l'espace et reliées par des ressorts (figurant les forces de cohésion de la matière)

I-6-2 Les techniques acoustiques :

Il existe trois techniques acoustiques pour évaluer le béton, nous avons : Les ultrasons (auscultation sonique ou ultrasonique pulse vitesse (UPV)) c'est ce que nous avons utilisée dans le cadre de notre étude; L'impact-écho; L'émission acoustique.

La méthode de la vitesse d'impulsion (UPV) est une méthode vraiment non destructive, car la technique utilise des ondes mécaniques, ce qui n'entraîne aucun dommage sur l'élément en béton testé. Un échantillon peut être testé à plusieurs reprises au même endroit, ce qui est utile pour surveiller le béton subissant des changements structurels internes sur une longue période de temps. [3].

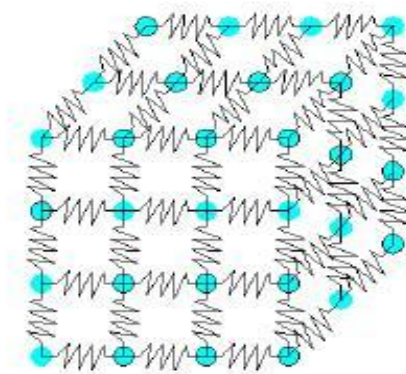


fig I.6 : Schématisation d'un milieu élastique

On distingue trois catégories d'ondes acoustiques (figure 7).



Fig I.7: Catégorie d'onde acoustique

I-6-3 Caractéristique des ondes acoustiques :

Les ondes ultrasonores présentent toutes les propriétés générales des ondes élastiques. Elles n'ont pas de propriété qui leur soit propre. L'importance des ultrasons réside dans le fait que leur longueur d'onde est très petite et qui est souvent du même ordre de grandeur que les dimensions caractéristiques des milieux qu'ils parcourent (diamètre des grains, hétérogénéités, défauts éventuels), ce qui leur permet de traverser facilement les matériaux solides et les fluides (figure 7). [1], [2]

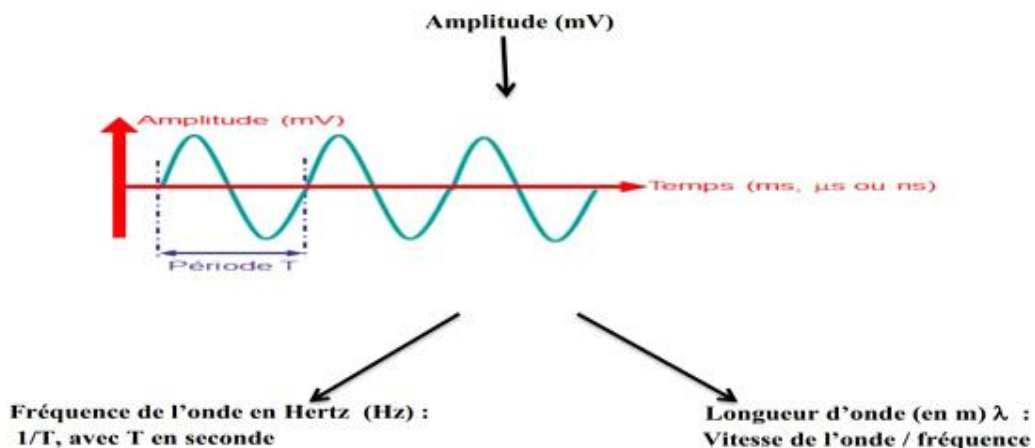


Fig I.8 : La longueur d'onde λ

I-6-4 Différents types d'ondes :

Trois types d'ondes mécaniques de propagation (également appelées ondes de contraintes) sont créés lorsque la surface d'un grand milieu élastique solide est perturbée par une charge dynamique ou vibratoire : Les ondes de compression (ondes longitudinales ou P), les ondes de cisaillement (ondes transversales ou S) et les ondes de surface (ondes de Rayleigh).

I-6-4-1 Les ondes longitudinales et transversales :

Les ondes longitudinale (compression P) et transversale (cisaillement S) sont les deux modes de la propagation les plus couramment employés dans l'essai ultrasonique. Ces ondes voyagent dans un solide illimité. Les figures 1.4 et 1.5 illustrent la propagation des ondes longitudinales et de cisaillement respectivement [Corapcioglu et al., 1996].

Une onde ultrasonore est longitudinale ou de compression lorsque la direction de vibration des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde.

La vitesse de l'onde de compression est donnée par ACI Commette 228 1989 comme suit :

$$V = \sqrt{\frac{KE}{\rho}}$$

Où

V : vitesse de l'onde de compression (Km/s)

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

E : module d'élasticité dynamique (GPa)

ρ : densité

μ : rapport dynamique de Poisson ou coefficient de Poisson

La valeur de μ varie dans une plage assez étroite. Les variations de E et ρ ont un effet plus significatif sur V que les variations de μ . Pour le béton, V varie généralement de [3000 - 5000 m/s]. [1], [2]

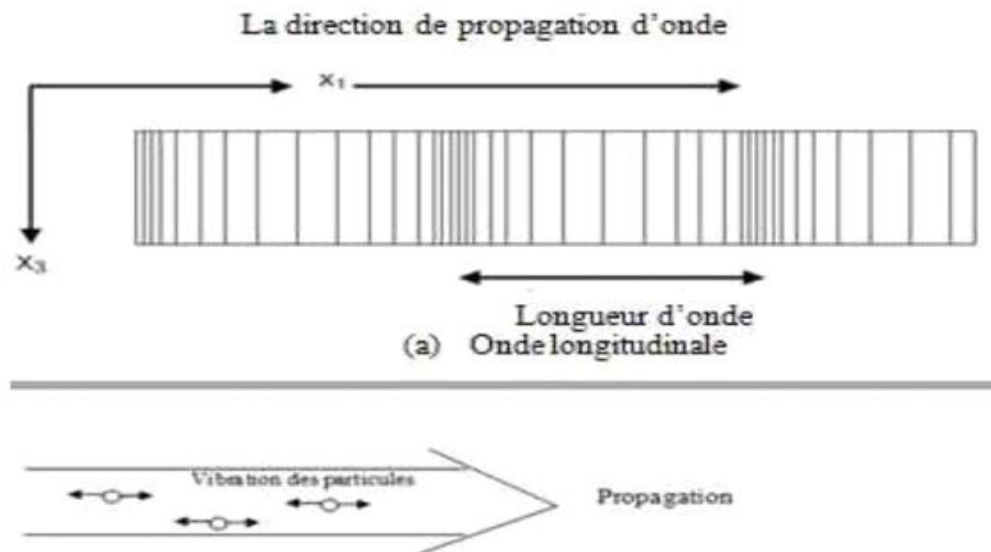


Fig I.9 : Onde longitudinale [Corapcioglu 1996]

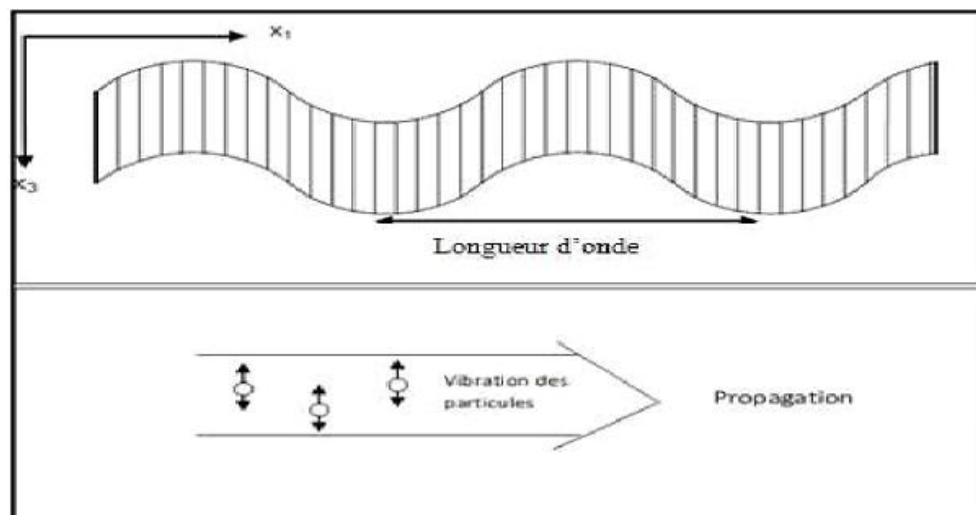


Fig I. 10 : Onde transversale [Corapcioglu 1996]

I-6-4-2 Les ondes de surface

Les ondes de Rayleigh sont des ondes de surface, elles se propagent à la surface des solides pour lesquels le mouvement des particules est elliptique (figure 1.8), c'est les ondes les plus utilisées.

La schématisation des ondes de surface la plus connue est la formation des rides à la surface d'une étendue d'eau, lorsqu'on jette un caillou. **[01]**



Fig I. 11 : Onde de Rayleigh

En cas de l'état de contrainte homogène, les ondes de Rayleigh sont non dispersives qui signifie que la vitesse de l'onde ne change pas avec le changement de la fréquence. Une onde de Rayleigh se propage dans la direction x_1 et atténue exponentiellement dans la direction x_3 . Le champ de déplacement pour une onde de Rayleigh peut être décrit par :

$$U_1 = U_1(x_1, t), U_2 = 0, U_3 = U_1(x_3, t)$$

La vitesse V_R de l'onde de Rayleigh est donnée en fonction de V_T et V_L par l'équation suivante :

$$\left(2 - \frac{V_R^2}{V_T^2}\right)^4 - 16 \left(1 - \frac{V_R^2}{V_L^2}\right) \left(1 - \frac{V_R^2}{V_T^2}\right) = 0$$

Plusieurs travaux ont été réalisés avec l'utilisation des ondes de Rayleigh dans le domaine de génie civil, pour étudier la peau (la porosité de l'enrobage) du béton par des mesures des vitesses ultrasonores des ondes de surface (Onde de Rayleigh). [1], [2], [5]

I-6-4-3 ondes de LAMB :

Lorsque le matériau contrôlé a une épaisseur faible- de l'ordre de quelque longueur d'onde- les ondes de surface se transforment en ondes de plaque ou ondes de LAMB et se propagent le long de la plaque en intéressant toute l'épaisseur de celle-ci. Il existe deux modes fondamentaux de vibration pour les ondes de Lamb : le mode symétrique et le mode antisymétrique (figure 12).

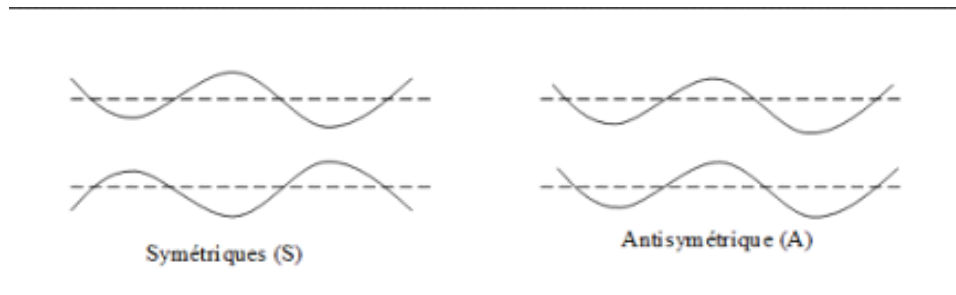


Fig I.12 : Ondes de Lamb

Les ondes de Lamb sont utilisées industriellement pour le contrôle des tôles minces métalliques et de certains composites. Le champ de déplacement pour une onde de Lamb peut être décrit par (Bedford et Drumheller, 1996) [3]. [4]

$$U_1 = U_1(x_1, x_3, t), U_2 = 0, U_3 = U_1(x_1, x_3, t)$$

I-6-4-4 Onde plane et onde sphérique:

On parle d'onde plane lorsque l'onde se propage suivant une direction unique et que les surfaces d'onde sont des plans parallèles entre eux (figure 13). Une onde plane est générée par une surface plane vibrante de dimension importante. L'amplitude d'une onde plane est constante quelle que soit la distance entre le point considéré et la source, à condition toutefois que les phénomènes d'atténuation puissent être négligés.

On parle d'onde sphérique lorsque l'onde se propage suivant toutes les directions de l'espace et que les surfaces d'ondes sont des sphères concentriques (figure 14).

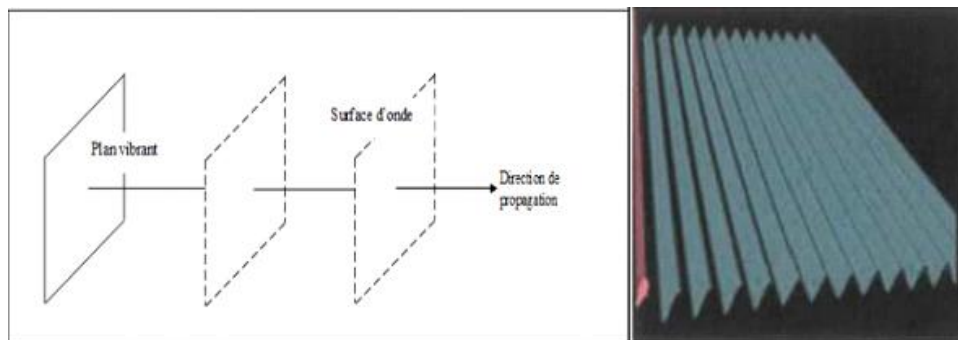


Fig I.13: Onde de plane

Une onde sphérique est générée par un point ou une sphère dont toute la surface vibre uniformément et l'amplitude de vibration décroît en fonction de la distance à la source.

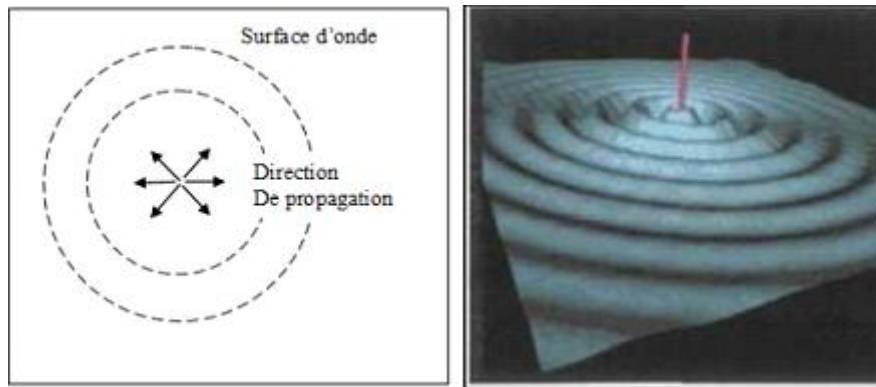


Fig I.14 : onde sphérique

I-6-5 La production des ultrasons :

Actuellement, trois types d'émetteurs sont utilisés pour générer des ultrasons, utilisant la transformation de l'énergie électrique transportée par des courants alternatifs de fréquence élevée en énergie mécanique (oscillations d'un système mécanique).

L'échographie est utilisée dans le domaine industriel pour mesurer la distance entre les objets, et dans le domaine médical, l'examen de l'estomac des mères, la connaissance du sexe du fœtus, la connaissance du rythme cardiaque et de sa santé, ainsi que les traitements qui peuvent être effectués. utilisé pour de nombreuses tumeurs cérébrales

I-6-6 Les propriétés des ultrasons :

La possibilité de produire des ultrasons de fréquence et de puissance toujours plus grande a permis de mettre en évidence des propriétés spécifiques aux ondes ultrasonores.

La technique de la vitesse d'impulsion d'ultrason (UPV) parmi les techniques de l'auscultation sonore est l'un des moyens qui permet de contrôler et d'évaluer cette évolution au cours du temps. Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Par ailleurs, en utilisant un instrument ultrasonore tel que «PunditLab», la détermination et l'estimation de la résistance est plus facile et très rapide par rapport à la méthode destructive. En outre, si on arrive à trouver une relation entre ces deux types de caractéristiques, on aurait gagné en temps et en matière lors de la conception ou du contrôle ou de l'entretien des structures. C'est cette technique qui sera utilisée dans notre travail expérimental.

Chapitre 01

I-6-7 Le Mode Opérateur : [NET 1]

I-6-7-1 Travaux préparatoires :

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

I-6-7-2 Points de mesures :

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

I-6-7-3 Distances minimales entre points de mesures :

On recommande une distance minimale de parcours de 400 mm pour les mesures en surface. [NET 1]

I-6-7-4 Étalonnage de l'appareil :

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

I-6-8 Manières de mesure :

La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières, suivant le type de l'élément à tester : [NET 1]

I-6-8-1 Mesure 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.

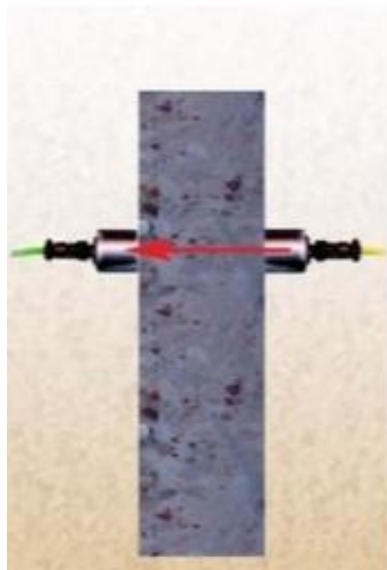


Fig I.15 : Mesures en transparence (directe)

I-6-8-2 Mesures en surface (indirecte) :

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur figure (15).

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

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

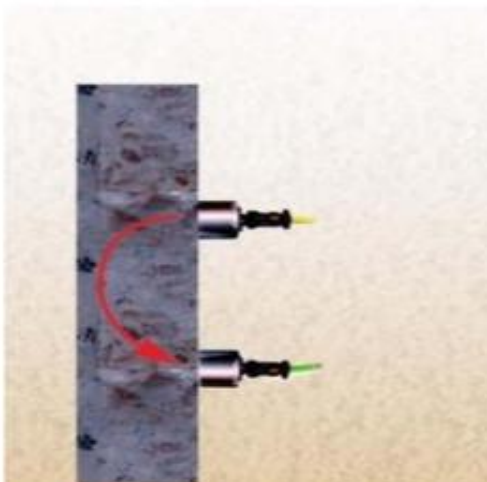


Fig .16: Mesures en surface

Chapitre 01

I-6-8-3 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 .figure (16)

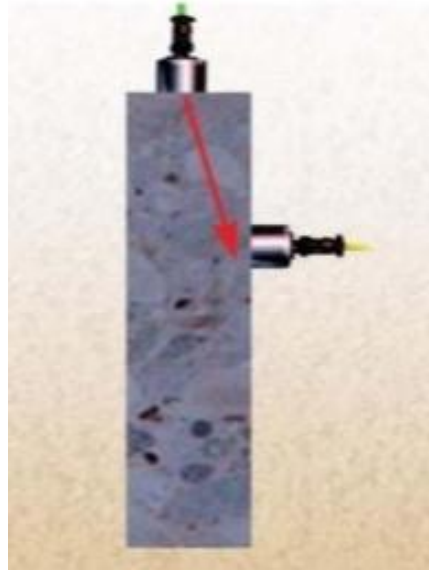


Fig I.17 : Mesures semi direct

I-6-9 Interprétation Des Résultats De Mesure Aux Ultrasons :

Dans un milieu homogène et isotrope, la vitesse des ondes longitudinales des ultrasons est reliée au module d'élasticité et à la masse volumique. Cette relation donne une base logique pour utiliser des mesures de vitesse des ondes pour estimer la résistance à la compression du béton. Mais il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique unique entre les deux paramètres compte tenu de l'influence des différents constituants entrant dans la composition du béton. Par conséquent une corrélation plus fiable entre la vitesse de propagation des ultrasons et la résistance du béton à la compression ne peut être établie que dans des limites strictes données ci -après.

Chapitre 01

I-6-10 Corrélation entre la vitesse de propagation du son et la résistance du béton:

La corrélation graphique entre de la vitesse de propagation V et la résistance à la compression R doit être établie au préalable pour un projet donné, sur la base du béton formulé pour ce chantier. Il est nécessaire dans ce cas d'effectuer les mesures sur au moins 30 éprouvettes en procédant comme suit :

- pour un lot de 03 éprouvettes, prendre une valeur moyenne de la vitesse de propagation et de la résistance à la compression obtenue et soumises à des conditions d'essai identique,
- faire varier la quantité d'eau de gâchage ou de la compacité du béton pour le reste des lots (E/C variant de 0.4 0 à 0.8 est généralement pris)

Il est bien entendu que toutes les autres caractéristiques du béton, doivent être identiques à celles du béton formulé et à mettre en oeuvre in situ.

I-6-11 Paramètres influents la vitesse des ultrasons:

La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton. Par ailleurs, la résistance du béton ne dépend pas nécessairement du dosage en gros granulats ou de leur module d'élasticité. Cependant pour un granulat donné et une composition donnée, la vitesse de propagation des ondes dépend des modifications de la pâte de ciment durci, telles qu'un changement du rapport Eau/Ciment qui influe le module d'élasticité de la pâte. De plus d'autres facteurs influencent la propagation des ondes sonores à savoir :

- Le type de ciment
- Le dosage en ciment
- La nature des granulats
- La granulométrie
- L'humidité du béton
- La maturité du béton
- Les adjuvants

Les résistances des autres bétons qui diffèrent du béton standard pour lequel une courbe de calibrage a été établie, doivent être corrigés en affectant la résistance du béton de référence par des coefficients partiels d'influence correspondants.

Exemple de tracés de courbes de calibrage

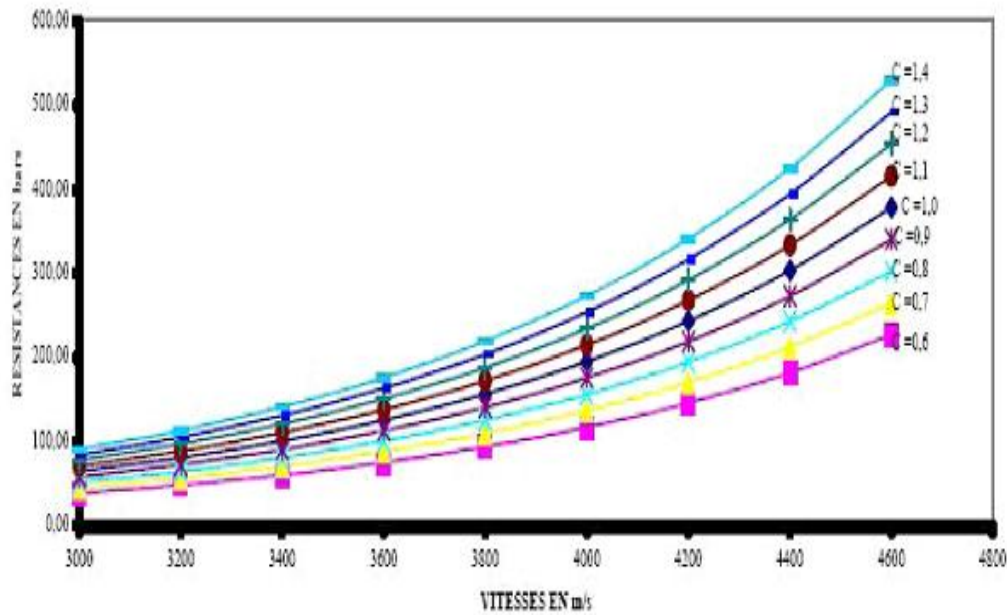


Fig I.18: Courbes de calibrages

Excepté le cas on l'on dispose de courbes de calibrage telles que rappelées ci avant, des cas peuvent se présenter tels que :

- Composition du béton connue, absence d'éprouvettes ou de carottes
- Composition du béton connue et existence d'un petit nombre d'éprouvettes ou de carottes,
- Méconnaissance de la composition du béton et existence d'éprouvettes ou de carottes,
- Méconnaissance de la composition du béton et inexistence d'éprouvettes et de carottes

La détermination de la résistance béton in situ sera étudiée au cas par cas

I-6-12 Autres interprétations possibles:

Les résultats obtenus en appliquant la courbe de la RILEM sont donnés dans le cas où le béton testé est considéré connue. Les résistances ne correspondent pas toujours à la résistance réelle du béton in situ. C'est pour cette raison que par exemple dans les procès verbaux du CNERIB, seuls les appréciations suivantes sont données :

Chapitre 01

- Classements qualitatifs :
- $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$ béton de **faible** résistance,
- $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$ béton de **moyenne** résistance,
- $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$ béton à **haute** résistance,
- $V \geq 4200 \text{ m/s}$ béton à **très haute** résistance.
- Estimation de la résistance du béton selon RILEM

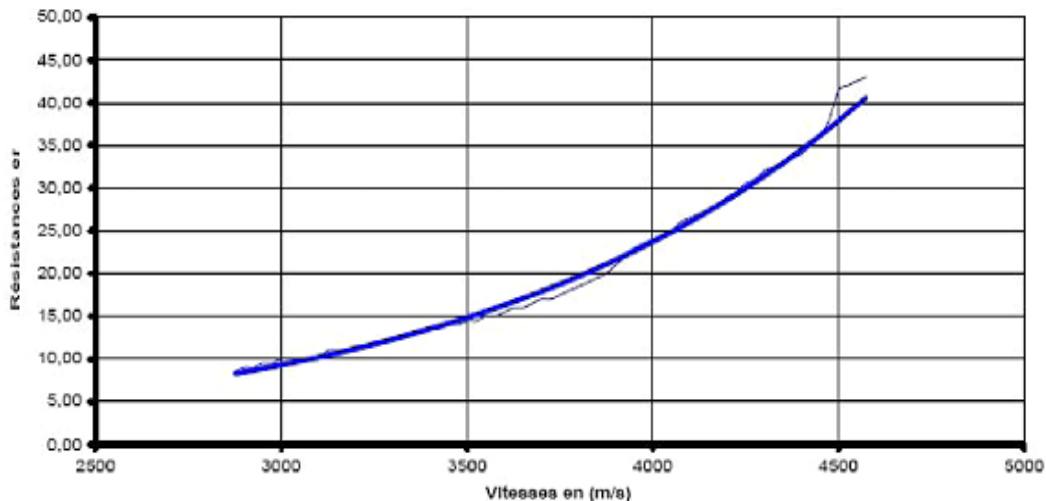


Fig I.19: Courbe RILEM

Références normatives : [NET 1]

Les normes P 18-414 de 1993, P 18-418 de 1989, ASTM C 597- 83 réapprouvée en 1991 et BS 1881 : partie 203 : 1986 spécifient les modes opératoires sans pour autant donner d'interprétation des résultats obtenus.

I-7 Conclusion:

Dans l'état actuel les habitudes d'évaluation de la qualité du béton dans les domaines de la construction, consistent à faire des essais destructifs à la compression ou la traction sur des éprouvettes (cubiques ou cylindriques) confectionnées lors de la réalisation de l'élément structural ou sur des carottes prises directement de la structure. On a aussi

Chapitre 01

recours à d'autres méthodes appelées essai non destructifs. Comme leur nom l'indique il s'agit de mesures n'endommageant pas les constructions par exemple le marteau de Schmidt et des méthodes ultrasoniques de vitesse d'impulsion et d'autres qui n'ont pas été décrites dans notre mémoire :

Comme Essai de résistance à la pénétration, Essai d'arrachement , Essai de la fréquence de résonance, Essai pour la mesure de l'adhérence, et méthodes électriques ...etc.

Ainsi il y a un besoin énorme des outils efficaces de méthodes END d'évaluer les éléments en béton dans les structures. On le prévoit souvent dans ce point de technologie qu'un ingénieur devrait pouvoir faire quelques mesures sur le terrain rapides et pouvoir diagnostiquer l'état de la structure. Ceci peut être une réalité dans un proche avenir.

Dans notre étude on a basé sur le essai non destructifs le plus largement répandus; essai de vitesse ultrason.

Le principe de cette méthode consiste à déterminer la résistance en compression du béton à partir des abaques donnant la variation de la résistance du béton en fonction de la vitesse des ultrasons et de l'indice de rebondissement $[R (V, N)]$. Cette résistance est corrigée par des valeurs des coefficients d'influences des différents constituants et de leur nature. Ou bien à partir des formules d'estimation d'après les résultats des essais au laboratoires.

Cette technique est utilisée pour la détermination de la résistance en compression en tenant compte à la fois vitesse de propagation de son et l'indice de rebondissement.

Le principe reste identique et on a recours à un béton standard qui possède une courbe d'étalonnage spécifique.

CHAPITRE 2 :

Etude expérimentale

Chapitre 02

II-1 les essai :

II-1-1 Analyse granulométrique: [NF EN 933-1]

Définition : La granulométrie c'est la science qui s'intéresse à l'étude de la distribution dimensionnelle du granulat. En d'autre terme elle permet de déterminer les dimensions des grains en fraction élémentaire. L'analyse granulométrique a pour objet :

- Déterminer les dimensions des granulats d'une classe granulaire.
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% Pondéral).

Principe de l'essai : L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par tamisage sur une colonne des tamis Matériel utilisé :

- Une série des tamis : **0.08 - 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5 mm.**
- Tamiseuse électrique - Une balance de précision

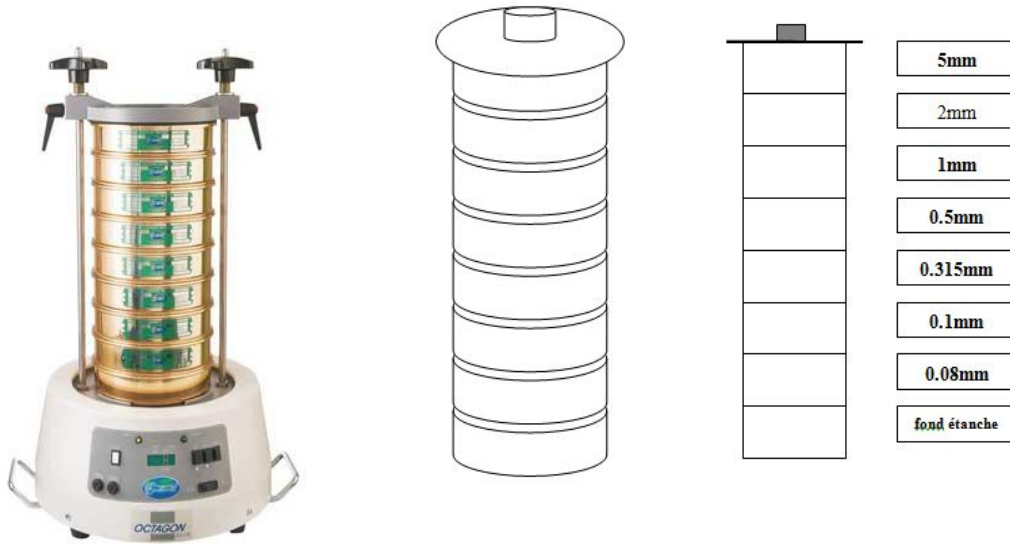


Fig II.1 : appareil de tamisage / tamis .

Chapitre 02

Résultale :

Sable :

Le sable utilisé dans notre production de béton est: deSable naturel concassé (sable de chaux)
d'une taille de grains de 0/3 mm provenant de la carrière de silo touta et sable djamaa

ouverture des tamis (mm)	refus partiel	Retenu cumulés	pourcentage refus (%)	pourcentage Passant(%)
5	0	0	0.0	100.0
2	47.21	47.21	9.4	90.6
1	166.86	214.07	42.8	57.2
0.5	80	294.07	58.8	41.2
0.125	112.64	406.71	81.3	18.7
0.08	19.5	426.21	85.2	14.8

Tab II.1 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF P 18-554 / Sable touta Échantillon
de masse: 1000 g

ouverture des tamis (mm)	refus partiel	Retenu cumulés	pourcentage refus (%)	pourcentage Passant(%)
5	0	0	0	100
2.5	18.2	18.2	1.82	98.12
1.25	60.2	78.4	7.84	92.16
0.63	205.3	283.7	28.37	71.63
0.315	470.6	754.3	75.43	24.57
0.16	224	978.3	97.83	2.17
0.08	4.2	982.5	98.25	1.75

Tab II.2 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF P 18-554 / Sable djamaa
Échantillon de masse: 1000 g

Chapitre 02

Gravier en provenance de Ain- touta :

Le gravier utilisé dans notre production de béton est: Gravier de carrière Granules Touta (3/8- 8/15 -15/25) .

ouverture des tamis (mm)	refus partiel	Retenu cumulés	pourcentage refus (%)	pourcentage Passant(%)
10	5	5	0.3	99.7
8	8	13	0.9	99.1
6.3	240	253	16.9	83.1
5	470	723	48.2	51.8
4	305	1028	68.5	31.5
2	432	1460	97.3	2.7
1	28	1488	99.2	0.8
0.5	10	1498	99.9	0.1

Tab II.3 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF P 18-554 / gravier (3/8) touta
Échantillon de masse: 1500 g

ouverture des tamis (mm)	refus partiel	Retenu cumulés	pourcentage refus (%)	pourcentage Passant(%)
20	0	0	0.0	100.0
16	251	251	16.7	83.3
12.5	420	671	44.7	55.3
10	382	1053	70.2	29.8
8	325	1378	91.9	8.1
6.3	114	1492	99.5	0.5
5	4	1496	99.7	0.3
4	0	1496	99.7	0.3

Chapitre 02

Tab II.4 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF P 18-554 / gravier (8/15)
toute Échantillon de masse: 1500 g

ouverture des tamis (mm)	refus partiel	Retenu cumulés	pourcentage refus (%)	pourcentage Passant(%)
25	0	0	0.0	100.0
20	660	660	44.0	56.0
16	690	1350	90.0	10.00
12.5	130	1480	98.7	1.13
10	18	1498	99.9	0.13

Tab II.5 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF P 18-554 / gravier
(15/25) toute Échantillon de masse: 1500 g

II-1-2 Module de finesse (Mf) : [NFP 18-540]

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un sable. Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en **pourcentages** sur les tamis **0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5mm**.

$Mf = 1/100$ Refus cumulés en % des tamis [0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5]

Classement du sable selon la valeur de Mf : [DRE et FEI ,2002]

- De 1,8 à 2.2 : Sable peu fin
- De 2.2 à 2.8 : Sable préférentiel
- De 2.8 à 3.2 : Sable peu grossier

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse Mf compris entre 2,2 et 2,8; audessous, le sable a une majorité d'éléments fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fillers et le béton y perd en ouvrabilité.

Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables destiné à utilisation en bétons [BEL 14]

Chapitre 02

résultats :

- Module de finesse sable djamaa 2.23
- Module de finesse sable concasse tout 2.14

II-1-3 Équivalent de sable : [NF P18 -598]

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

But de l'essai :

L'essai a pour but d'évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans un échantillon du sable.

Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

Mode opératoire :

- La solution lavante a été versée dans l'éprouvette, jusqu'au trait repère inférieur.
- Verser soigneusement, une masse sèche de $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ de matériau.
- Laisser reposer dix minutes
- Faire subir à l'éprouvette 90 cycles ± 1 cycle en $30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$. (à l'aide de l'agitateur) - Rincer et compléter l'opération jusqu'à atteindre le trait repère supérieur,
- Laisser reposer pendant $20 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$.
- Au bout de ces 20 min, mesurer à l'aide du réglet la hauteur h_1
- Mesurer également la hauteur h_2 du niveau supérieur de la partie sédimentée.
- Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette.
- Lire la hauteur du sédiment h_2 au niveau de la face supérieure du manchon.

Chapitre 02

$$ES_v \% = \frac{h_1}{h_2} \times 100, \quad ES \% = \frac{h_1}{h'_2} \times 100$$

ES: équivalent de sable mesuré au piston

ES_v : équivalent de sable mesuré visuellement

h₁ : hauteur du sable propre seulement

h₁ : hauteur du sable propre seulement au piston

h'₂ : hauteur du sable propre et élément fins

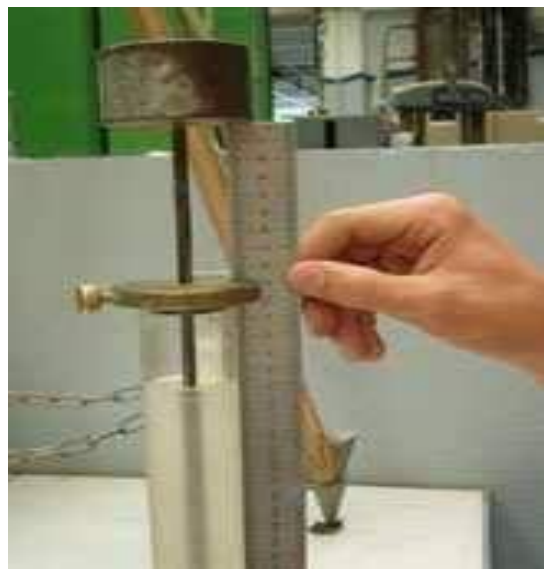
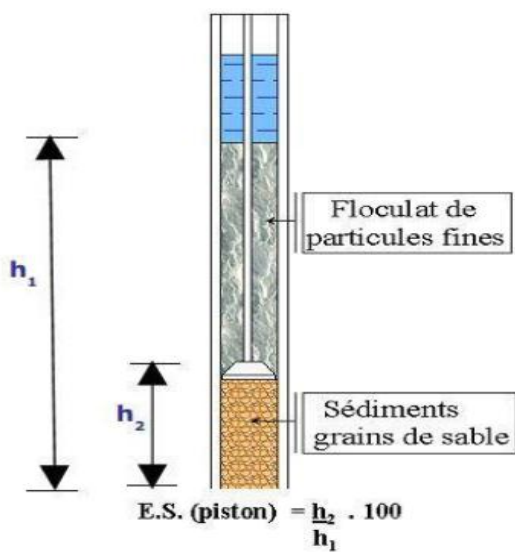
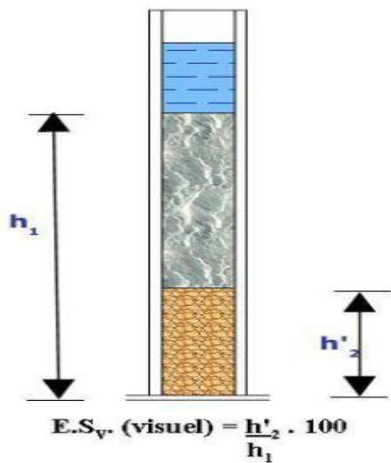


Fig II.2 : essai d'équivalent du sable .

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un essai au bleu de Méthylène.
65% ≤ ES < 75%	60% ≤ ES < 70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
75% ≤ ES < 85%	70% ≤ ES < 80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES ≥ 85%	70% ≤ ES < 80%	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

Tab II.6 : Nature et qualité du sable en fonction de l'ES [DAD 19] .

résultats :

- Équivalent de sable concasse = 66.23 %
- Équivalent de sable djamaa = 70.82 %

II-1-4-1 Masse volumique apparente : [NF P 18-554]

La masse volumique apparente est la masse du granulat occupant l'unité de volume, tous vides inclus. On la détermine en calculant le quotient.



Chapitre 02

Fig II.3 : Mesure de la masse volumique du sable jaune (DJAMAA).

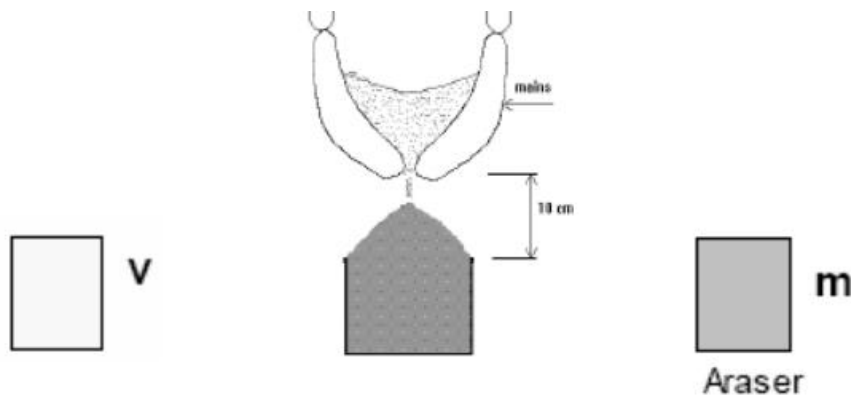


Fig II.4 : eassi Masse volumique apparente .

résultats : La masse volumique apparente est donnée par la simple formule :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V}$$

Avec :

- **ρ_{app}** : La masse volumique apparente (g/cm³)
- **M** : La masse du sable contenu dans le récipient (g)
- **V** : Le volume du récipient utilisé dans l'essai (cm³)

- sable djamaa **1.61 g/cm³**
- sable concasse touta **1.63 g/cm³**
- gravier touta 3/8 **1.73 g/cm³**
- gravier touta 8/15 **1.70 g/cm³**
- graviier touta 15/25 **1.75 g/cm³**

II-1-4-2 Masse volumique absolue : [NF P 18-555]

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides prouvent exister dans ou entre les grains. Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons.

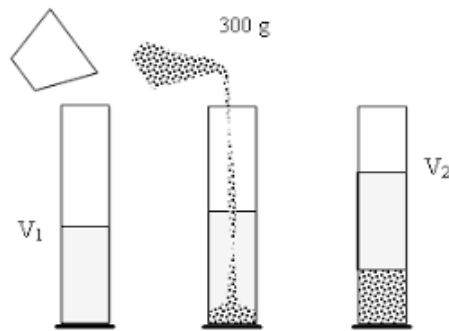


Fig II.5 : essai Masse volumique absolue .

résultats :

- Masse de l'eau déplacé correspond au volume du corps : $\underline{M_E = M_1 + M_2 - M_3}$

- Volume de l'eau déplacé :

$$V_E = \frac{M_E}{\rho_E} \quad (\rho_E : \text{Masse spécifique de l'eau}).$$

- La masse volumique absolue est donnée par la formule :

$$\rho_{abs} = \frac{M_2}{V_E}$$

- sable djamaa **2.62 g/cm³**
- sable concasse toutta **2.62 g/cm³**
- gravier toutta 3/8 **2.63 g/cm³**
- gravier toutta 8/15 **2.64 g/cm³**
- graviier toutta 15/25 **2.65 g/cm³**

II-1-5 Coefficient d'absorption d'eau : [NT 21-04-1984 , NF 18-554-1990]

On appelle coefficient d'absorption d'eau d'un échantillon de matériau le volume des vides contenus dans l'unité de volume de cet échantillon.

$$A_b = \frac{V_{\text{vides}}}{V_{\text{éch}}}$$

Chapitre 02

but de l'essai :

Déterminer le coefficient d'absorption d'eau d'un matériau à partir de différentes pesées.

Principe de l'essai :

L'essai consiste à peser le matériau sec, remplir les vides avec de l'eau et le peser imbibé d'eau.

Mode opératoire :

- Sécher l'échantillon à l'étuve à 105 °c pendant 24 heures.
- Prélever un échantillon de matériau sec et le peser : soit M0
- Placer l'échantillon dans l'eau et porter à l'ébullition.
- Maintenir l'ébullition pendant 2 heures pour chasser l'air des pores.
- Laisser refroidir dans l'eau pour que celle-ci rentre dans les vides.
- Retirer de l'eau et essuyer chaque grain.
- Peser à nouveau l'échantillon : soit M1

résultats :

	Échantillon de masse 1500 g	24 heures dans l'eau	écher l'échantillon à l'étuve à 105 ° c
Sable Djamaa	1500g	1745	1649
Sable concasse tout	1500g	1708	1631
Gravier tout 0/3	1500g	1616	1583
Gravier tout 8/15	1500g	1548	1520
Gravier tout 15/25	1500g	1544	1512

Tab II.7 : résultats Coefficient d'absorption d'eau .

Chapitre 02

II-1-6 Coefficient d'aplatissement [NF P 18-561] :

but de l'essai :

Les granulats plats ne permettent pas de réaliser des bétons très compacts, et en technique routière, ils ne peuvent être utilisés car ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes.

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques :

- La longueur L , distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités des granulats,
- L'épaisseur E , distance minimale de deux plans parallèles tangents aux extrémités des granulats,
- La grosseur G , dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat.

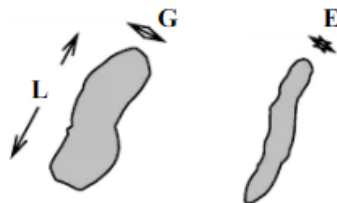


Fig II.6 : forme d'un granulat .

Mode opératoire :

- Le tamisage classique sur une colonne de tamis normalisés à mailles carrées afin de séparer les granulats en une succession de classes granulaires d/D dont les dimensions sont telles que $D = 1.25 d$.
- Les différentes classes granulaires d/D ainsi isolées sont tamisées une à une sur des grilles à fentes parallèles d'écartement $E = d / 1.58$.
- On peut donc associer à chaque classe granulaire d/D un tamis à fente correspondant de largeur E , ce qui permet de définir des coefficients d'aplatissement A_i partiels. Ensuite, on détermine un coefficient d'aplatissement global A .

Chapitre 02

Équipements :

- 1 - Une série de tamis normalisés à mailles carrées
- 2 - Une série de tamis à fentes de largeurs normalisées



Fig II.7: Appareillage Coefficient d'aplatissement .

Classe granulaire d/D (mm) .	31.5 /40	25/ 31.5	20/ 25	16/20	12.5/ 16	10/12.5	8/10	6.3/ 8	5/6. 3	4/5
Écartement E des grilles à fentes (mm)	20	16	12.5	10	8	6.3	5	4	3.15	2.5

Tab II.8 : Correspondance entre classes granulaires et largeurs des grilles à fentes

résultats :

- gravier toute 3/8 16.82 %
- gravier toute 8/15 13.74 %
- graviier toute 15/25 11.25 %

Chapitre 02

II-1-7 Essai Micro Deval [NF P 18-572] :

But de l'essai:

L'essai Micro Deval permet de mesurer la résistance à l'usure des roches. Cette résistance à l'usure pour certaines roches n'est pas la même à sec ou en présence d'eau.

Appareillage:

- Un jeu de tamis de 1,6 – 4 – 6,3 – 10 et 14 mm, le diamètre des mouture ne devant pas être inférieur à 200 mm
- Matériel pour effectuer l'échantillonnage du matériau et une analyse granulométrique par tamisage
- L'appareil Micro – Deva
- La charge abscisse (constituée des billes sphériques de $(10 \pm 0,5)$ mm de diamètre en acier INOX Z30 C13 ($\varnothing = 9,5$ mm))
- Un dispositif doit permettre d'arrêter automatiquement le moteur après **deux heures** d'essai correspondant à **12 000 rotations**
- Des bacs.

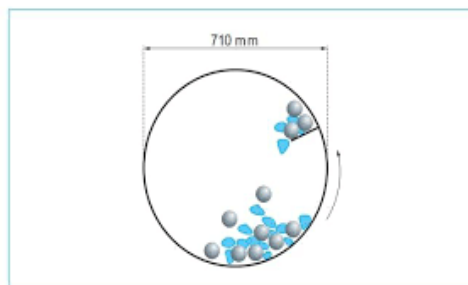


fig II.8: Appareillage- Micro Deval.

Mode opératoire :

- La masse de l'échantillon envoyée au laboratoire sera de 2000g

N.B : La granularité du matériau (de l'échantillon) est choisi parmi les trois classes granulaires 4 / 6,3 – 6,3 / 10 – 10 / 14

- Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à obtention de la masse constante

Chapitre 02

- Tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie.
- Pour commencer l'essai, préciser 200 g de l'échantillon
- La charge à utiliser sera fonction de la classe granulaire

Classe granulaire (mm), Charge abrasive (g)

- 4 / 6,3, 2000 ± 5
- 6,3 / 10, 4000 ± 5
- 10 / 14, 5000 ± 5

Classes granulaires (mm)	Poids échantillon (g)	Poids de la charge (g)
4 – 6.3	500 ± 2	2000 ± 5
6.3 – 10	500 ± 2	4000 ± 5
10 - 14	500 ± 2	5000 ± 5

Tab II.9 : Classe granulaires, poids d'échantillons et boulets équivalent .

- Pour effectuer un essai en présence d'eau, on ajoutera 2,5 l replacer le couvercle
- Mettre les cylindres en rotation à une vitesse de (100 ± 5) trs / mn pendant 2h ou 12 000 tours
- Après essai, recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac en prenant soin d'éviter les pertes de granulat
- Laver soigneusement à la pissette l'intérieur du cylindre en recueillant l'eau et les parties minérales entraînées.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm ; le charge abrasive sera retenue sur un tamis de 8 mm
- Laver l'ensemble sans un jet d'eau et retirer la charge abrasive (à l'aide d'un aimant par exemple). Procéder en plusieurs fois pour faciliter l'opération
- Sécher le refus à 1,6 mm à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante
- Peser ce refus au gramme près, soit m' le résultat de la pesée

Calculs :

Le coefficient Micro-Deval est par définition égal au rapport :

$$\underline{m = M - m'}$$

$$\underline{\text{Cmd} = 100 \times m / M}$$

Chapitre 02

- M : masse de l'échantillon 500 ou 10.000 g selon la classe choisie,
- m : masse du tamisat au tamis de 1,6 mm Le résultat sera arrondi à l'unité.
- Le coefficient mesure le % d'usure, plus il est petit et plus la résistance à l'usure est grande.

résultats :

Échantillon de masse :500 g

- gravier tout 3/8 20.20 %
- gravier tout 8/15 20.80 %
- gravier tout 15/25 23.07 %

II-1-8 Essai Los Angeles [N.F. P18.573] :

But de l'essai

L'essai Los Angeles permet de déterminer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats

Appareillage :

- Un jeu de tamis de dimension convenable, leur diamètre ne devra pas être inférieur à 250 mm
- Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau et une analyse granulométrique par tamisage
- Une machine Los Angeles comprenant
- Des charges de boulets (constituées de boules sphériques pesant entre 420 et 445 g en acier Z 30C ($\varnothing = 47 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$))
- Un moteur d'au moins 0,75kw assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière comprise entre 30 et 33 tours / mm
- Un bac destiné à recueillir les matériaux après essai
- Un compte tour de type relatif arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulus.



Fig II.9 : Appareillage los Angeles .

Mode opératoire :

- La quantité envoyée au laboratoire sera au moins égale à 15000g
- Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie en commençant par le tamis le plus grand
- Laver le matériau tamisé et le sécher à 105°C jusqu'à l'obtention de la masse constante.
- La charge utilisée sera fonction de la classe granulaire

Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets
4 / 6,3	7
6,3 / 10	9
10 / 14	11
10 / 25	11
16 / 31,5	12
25 / 50	12

Tab II.10 : Classification par le norme [N.F. P18.573].

- Replacer le couvercle
- Faire effectuer à la machine 500 rotations sauf pour la classe 25 / 50 où l'on effectue 1000 rotations à une machine régulière comprise entre 30 et 33 tours / mm

Chapitre 02

- Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au dessus de ce bac sur le tamis de 1,6 mm, le matériau étant pris plusieurs fois afin de faciliter l'opération
- Laver le refus au tamis de 1,6 mm. Egoutter et sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constant
- Peser le refus une fois séché. Soit m' le résultat de la pesée

Calculs :

Le coefficient Los-Angeles (LA) :

$$LA = m * 100M$$

avec m masse du refus à 1.6 mm. M masse initial Plus le pourcentage Los Angeles (noté LA) est bas, plus l'échantillon est résistant à la fragmentation.

résultats :

- gravier tout 3/8 **16.62 %**
- gravier tout 8/15 **16.12 %**
- gravier tout 15/25 **15.32 %**

II-1-9 Propreté superficielle de gravier :

Définition et But de l'essai :

A l'instar de ce qui se pratique pour les sables, les graviers doivent être propres avant leur utilisation dans la fabrication des bétons.



Fig II.10 : gravier tout .

Chapitre 02

Principe:

Contrairement aux sables, les graviers présentant des classes granulaires relativement grossières. Ainsi, le principe de séparation des agrégats des éléments fins ne se fera pas par sédimentation mais par lavage.

Matériel utilisé :

Tamis de maille 0.5 mm et un sceau d'eau.

Mode opératoire:

- Peser un kg de gravier soit M_0 et le placer dans le tamis,
- Laver l'échantillon jusqu'à ce que l'eau qui traverse le tamis soit claire, Matériel utilisé. Tamis de maille 0.5 mm et un sceau d'eau.
- Essuyer l'excès en eau à l'aide d'un chiffon et peser la nouvelle masse, soit M_1 ,
- Calculer la propreté :

$$P(\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_0} * 100$$

Le gravier est propre si P (quantité d'éléments fins) $\leq 5\%$.

résultats :

Échantillon de masse : 1500 g

- gravier toute 3/8 **0.87 %**
- gravier toute 8/15 **0.73 %**
- gravier toute 15/25 **0.60 %**

II-2 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage : d'après la norme **NF EN 1008**, il joue deux fonctions principales: Confère au béton sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement. Dans la catégorie des eaux susceptibles de convenir à la confection de béton, on trouve :

- Les eaux potables (qui, bien évidemment, conviennent).

Chapitre 02

- Les eaux de recyclage provenant du rinçage des bétonniers ou des camions malaxeurs à condition de vérifier aptitude dans le cas de changement de ciment ou adjuvant d'une gâche à l'Aure, sont utilisables. Lorsque ces eaux comportent des éléments fins provenant, des matériaux entrant dans la confection des bétons (ciments, fines des sables...), il est possible de les utiliser après passage dans des bassins de décantation .
- Les eaux de pluie et ruissellement, les eaux pompées, tant qu'elles restent conformes aux prescriptions de la norme conviennent également. A côté, les catégories d'eaux .

devant pas être utilisées comprennent :

- Les eaux usées ; les eaux vannes ou contenant des détergents
- Les eaux industrielles susceptibles de contenir des rejets organiques ou chimiques

Ces différentes eaux doivent obligatoirement subir des analyses concluant à leur nocivité avant l'emploi.

Eaux usées:

Eau incorporée au mélange liant et granulats afin d'enclencher sa prise et de conférer au béton sa plasticité, donc son ouvrabilité. La qualité de l'eau de gâchage doit répondre à la norme NF EN 1008. L'eau utilisée pour le gâchage du notre béton est de l'eau potable

II-3 ciment utilisé :



fig II.11 : La qualité du ciment utilisé .

- **CEM II/A-L 42.5R** Ciment portland aux ajouts recommandés pour bétons à performances élevées avec une prise Rapide, destiné à la réalisation des infrastructures, construction dans le bâtiment, le génie civil, ainsi pour le domaine de préfabrication.
- **CEM II/A-L 42.5R :** Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013)

Chapitre 02

domaine d' application :

Un ciment pour tous vos travaux de constructions, nécessitant une résistance initiale élevée, il est aussi recommandé pour les utilisations suivantes :

- Les grands ouvrages, construction et bétons armés ou non.
- Béton projeté, pompé et béton pour étanchéité.
- Article en béton et préfabrication industrielle.
- Bétonnage par temps froid ou chaud.
- Voiles en béton.

formulation conseillée :

	ciment 	Sable (sec) 0/5 	Gravillons (sec) 8/15mm 15/25mm 	Eau (litres) 
Dosage pour béton	50k X1 	+ X7 	+ X5  + X4 	+ 25 L
	ciment 	Sable Correcteur 0/1mm 	Sable (sec) 0/4mm 	Eau (litres) 
Mortier de briquetage	50k X1 	+ X6 	+ X9 	+ 35 L
Mortier de finitions	50k X1 	+ X9 	+ X6 	+ 35 L

Remarque: un bidon = 10 litres .

Chapitre 02

caractéristiques techniques :

Analyses chimiques (%)	valeur
Perte au feu	6 – 8
Teneur en sulfates (SO ₃)	2.5 – 2.9
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	< 3.5
Teneur en Chlorures (Cl ⁻)	< 0.08
Résidu insoluble	NA
Composition Potentielle du Clinker (%) (Selon Bogue)	valeur
C ₃ S	60 – 65
C ₃ A	6 – 10
Propriétés physiques	valeur
Consistance normale (%)	25.4 – 26
Expansion à chaud (mm)	< 1 mm
Temps de prise (min)	valeur
Début de prise	150 min
Fin de prise	260 min
Résistance à la compression	valeur
2 jours (MPa)	23 – 26
28 jours (MPa)	45 – 50

II-4 Formulations du béton :

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

La formulation d'un béton se résume alors en quatre étapes majeures :

- Détermination de la dimension maximale des granulats
- Détermination de la courbe granulométrique optimale des granulats -Détermination du dosage en eau et air, en fonction de l'objectif d'ouvrabilité
- Détermination du dosage optimaux en fines, qui sera en fractionner en ciment et addition, en fonction des objectifs de résistances, et en respectant les prescriptions relatives à la durabilité.

Chapitre 02

II-4-1-1 Les différentes méthodes de composition des bétons :

- Méthodes de BOLOMy
- Méthodes de FAURY
- Méthodes de VALETTE
- Méthodes de JOISELE
- **Méthode de Dreux-Gorisse**

II-4-1-2 Méthode de Dreux-Gorisse :

C'est la méthode de fabrication qu'on a utilisée dans notre étude, Cette méthode est la plus utilisée actuellement. Nous rappelons que cette méthode a pour seul but de permettre de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition a peu près adaptée au béton étudié (précontraint), mais que seules quelques gâchis d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés.

- **Résistance souhaitée :**

En général, on demandera une résistance f_{c28} en compression à 28 jours et compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique, il faudra viser une résistance moyenne à 28 jours

- **Hypothèses de travail :**

- ❖ Caractéristique du béton :

Résistance moyenne a28 jours du béton f_c :25mpa

Affaissement au cone d AbramsA:8cm

- ❖ Caractéristique du ciment :

Classe des granulats.....courante

Diamètre du plus gros granulatd:20mm

Coefficient granulaire.....g:0.5

- ❖ Résistance visée :

Chapitre 02

Par sécurité, la résistance visée, représente une majoration de 15% de la résistance désirée.

Ainsi, la résistance visée

$$\sigma'_{28j} = \sigma_{28j} + 0.15 \sigma_{28j} / \text{Soit } \sigma'_{28j} = 1.15 \sigma_{28j}$$

- Dosage en ciment et en eau
- $f_{c'} = G \cdot f_{CE} (C/E - 0.5)$
- avec : $f_{c'} = \sigma'_{28j}$ résistance visée à 28 jours
- f_{CE} : classe vraie de ciment en MPa.
- G : coefficient granulaire
- C : dosage en ciment (Kg /m³ de béton)
- E : dosage en eau (Kg d'eau/m³ de béton ou litre d'eau/m³ de béton).
- par la suite d'après le rapport C/E on détermine le volume d'eau comme suit : $E = \text{le rapport } (C/E) \times \text{dosage de ciment}$

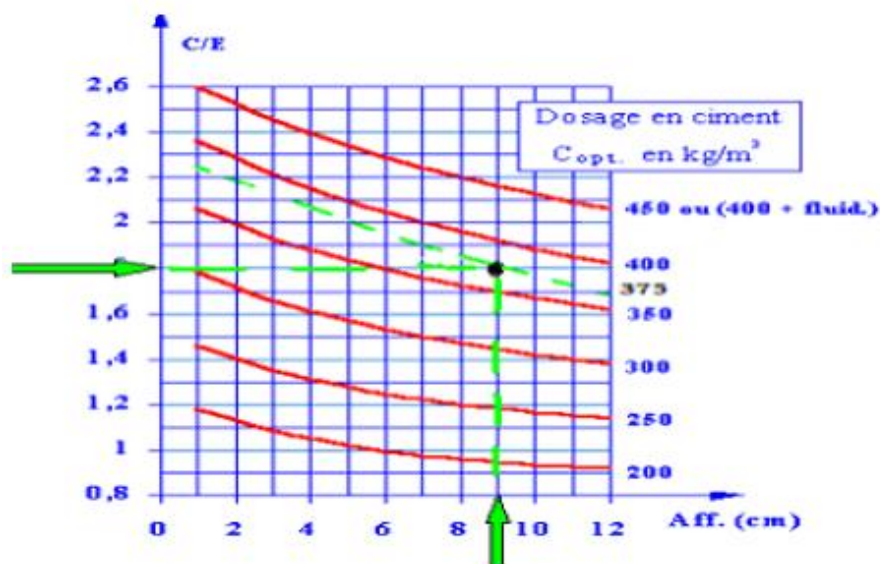


fig II.12 : dosage approximatif en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée .

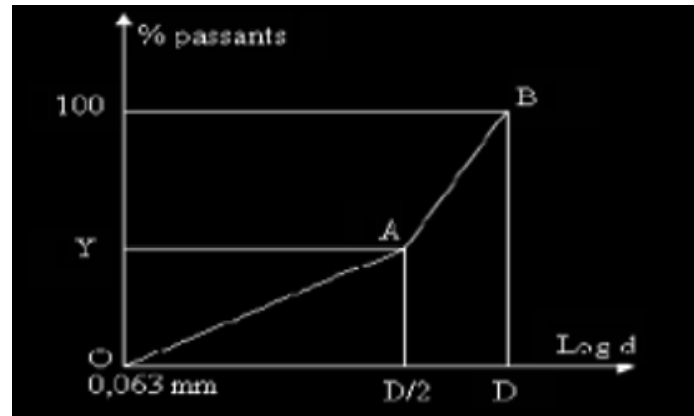


fig II.13 : Le Traçage de la courbe granulaire de référence AOB .

- Sur le graphe d'analyse granulométrique, type AFNOR (pourcentage de tamisât en fonction du module ou diamètre de tamis) nous traçons une composition granulaire de référence OAB avec:
- le point O est repéré par ses coordonnées
- le point B est repéré par ses coordonnées: $[D; 100]$, (D: le diamètre du plus gros granulat).
- Le point de brisure A aux coordonnées $[D/2; Y]$, suivantes:
 - en abscisse
 - si $D \leq 20$ mm, le point de brisure a pour abscisse: $A = D/2$
 - en ordonnée : $Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$

D : diamètre du plus gros granulat

K : un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés

K_s : c'est un correcteur qui tiendra compte de la finesse de sable = $6 \times M_f - 15$ (M_f : module de finesse)

K_p : c'est un correcteur qui tiendra compte en cas le béton sera pompé

- **La ligne de partage :**

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe granulaire du plus petit granulat au point d'ordonnée 5%, de la courbe granulaire du plus gros granulat. Le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et gravier. Ces proportions sont lues

Chapitre 02

sur le pourcentage de tamisât correspondant à ce point d'intersection. Ce pourcentage indique la proportion de sable, le complément donne la proportion de gravier. - Après le traçage de la courbe on obtient les pourcentages des granulats (sable et gravier).

- **Détermination de la composition en volume absolu :**

Le dosage en béton est déterminé pour obtenir un mètre cube de béton en place cela signifie que le volume de matière vaut 1m^3

- $V_{\text{abs}} = V_s + V_g + V_c = 1\text{m}^3$
- V_{abs} : la masse absolue de ciment kg/m^3

V_s, V_g et V_c : le volume de sable, gravier et ciment respectivement d'un mètre cube du béton

- $V_c = C / V_{\text{abs}}$ soit,

C : dosage en ciment (kg/m^3)

Volume absolu de granulats

- De la relation de $V = (V_c + V_g + V_s)$ on en déduit V_g et V_s

en remplaçant le volume de granulats $V_s + V_g$ par la valeur V_g

- **alors** $V = (V_c + V_g)$
- $V = 1000 \times \gamma$ (en litre)
- $V_g = (1000 \times \gamma) - V_c$.

V_g : volume absolu des granulats en litre ($V_g = V_g + V_s$)

γ : Coefficient de compacité

Volume de sable = Le pourcentage $\times V$

- Détermination de la composition pondérale sèche en Kg

Masse de ciment : le dosage choisi

La quantité d'eau : E par la formule

Masse de sable $S = V_s \times M_v \text{ abs}$

Masse de gravier

$G_{0/3} = V_g \times M_v \text{ abs}$

Chapitre 02

$$G_{3/8} = V_G \times M_v \text{ abs}$$

$$G_{8/15} = V_G \times M_v \text{ abs}$$

$$G_{15/25} = V_G \times M_v \text{ abs}$$

Finalement on trouve les quantités des masses de gravier, sable et eau et dosage de ciment pour un mètre cube de béton.

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins $D \leq 16 \text{ mm}$	Moyens $(25 \leq D \leq 40 \text{ mm})$	Gros $(D \geq 63 \text{ mm})$
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne , courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Tab II.11: détermination de G (coefficient granulaire) .

II-4-2 Formule n°01 (sable 0/3 + gravier 3/8) :

Pour $C = 350 \text{ kg/m}^3$

DOSAGE EN EAU :

En appliquant la formule suivante :

- $28 = G \times \sqrt{C} / (C/E - 0,5)$ avec $G=0,5$ d'où :
- 28 = résistance moyenne du béton à 28 jours
- G = coefficient granulaire tableau 01
- C = résistance moyenne du ciment par m^3 de béton.
- C = masse de ciment par m^3 de béton.
- E = masse d'eau par m^3 de béton.
- Résistance à 28 jour f_{c28} en bar = 220 bar.
- Classe vraie à 28 jour $\sigma_{28} = 350 \text{ bar}$.
- M_v = réelle en $\text{g/cm}^3 = 3.1$.

Résistance moyenne à 28 jour : calcul de $f_{cm} = f_{c28} \times 1.15 = 220 \times 1.15 = 253 \text{ bar}$

Chapitre 02

$$253 = 0,50 \cdot 350 (C/E - 0,5) ;$$

$$253 = 175 C/E - 87,5$$

$$340,5 = 175 C/E , \text{ D'où } C/E = 1,94 \quad E = 350/1,94$$

$$E = 180 \text{ L} .$$

DOSAGE EN GRANULATS :

On trace d'abord la de référence OAB, tel que l'abscisse du point A est située au milieu du (segment graviers) limités par le module 38 (tamis 5) et le module correspondant à D, soit X= 11mm, son ordonné est :

- Point O : abscisse : 0 ordonnée : 0
- Point B : abscisse : D ordonnée : 100
- Point A : ses coordonnées sont définies de la manière suivante :
- Abscisse = D/2 si $D < 20 \text{ mm}$.
- Abscisse au milieu du segment gravillon limite par le tamis de 5 mm et le tamis correspondant à D SI $D > 20 \text{ mm}$
- Ordonnée : $Y = 50 + K : D=08 \text{ mm}$ $K = +2$ d'où $Y = 47 \%$.

K : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage , de la forme des granulats, et du module de finesse du sable (voir tableau).

Vibration		Faible	Normale	Puissante
Forme des granulats (du sable en particulier)		Concassée	Concassée	Concassée
Dosage en ciment	400	+ 2	0	• 2
	350	+ 4	+ 2	0
	250	+ 8	+ 6	+ 4
	200	+9	+7	+5
	150	+10	+8	+6

Tab II.12 : de valeur du terme correcteur K . N°01

Chapitre 02

Dossier: 10/3+3/8
C = 350 kg/m³

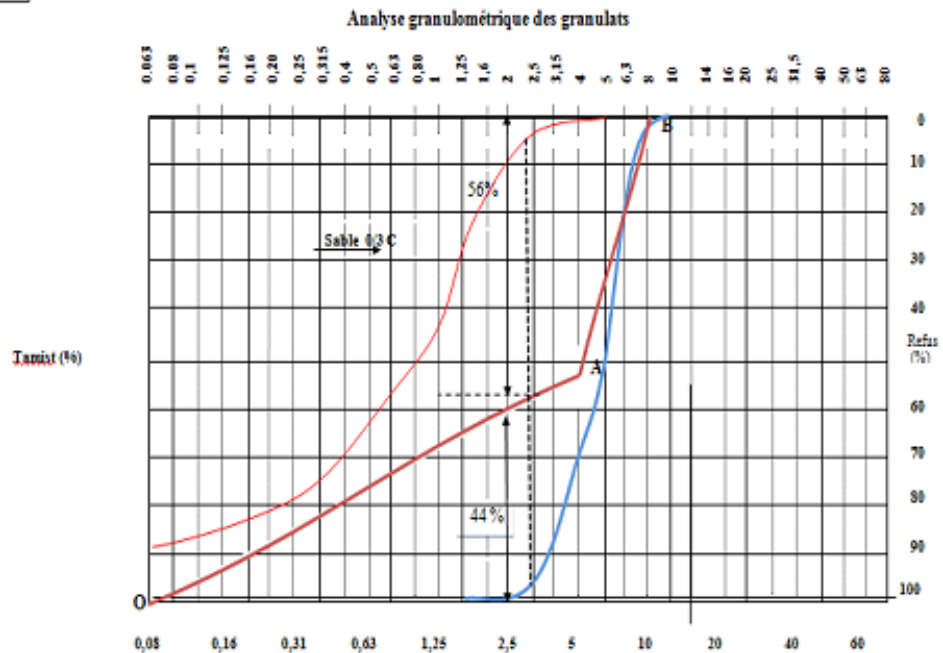


Fig II.14 : Traçons les lignes de partage joignant les points à 5% et 95% des courbes successives les pourcentages en volume absolu sont pour chacun des granulats. **N° 01**

- Gravier de classe 3/8.....56 %
- Sable 0/344 %

Le volume absolu des 03 granulats pour 01 m³ de béton en œuvre sera :

Volume absolue des composants solides : $1000 \times 0,820 = 820 \text{ l.}$

A déduire volume absolu du ciment : $350 / 3,1 = 113 \text{ L.}$

Volume absolu des granulats : $820 - 113 = 707 \text{ L.}$

En déduit :

- Masse sable $0,44 \times 707 \times 2,620 = 815 \text{ kg/m}^3.$
- Masse gravier 3/8 $0,56 \times 707 \times 2,620 = 1041 \text{ kg/m}^3.$
- Masse ciment $= 350 \text{ kg/m}^3.$
- Masse d'eau (hors adjuvant) $= 180 \text{ kg/m}^3$

Chapitre 02

- **Poids total** 2386 kg/m³

Pour C= 350 kg/m³

Pour 01 m³ de béton en œuvre, la composition du béton est la suivante :

- Ciment : 350 kg
- Eau : 180 L
- Sable 0/3 : 815 kg ou bien 815/1,870 Vapp = 436 L
- Gravier 3/8 : 1041 kg 1041/1,680 Vapp = 620 L

Pour un gâchage (des constituants) :

- Ciment : 50 kg (1 sac)
- Eau : 24 L
- Sable : 63 L
- Gravier 3/8 : 89 L

II-4-3 Formule n°02 (sable 0/3 + gravier 15/25) :

C= 350 kg/m

DOSAGE EN EAU :

En appliquant la formule suivante :

- $28 = G \times /C (C/E - 0,5)$ avec $G=0,5$ d'où :
- 28 = résistance moyenne du béton à 28 jours
- G = coefficient granulaire tableau 01
- C = résistance moyenne du ciment par m³ de béton.
- C = masse de ciment par m³ de béton.
- E = masse d'eau par m³ de béton.
- Résistance à 28 jour f_{c28} en bar = 220 bar.
- Classe vraie à 28 jour $\sigma_{28} = 350$ bar.
- M_v = réelle en g/cm³ = 3.1.

Résistance moyenne à 28 jour : calcul de $f_{cm} = f_{c28} \times 1.15 = 220 \times 1.15 = 253$ bar

$$253 = 0,50 \cdot 350 (C/E - 0,5) ;$$

$$253 = 175 C/E - 87.5$$

Chapitre 02

$$340.5 = 175 C/E, \text{ D'où } C/E = 1,94 \quad E = 350/1.94$$

$$E = 180 \text{ L.}$$

DOSAGE EN GRANULATS :

- On trace d'abord la de référence OAB, tel que l'abscisse du point A est située au milieu du (segment graviers) limités par le module 38 (tamis 5) et le module correspondant à D, soit $X = 11\text{mm}$, son ordonnée est :
- Point O : abscisse : 0 ordonnée : 0
- Point B : abscisse : D ordonnée : 100
- Point A : ses coordonnées sont définies de la manière suivante :
- Abscisse = $D/2$ si $D < 20 \text{ mm}$.
- Abscisse au milieu du segment gravillon limite par le tamis de 5 mm et le tamis correspondant à D si $D > 25 \text{ mm}$
- Ordonnée : $Y = 50 + K : D=25 \text{ mm } K = +2 \text{ d'où } Y = 47 \%$.

K : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats, et du module de finesse du sable (voir tableau).

Vibration		Faible	Normale	Puissante
Forme des granulats (du sable en particulier)		Concassée	Concassée	Concassée
Dosage en ciment	400	+ 2	0	• 2
	350	+ 4	+ 2	0
	250	+ 8	+ 6	+ 4
	200	+9	+7	+5
	150	+10	+8	+6

Tab II.13: de valeur du terme correcteur K **N°02.**

Chapitre 02

Pour 01 m³ de béton en œuvre, la composition du béton est la suivante :

- Ciment : 350 kg
- Eau : 180 L
- Sable 0/3 : 740 kg ou bien 740/1.870 $V_{app} = 396 \text{ L}$
- Gravier 15/25 : 1115 kg 1115/1.700 $V_{app} = 656 \text{ L}$

Pour un gâchage (des constituants) :

- Ciment : 50 kg (1 sac)
- Eau : 25.71 L
- Sable : 57 L
- Gravier 15/25 : 94 L

II-4-4 Formule n°03 (sable 0/3 + gravier 8/15) :

C = 350 kg/m³

DOSAGE EN EAU :

En appliquant la formule suivante :

- $28 = G \times /C (C/E - 0,5)$ avec $G=0,5$ d'où :
- 28 = résistance moyenne du béton à 28 jours
- G = coefficient granulaire tableau 01
- C = résistance moyenne du ciment par m³ de béton.
- C = masse de ciment par m³ de béton.
- E = masse d'eau par m³ de béton.
- Résistance à 28 jour f_{c28} en bar = 220 bar.
- Classe vraie à 28 jour $\sigma_{28} = 350 \text{ bar}$.
- M_v = réelle en g/cm³ = 3.1.

Résistance moyenne à 28 jour : calcul de $f_{cm} = f_{c28} \times 1.15 = 220 \times 1.15 = 253 \text{ bar}$

$$253 = 0,50 \cdot 350 (C/E - 0,5) ;$$

$$253 = 175 C/E - 87.5$$

$$340.5 = 175 C/E , \text{ D'où } C/E = 1,94 \quad E = 350/1.94$$

$$E = 180 \text{ L} .$$

Chapitre 02

DOSAGE EN GRANULATS :

On trace d'abord la de référence OAB, tel que l'abscisse du point A est située au milieu du (segment graviers) limités par le module 38 (tamis 5) et le module correspondant à D, soit $X = 11\text{mm}$, son ordonnée est :

- Point O : abscisse : 0 ordonnée : 0
- Point B : abscisse : D ordonnée : 100
- Point A : ses coordonnées sont définies de la manière suivante :
- Abscisse = $D/2$ si $D < 20\text{ mm}$.
- Abscisse au milieu du segment gravillon limite par le tamis de 5 mm et le tamis correspondant à D SI $D > 25\text{ mm}$
- Ordonnée : $Y = 50 + K : D = 15\text{ mm}$ $K = +2$ d'où $Y = 48.12\%$.

K : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage , de la forme des granulats, et du module de finesse du sable (voir tableau).

Vibration		Faible	Normale	Puissante
Forme des granulats (du sable en particulier)		Concassée	Concassée	Concassée
Dosage en ciment	400	+ 2	0	• 2
	350	+ 4	+ 2	0
	250	+ 8	+ 6	+ 4
	200	+9	+7	+5
	150	+10	+8	+6

tab II.14: de valeur du terme correcteur K N°03 .

Chapitre 02

Dossier: 3 0/3+815
C = 350 kg/m³

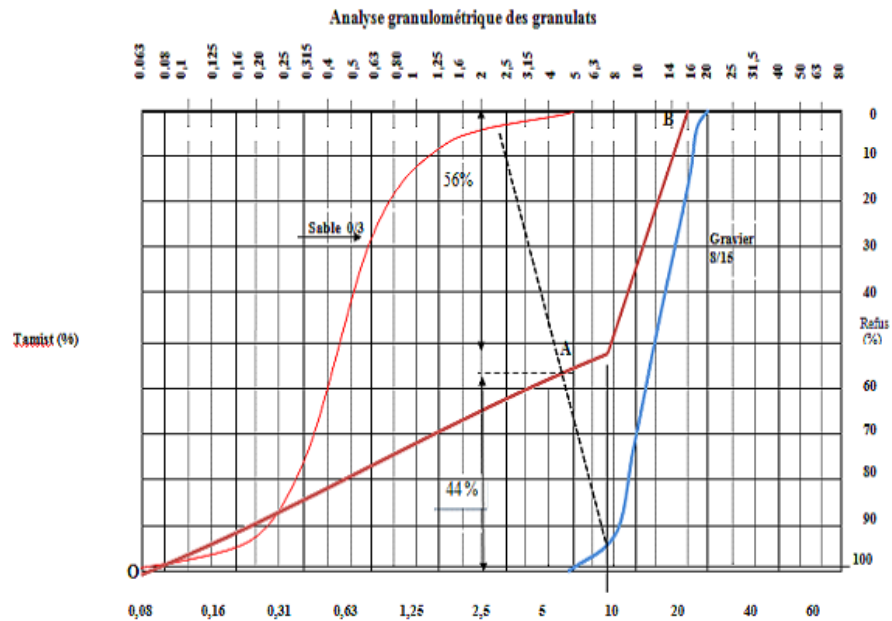


fig II.16: Traçons les lignes de partage joignant les points à 5% et 95% des courbes successives les pourcentages en volume absolu sont pour chacun des granulats N° 03 .

- Gravier de classe 8/15.....56 %
- Sable 0/344 %

Le volume absolu des 03 granulats pour 01 m³ de béton en œuvre sera :

Volume absolue des composants solides : $1000 \times 0,820 = 820 \text{ l.}$

A déduire volume absolu du ciment : $350 / 3,1 = 113 \text{ L.}$

Volume absolu des granulats : $820 - 113 = 707 \text{ L.}$

En déduit :

- Masse sable $0,44 \times 707 \times 2,620 = 815 \text{ kg/m}^3.$
- Masse gravier 8/15 $0,56 \times 707 \times 2,660 = 1053 \text{ kg/m}^3.$
- Masse ciment $= 350 \text{ kg/m}^3.$
- Masse d'eau (hors adjuvant) $= 180 \text{ kg/m}^3$
- **Poids total** **2398 kg/m³**

C = 350 kg/m³

Chapitre 02

Pour 01 m³ de béton en œuvre, la composition du béton est la suivante :

- Ciment : 350 kg
- Eau : 180 L
- Sable 0/3 : 815 kg ou bien 815/1.920 Vapp = 425 L
- Gravier 15/25 : 1053 kg 1053/1.700 Vapp = 619 L

Pour un gâchage (1/7 des constituants) :

- Ciment : 50 kg (1 sac)
- Eau : 25.71 L
- Sable : 60.7 L
- Gravier 08/15 : 89 L

II-4-5 Formule n°04 (sable 0/3 djamaa + gravier 8/15 et gravier 3/8) :

Pour C= 350 kg/m³

DOSAGE EN EAU :

En appliquant la formule suivante :

- $28 = G \times /C (C/E - 0,5)$ avec $G=0,5$ d'où :
- 28 = résistance moyenne du béton à 28 jours
- G = coefficient granulaire tableau 01
- C = résistance moyenne du ciment par m³ de béton.
- C = masse de ciment par m³ de béton.
- E = masse d'eau par m³ de béton.
- Résistance à 28 jour f_{c28} en bar = 220 bar.
- Classe vraie à 28 jour $\sigma_{28} = 350$ bar.
- M_v = réelle en g/cm³ = 3.1.

Résistance moyenne à 28 jour : calcul de $f_{cm} = f_{c28} \times 1.15 = 220 \times 1.15 = 253$ bar

$$253 = 0,50 \cdot 350 (C/E - 0,5) ;$$

$$253 = 175 C/E - 87.5$$

$$340.5 = 175 C/E , \text{ D'où } C/E = 1,94 \quad E = 350/1.94$$

$$E = 180 \text{ L} .$$

6.1.2/ DOSAGE EN GRANULATS :

Chapitre 02

On trace d'abord la de référence OAB, tel que l'abscisse du point A est située au milieu du (segment graviers) limités par le module 38 (tamis 5) et le module correspondant à D, soit $X=11\text{mm}$, son ordonnée est :

- Point O : abscisse : 0 ordonnée : 0
- Point B : abscisse : D ordonnée : 100
- Point A : ses coordonnées sont définies de la manière suivante :
- $\text{Abscisse} = D/2$ si $D < 20 \text{ mm}$.
- Abscisse au milieu du segment gravillon limite par le tamis de 5 mm et le tamis correspondant à D SI $D > 25 \text{ mm}$
- Ordonnée : $Y = 50 + K : D=15 \text{ mm}$ $K = +2$ d'où $Y = 48.12 \%$.

K : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage , de la forme des granulats, et du module de finesse du sable (voir tableau).

Vibration		Faible	Normale	Puissante
Forme des granulats (du sable en particulier)		Concassée	Concassée	Concassée
Dosage en ciment	400	+ 2	0	• 2
	350	+ 4	+ 2	0
	250	+ 8	+ 6	+ 4
	200	+9	+7	+5
	150	+10	+8	+6

Tab II.15: de valeur du terme correcteur K N°04 .

Chapitre 02

Dossier : 4 0/3+8/15+3/8
C = 350 kg/m³

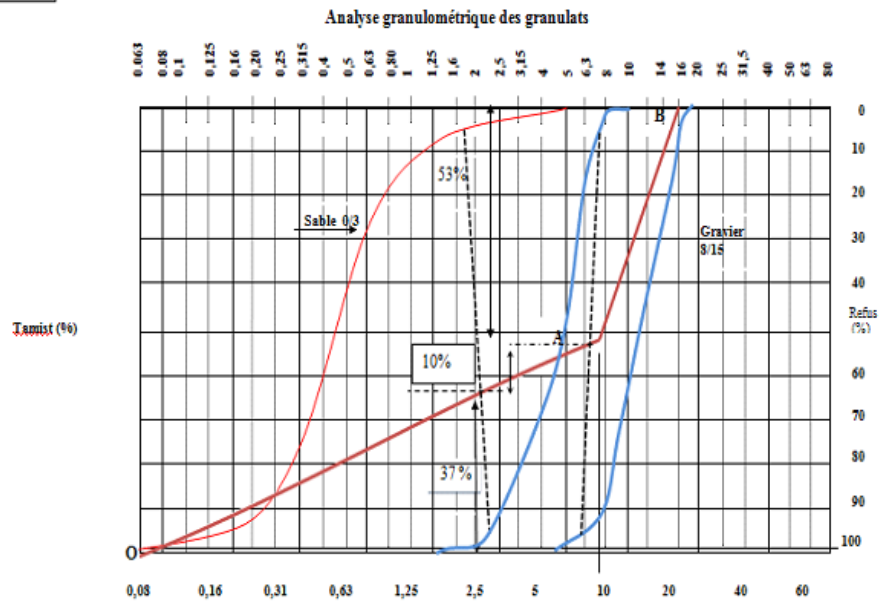


fig II.17: Traçons les lignes de partage joignant les points à 5% et 95% des courbes successives les pourcentages en volume absolu sont pour chacun des granulats N°04 .

- Gravier de classe 8/15.....53 %
- Gravier de classe 3/8.....10 %
- Sable 0/3(djamaa)37 %

Le volume absolu des 03 granulats pour 01 m³ de béton en œuvre sera :

Volume absolue des composants solides : $1000 \times 0,820 = 820 \text{ l.}$

A déduire volume absolu du ciment : $350 / 3,1 = 113 \text{ L.}$

Volume absolu des granulats : $820 - 113 = 707 \text{ L.}$

En déduit :

- Masse sable $0,37 \ 707 \ 2,620 = 696 \text{ kg/m}^3.$
- Masse gravier 8/15 $0,53 \ 707 \ 2,660 = 997 \text{ kg/m}^3.$
- Masse gravier 3/8 $0,10 \ 707 \ 2,630 = 186 \text{ kg/m}^3.$
- Masse ciment $= 350 \text{ kg/m}^3.$
- Masse d'eau (hors adjuvant) $= 180 \text{ kg/m}^3$
- **Poids total 2409 kg/m^3**

Chapitre 02

C= 350 kg/m³

Pour 01 m³ de béton en œuvre, la composition du béton est la suivante :

- Ciment : 350 kg
- Eau : 180 L
- Sable 0/3 (djamaa) : 696 kg ou bien 696/1.850 Vapp = 373 L
- Gravier 8/15 : 997 kg 997/1.780 Vapp = 560 L
- Gravier 3/8 : 186 kg 186/1.680 Vapp = 110 L

Pour un gâchage (1/7 des constituants) :

- Ciment : 50 kg (1 sac)
- Eau : 25.71 L
- Sable : 54 L
- Gravier 8/15 : 80 L
- Gravier 3/8 : 16 L

II-4-6 Formule n°05 (sable 0/3 djamaa + gravier 15/25 et gravier 3/8) :

C= 350 kg/m³

DOSAGE EN EAU :

En appliquant la formule suivante :

- $28 = G \times \frac{1}{C} (C/E - 0,5)$ avec $G=0,5$ d'où :
- 28 = résistance moyenne du béton à 28 jours
- G = coefficient granulaire tableau 01
- C = résistance moyenne du ciment par m³ de béton.
- C = masse de ciment par m³ de béton.
- E = masse d'eau par m³ de béton.
- Résistance à 28 jour f_{c28} en bar = 220 bar.
- Classe vraie à 28 jour $\sigma_{28} = 350$ bar.
- M_v = réelle en g/cm³ = 3.1.

Résistance moyenne à 28 jour : calcul de $f_{cm} = f_{c28} \times 1.15 = 220 \times 1.15 = 253$ bar

Chapitre 02

$$253 = 0,50 \cdot 350 (C/E - 0,5) ;$$

$$253 = 175 C/E - 87,5$$

$$340,5 = 175 C/E , \text{ D'où } C/E = 1,94 \quad E = 350/1,94$$

$$E = 180 \text{ L} .$$

DOSAGE EN GRANULATS :

On trace d'abord la de référence OAB, tel que l'abscisse du point A est située au milieu du (segment graviers) limités par le module 38 (tamis 5) et le module correspondant à D, soit X= 11mm, son ordonnée est :

- Point O : abscisse : 0 ordonnée : 0
- Point B : abscisse : D ordonnée : 100
- Point A : ses coordonnées sont définies de la manière suivante :
- Abscisse = D/2 si D < 20 mm.
- Abscisse au milieu du segment gravillon limite par le tamis de 5 mm et le tamis correspondant à D SI D > 25 mm
- Ordonnée : Y= 50 + K : D=25 mm K= +2 d'où Y= 47 %.

K : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage , de la forme des granulats, et du module de finesse du sable (voir tableau).

Vibration		Faible	Normale	Puissante
Forme des granulats (du sable en particulier)		Concassée	Concassée	Concassée
Dosage en ciment	400	+ 2	0	• 2
	350	+ 4	+ 2	0
	250	+ 8	+ 6	+ 4
	200	+9	+7	+5
	150	+10	+8	+6

Tab II.16: de valeur du terme correcteur **K N°05** .

Chapitre 02

Dossier: 5 0/3+3/8+
15/25
C = 350 kg/m³

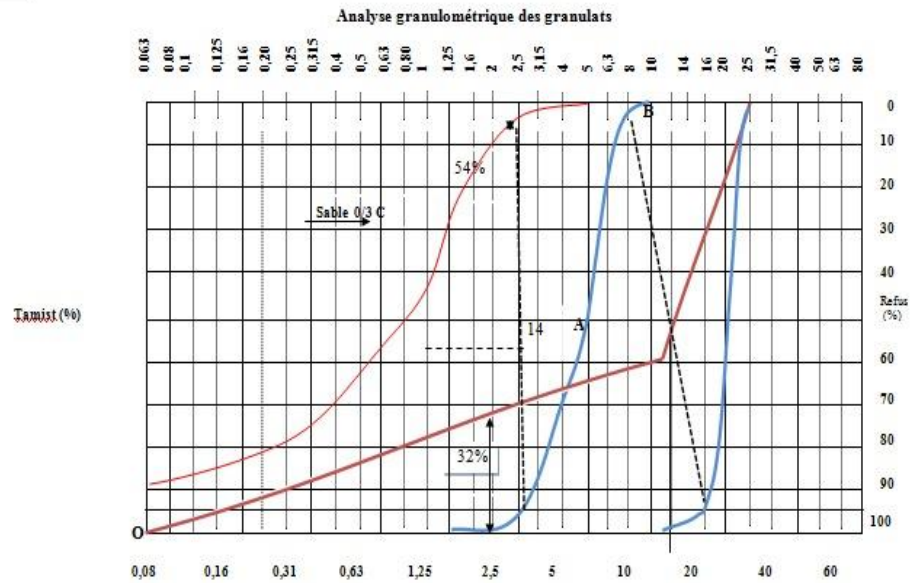


fig II.18: Traçons les lignes de partage joignant les points à 5% et 95% des courbes successives les pourcentages en volume absolu sont pour chacun des granulats N° 05 .

- Gravier de classe 15/2554 %
- Gravier de classe 3/8..... 14 %
- Sable 0/3(djamaa)32 %

Le volume absolu des 03 granulats pour 01 m³ de béton en œuvre sera :

Volume absolue des composants solides : $1000 \times 0,820 = 820 \text{ l.}$

A déduire volume absolu du ciment : $350 / 3,1 = 113 \text{ L.}$

Volume absolu des granulats : $820 - 113 = 707 \text{ L.}$

En déduit :

- Masse sable $0,32 \quad 707 \quad 2,620 = 593 \text{ kg/m}^3.$
- Masse gravier 15/25 $0,54 \quad 707 \quad 2,630 = 1004 \text{ kg/m}^3.$
- Masse gravier 3/8 $0,14 \quad 707 \quad 2,630 = 260 \text{ kg/m}^3.$
- Masse ciment $= 350 \text{ kg/m}^3.$
- Masse d'eau (hors adjuvant) $= 180 \text{ kg/m}^3$
- **Poids total 2387 kg/m^3**

C= 350 kg/m³

Chapitre 02

Pour 01 m³ de béton en œuvre, la composition du béton est la suivante :

Ciment : 350 kg

- Eau : 180 L
- Sable 0/3 (djamaa) : 593 kg ou bien 593/1.850 V_{app} = 320 L
- Gravier 15/25 : 1004 kg 1004/1.700 V_{app} = 590 L
- Gravier 3/8 : 260 kg 260/1.680 V_{app} = 154 L

Pour un gâchage (des constituants) :

- Ciment : 50 kg (1 sac)
- Eau : 25.71 L
- Sable : 46 L
- Gravier 15/25 : 85 L
- Gravier 3/8 : 22

II-4-7 Formule n°06 (sable 0/3 djamaa + gravier 15/25, gravier 8/15 et gravier 3/8) :

C= 350 kg/m³

DOSAGE EN EAU :

En appliquant la formule suivante :

- $28 = G \times /C (C/E - 0,5)$ avec $G=0,5$ d'où :
- 28 = résistance moyenne du béton à 28 jours
- G = coefficient granulaire tableau 01
- C = résistance moyenne du ciment par m³ de béton.
- C = masse de ciment par m³ de béton.
- E = masse d'eau par m³ de béton.
- Résistance à 28 jour f_{c28} en bar = 220 bar.
- Classe vraie à 28 jour $\sigma_{28} = 350$ bar.
- M_v = réelle en g/cm³ = 3.1.

Résistance moyenne à 28 jour : calcul de $f_{cm} = f_{c28} \times 1.15 = 220 \times 1.15 = 253$ bar

$$253 = 0,50 \times 350 (C/E - 0,5) ;$$

$$253 = 175 C/E - 87.5$$

Chapitre 02

$$340.5 = 175 C/E, \text{ D'où } C/E = 1,94 \quad E = 350/1.94$$

$$E = 180 L.$$

DOSAGE EN GRANULATS :

On trace d'abord la de référence OAB, tel que l'abscisse du point A est située au milieu du (segment graviers) limités par le module 38 (tamis 5) et le module correspondant à D, soit X= 11mm, son ordonnée est :

- Point O : abscisse : 0 ordonnée : 0
- Point B : abscisse : D ordonnée : 100
- Point A : ses coordonnées sont définies de la manière suivante :
- Abscisse = $D/2$ si $D < 20$ mm.
- Abscisse au milieu du segment gravillon limite par le tamis de 5 mm et le tamis correspondant à D SI $D > 25$ mm
- Ordonnée : $Y = 50 - K : D=25$ mm $K = +2$ d'où $Y = 47 \%$.

K : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage , de la forme des granulats, et du module de finesse du sable (voir tableau).

Vibration		Faible	Normale	Puissante
Forme des granulats (du sable en particulier)		Concassée	Concassée	Concassée
Dosage en ciment	400	+ 2	0	• 2
	350	+ 4	+ 2	0
	250	+ 8	+ 6	+ 4
	200	+9	+7	+5
	150	+10	+8	+6

Tab II.17: de valeur du terme correcteur K N°06 .

Chapitre 02

Dossier: 06 0/3+3/8+
8/15+15/25
C = 350 kg/m³

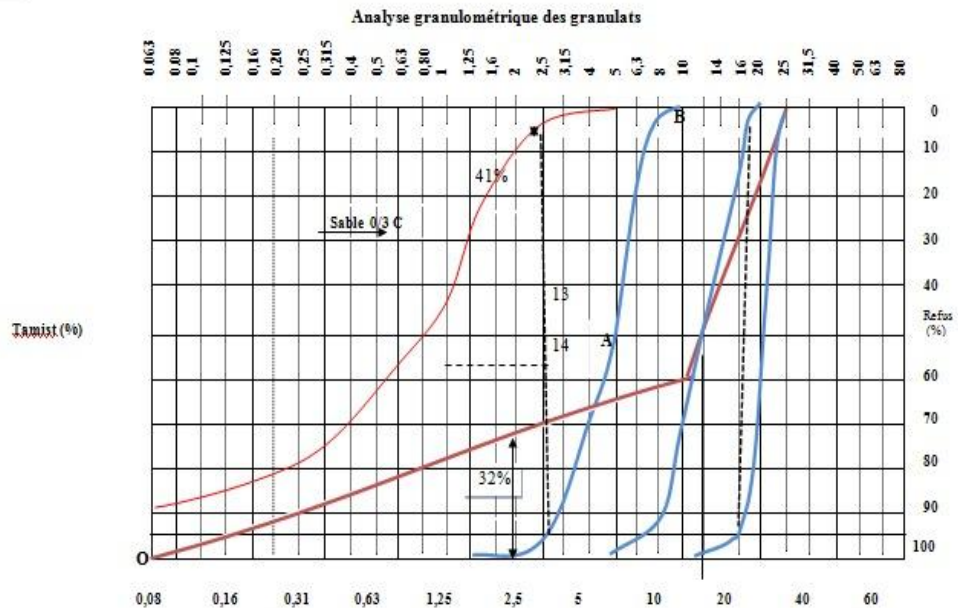


fig II.19 : Traçons les lignes de partage joignant les points à 5% et 95% des courbes successives les pourcentages en volume absolu sont pour chacun des granulats N° 06 .

- Gravier de classe 15/2541 %
- Gravier de classe 8/15.....14 %
- Gravier de classe 3/8.....13 %
- Sable 0/3(djamaa)32 %

Le volume absolu des 03 granulats pour 01 m³ de béton en œuvre sera :

Volume absolue des composants solides : $1000 \times 0,820 = 820 \text{ l.}$

A déduire volume absolu du ciment : $350 / 3,1 = 113 \text{ L.}$

Volume absolu des granulats : $820 - 113 = 707 \text{ L.}$

En déduit :

- Masse sable $0,32 \times 707 \times 2,620 = 592 \text{ kg/m}^3.$
- Masse gravier 15/25 $0,41 \times 707 \times 2,630 = 762 \text{ kg/m}^3.$
- Masse gravier 8/1 5 $0,14 \times 707 \times 2,660 = 263 \text{ kg/m}^3.$
- Masse gravier 3/8 $0,13 \times 707 \times 2,630 = 241 \text{ kg/m}^3.$

Chapitre 02

- Masse ciment = 350 kg/m³.
- Masse d'eau = 180 kg/m³
- **Poids total 2388 kg/m³**

C = 350 kg/m³

Pour 01 m³ de béton en œuvre, la composition du béton est la suivante :

Ciment : 350 kg

- Eau : 180 L
- Sable 0/3 (djamaa) : 592 kg ou bien 592/1.850 Vapp = 320 L
- Gravier 15/25 : 762 kg 762/1.700 Vapp = 448 L
- Gravier 8/15 : 263 kg 263/1.780 Vapp = 154 L
- Gravier 3/8 : 241 kg 241/1.680 Vapp = 143 L

Pour un gâchage (1/7 des constituants) :

- Ciment : 50 kg (1 sac)
- Eau : 25.71 L
- Sable : 46 L
- Gravier 15/25 : 64 L
- Gravier 8/15 : 22 L
- Gravier 3/8 : 20 L

II-5 Essai d'ouvrabilité au cône d'Abrams :

- Cet essai est réalisé suivant la recommandation de la norme EN 12350-2 (EN 12350-2, 1999). Il s'agit de donner l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Le béton est introduit dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs qui seront mises en place au moyen d'une tige de piquage actionnée 25 fois par couche. Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule, le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution. Le béton n'étant plus maintenu s'affaisse plus ou moins suivant sa consistance. La mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage comme la montre

Chapitre 02

But de l'essai:

- Le cône d'Abrams permet de contrôler la classe de consistance du béton que l'on s'apprête à utiliser en mesurant l'affaissement d'un échantillon.

Principe de l'essai :

- On réalise cet essai sur chantier, en prélevant un échantillon directement en sortie de la toupie. Cet essai consiste à réaliser un cône de béton frais au moyen d'un moule conique, à démouler et à mesurer l'affaissement du sommet

Équipement nécessaire L'équipement se compose de :

- Moule tronconique métallique sans fond de 300 mm de haut, 200 mm de diamètre en sa partie inférieure et de 100 mm en sa partie supérieure (volume 5,5 L).
- Plaque d'appui rigide et plate. - Tige de piquage de 16 mm de diamètre et de 600 mm de longueur. Portique de mesure avec une règle graduée de 0 à 300 mm.
- Entonnoir, pouvant se fixer sur le cône.
- Main écope



fig II.20 : Essai cône d'Abrams .

Mode opératoire :

- Nettoyer parfaitement le moule et son socle.
- La plaque d'appui et le moule sont légèrement humidifiés, et le moule est fixe contre la plaque d'appui.

Chapitre 02

- Remplir le cône en 3 couches (en remplissant à chaque fois 1/3 de la hauteur du cône). Les couches doivent être piquées 25 fois avec la tige de piquage.
- L'arasement du béton en excès de la dernière couche se fait à l'aide de la tige de piquage.
- Le moule est ensuite retiré en 3 à 5 secondes par une remontée verticale et régulière.
- Immédiatement après avoir retiré le moule, l'affaissement est mesuré par différence entre la hauteur du moule et le point le plus haut du béton affaissé.

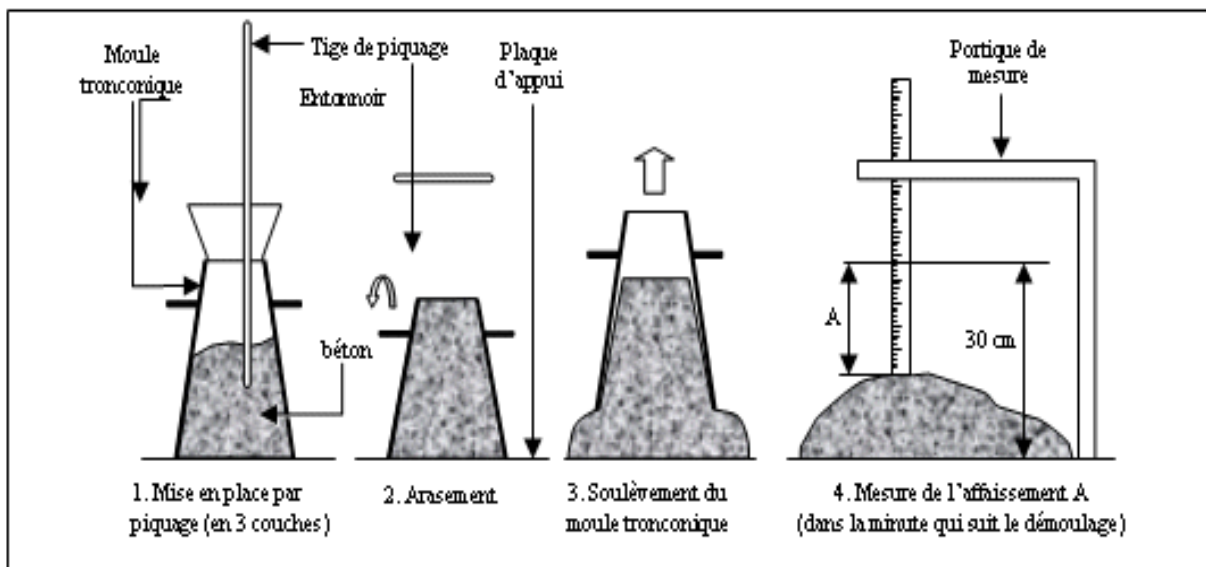


fig II.21 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

- A partir de la valeur de l'affaissement du cône (en mm), on détermine la classe de consistance du béton.

classe	Affaissement (mm)	aspect
S1	10 à 40	ferme
S2	50 à 90	plastique
S3	100 à 150	Très plastique
S4	160 à 210	fluide
S5	≥ 220	Très fluide

Tab II.18: La norme NF EN 206 classe l'affaissement du béton en cinq groupes

Chapitre 02

II-6 Nature de essais (DIS et N D):

Dans ces expériences, nous avons utilisé 6 types de combinaisons

(BinaireTriplerQuadruple) :

Binaire :

- Formule n°01 (sable 0/3 + gravier 3/8)
- Formule n 02 (sable 0/3 + gravier 15/25)
- Formule n 03 (sable 0/3 + gravier 8/15)

Tripler:

- Formule n°04 (sable 0/3 djamaa + gravier 8/15 et gravier 3/8)
- Formule n°05 (sable 0/3 djamaa + gravier 15/25 et gravier 3/8)

Quadruple :

Formule n°06 (sable 0/3 djamaa + gravier 15/25, gravier 8/15 et gravier 3/8)

Et chaque formule de ces 06 formulation Nous avons coulé 09 moules Dimensionné

(15 15 15 cm) Nous avons 54 Moules







soCOVEC Contrôle & Vérification *Société de Contrôle et de Vérification*

CERTIFICAT D'ETALONNAGE

N° 793.MET.ZM.20

Délivré à : SARL NIZOLB.CONTROLE (El Oued) **Date de l'étalonnage :** 04 Juillet 2020
Prochain étalonnage : 04 Juillet 2021

INSTRUMENT ETALONNE :

Désignation : PRESSE A BETON
 Marque : CONTROLS
 Type : C34A2
 Identification interne : /
 Affectation : Laboratoire NIZOLAB - El Oued.

N° de Série : **06031460** Capacité maximale : 1500 KN
 Résolution : 0,1 KN Classe : /

METHODE D'ESSAI ET D'ETALONNAGE :

L'étalonnage a été effectué par comparaison à un étalon de référence de métrologie habilité.
 L' (Les) étalon(s) utilisé(s) pour cet étalonnage est (sont) consigné(s) dans un dossier archivé au laboratoire et dont le numéro est identique à celui du présent certificat.

DOCUMENT DE REFERENCE : Recommandation Internationale (R 65)

CONDITIONS D'ETALONNAGE :

Température ambiante : $(27,9 \pm 1)^{\circ}\text{C}$
 Humidité relative : $(35,5 \pm 5)\% \text{ HR}$
 Pression atmosphérique : Non contrôlée

EQUIPEMENT ETALON UTILISE

CAPTEUR DE FORCE	INDICATEUR
Marque : AEP	Marque : AEP
Type : CLF 2000 KN	Type : MP 10
N° de Série : 137102	N° de Série : 6384-2013-07
N° du Certificat : 13-0570-01	

(La délivrance d'un certificat d'étalonnage SOCOVEC garantit la traçabilité des résultats aux étalons internationaux)

RESULTATS DE L'ETALONNAGE

Force d'Essai	Essai N° 01	Essai N° 02	Essai N° 03	Moyenne des Essais	Répétabilité	Erreur	Incertitude
en (KN)							
200,00	200,613	200,359	200,638	200,537	0,14	-0,27	0,39
400,00	400,911	400,766	400,801	400,826	0,04	-0,21	0,14
600,00	601,315	601,877	601,713	601,635	0,09	-0,27	0,18
800,00	802,322	802,514	802,429	802,422	0,02	-0,30	0,08
1000,00	1004,066	1003,899	1003,906	1003,957	0,02	-0,39	0,06
1200,00	1204,548	1204,412	1204,615	1204,525	0,02	-0,38	0,05
1400,00	1407,111	1406,974	1406,724	1406,936	0,03	-0,49	0,06

Conclusion : Equipement Conforme est de classe 1

P/ Département Métrologie

soCOVEC Société de Contrôle et de Vérification
 Chargé d'Affaires Métrologie
 Mr ZIDANE Muhammed
 ANNABA

fig II.23 : Appareil utilisateur presse a beton et certifiat d'étalonnage



soCOVEEC Contrôle & Vérification Société de Contrôle et de Vérification

CERTIFICAT D'ETALONNAGE
N° 794.MET.ZM.20

Délivré à : SARL NIZOLB.CONTROLE (El Oued) **Date de l'étalonnage :** 23 Juin 2020
Prochain étalonnage : 23 Juin 2021

INSTRUMENT ETALONNE :
Désignation : APPAREIL ULTRA SON
Marque : PROCEQ
Type : PUNDIT LAB
Code Interne : /
Affectation : Laboratoire NIZOLAB - El Oued. **N° de Série :** PL02-002-0136 B0

METHODE D'ESSAI ET D'ETALONNAGE :
L'étalonnage a été réalisé par une série de mesures effectués avec une cale de Référence.

DOCUMENT DE REFERENCE : Document D6, D11 et ISO 22476 - 2 : 2005

CONDITIONS D'ETALONNAGE : **EQUIPEMENT ETALON UTILISE**
Température ambiante : $(27,9 \pm 1)^\circ\text{C}$
Humidité relative : $(35,5 \pm 5)\% \text{ HR}$
Pression atmosphérique : Non contrôlée Cale de référence : 25,4 μs

(La délivrance d'un certificat d'étalonnage SOCOVEEC garantit la traçabilité des résultats aux étalons internationaux)

RESULTATS DE L'ETALONNAGE

Valeur de Référence	Durée de Transit Lue en (μs)	Valeur Moyenne	Erreur de Répétabilité en (%)
25,4	25,4	25,27	0,40
25,4	25,4		
25,4	25,4		
25,4	25,3		
25,4	25,4		
25,4	25,4		
25,4	25,4		

P/ Département Métrologie

fig II.24 : Appareil utilisateur ultrason et certificat d'étalonnage

Chapitre 02

II-7 Les résultats des essais : (sont le tableau suivants)

Formulation N °01	temps	Jour de collage	Date eassai (ultrason/ écrasement)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de écrasement (MPA) / (KN)
0/3 - 3/8	7 J	18-04- 2021	25-04-2021	T=31.1 V=4823	25.4 573.2
0/3 - 3/8	7 J	18-04- 2021	25-04-2021	T=30.4 V=4934	24.6 553.7
0/3 - 3/8	7 J	18-04- 2021	25-04-2021	T=30.7 V=4886	24.8 560.1
0/3 - 3/8	14 J	18-04- 2021	02-05-2021	T=32.4 V=4630	23.8 608.3
0/3 - 3/8	14 J	18-04- 2021	02-05-2021	T=32.6 V=4601	26.3 672.9
0/3 - 3/8	14 J	18-04- 2021	02-05-2021	T=32.2 V=4658	26.9 688.9
0/3 - 3/8	28 J	18-04- 2021	15-05-2021	T=30.2 V=4967	28.5 641.5
0/3 - 3/8	28 J	18-04- 2021	15-05-2021	T=29.4 v=5102	32.9 741.4
0/3 - 3/8	28 J	18-04- 2021	15-05-2021	T=27.6 V=5300	31 720.3

Tableau II.19 : Formulation n°01 (sable 0/3 concasse + gravier 3/8)

Chapitre 02

Formulation N °02	temps	Jour de collage	Date eassai (ultrason/ écrasement)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de écrasement (MPA) / (KN)
0/3 - 15/25	7 J	17-04-2021	24-04-2021	T= 28.9 V= 5190	23.4 527.6
0/3 - 15/25	7 J	17-04-2021	24-04-2021	T=29.9 V=5017	25 564.5
0/3 - 15/25	7 J	17-04-2021	24-04-2021	T=29.9 V=5017	24 535.5
0/3 - 15/25	14 J	17-04-2021	01-04-2021	T=30.4 V= 4934	23.2 592
0/3 - 15/25	14 J	17-04-2021	01-04-2021	T= 29.7 V=5051	23.6 602
0/3 - 15/25	14 J	17-04-2021	01-04-2021	T=28.4 V=5282	24.6 551.5
0/3 - 15/25	28 J	17-04-2021	14-04-2021	T= 29.4 V= 5052	28.4 640.9
0/3 - 15/25	28 J	17-04-2021	14-04-2021	T=30.1 V=4980	34 765.8
0/3 - 15/25	28 J	17-04-2021	14-04-2021	T= 30.5 V= 4878	34.4 773.3

Tableau II.20 : Formulation n°02 (sable 0/3 concasse + gravier 15/25)

Chapitre 02

Formulation N °03	temps	Jour de collage	Date eassai (ultrason/ écrasement)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de écrasement (MPA) / (KN)
0/3 - 8/15	7 J	20-04-2021	27-04-2021	T=41.6 V= 3606	28 631.3
0/3 - 8/15	7 J	20-04-2021	27-04-2021	T= 30.1 V= 4983	29.5 664.4
0/3 - 8/15	7 J	20-04-2021	27-04-2021	T=31.4 V=4777	30.2 680
0/3 - 8/15	14 J	20-04-2021	04-05-2021	T=30.2 V=4967	29.4 750.2
0/3 - 8/15	14 J	20-04-2021	04-05-2021	T= 29.9 V= 5017	28.8 740.1
0/3 - 8/15	14 J	20-04-2021	04-05-2021	T=29.9 V=5017	29.6 752.3
0/3 - 8/15	28 J	20-04-2021	17-05-2021	T= 29.4 V=4550	37.9 853.9
0/3 - 8/15	28 J	20-04-2021	17-05-2021	T= 30.2 V=4967	34.0 765.3
0/3 - 8/15	28 J	20-04-2021	17-05-2021	T= 33.1 V= 4532	37.6 844.8

Tableau II.21: Formulation n°03 (sable 0/3 concasse + gravier 8/15)

Chapitre 02

Formulation n°04	temps	Jour de collage	Date eassai (ultrason/ écrasement)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de écrasement (MPA) / (KN)
0/3 - 8/15 3/8	7 J	21-04- 2021	28-04-2021	T=29.4 V=5102	19.9 509
1/3 - 8/15 3/8	7 J	21-04- 2021	28-04-2021	T=30.7 V= 4886	23.5 601.2
0/3 - 8/15 3/8	7 J	21-04- 2021	28-04-2021	T= 30.01 V=4976	23.6 601.2
0/3 - 8/15 3/8	14 J	21-04- 2021	05-05-2021	T=30.4 V=4934	32.0 720.6
0/3 - 8/15 3/8	14 J	21-04- 2021	05-05-2021	T= 30.6 V= 4902	31.3 704.8
0/3 - 8/15 3/8	14 J	21-04- 2021	05-05-2021	T= 32.9 V=4959	31.7 710.5
0/3 - 8/15 3/8	28 J	21-04- 2021	18-05-2021	T=29.4 V=4559	33.6 757.2
0/3 - 8/15 3/8	28 J	21-04- 2021	18-05-2021	T= 30.2 V= 4967	35.4 800
0/3 - 8/15 3/8	28 J	21-04- 2021	18-05-2021	T=29.8 V= 5007	34.3 780

Tableau II.22: Formulation n°04 (sable DJAMAA + gravier 3/8 + gravier 8/15)

Chapitre 02

Formulation N °05	temps	Jour de collage	Date eessai (ultrason/ écrasement)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de écrasement (MPA) / (KN)
0/3 - 3/8 15/25	7 J	22-04-2021	29-04-2021	T=27.9 V= 5376	26.8 685.4
0/3 - 3/8 15/25	7 J	22-04-2021	29-04-2021	T= 27.9 V= 5376	28.9 738.5
0/3 - 3/8 15/25	7 J	22-04-2021	29-04-2021	T=28 V= 5246	33.5 855.5
0/3 - 3/8 15/25	14 J	22-04-2021	06-05-2021	T= 28.4 V=5282	33.7 760
0/3 - 3/8 15/25	14 J	22-04-2021	06-05-2021	T=28.1 V= 5338	31 698.4
0/3 - 3/8 15/25	14 J	22-04-2021	06-05-2021	T=27.4 V=5474	37.3 839.8
0/3 - 3/8 15/25	28 J	22-04-2021	19-05-2021	T= 29.9 V= 5576	37.3 860
0/3 - 3/8 15/25	28 J	22-04-2021	19-05-2021	T=26.3 V= 5703	38.4 874
0/3 - 3/8 15/25	28 J	22-04-2021	19-05-2021	T= 26.5 V=5660	39.7 895

Tableau II.23: Formulation n°05 (sable DJAMAA + gravier 3/8 +gravier 15/25)

Formulation n N °06	temp s	Jour de collage	Date eassai (ultrason/ écrasement)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de écrasement (MPA) / (KN)
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	7 J	24-04- 2021	01-05-2021	T=27.9 V= 5376	22.6 578.4
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	7 J	24-04- 2021	01-05-2021	T= 29.2 V= 5137	29.1 742.5
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	7 J	24-04- 2021	01-05-2021	T= 29.1 V= 5115	26.3 671.7
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	14 J	24-04- 2021	08-05-2021	T=29.6 V=5068	36.1 812.3
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	14 J	24-04- 2021	08-05-2021	T=28.1 V=5338	38.4 874.5
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	14 J	24-04- 2021	08-05-2021	T=28.9 V=5190	31.1 700
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	28 J	24-04- 2021	20-05-2021	T= 27.5 V=5454	38.1 870
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	28 J	24-04- 2021	20-05-2021	T=27.2 V= 5514	40.22 902
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	28 J	24-04- 2021	20-05-2021	T=26.7 V=5434	41.1 912

Tableau II.24 : Formulation n°06 (sable DJAMAA + gravier 3/8 + gravier 8/15 + gravier 15/25)

II-8 Effet de la forme de l'éprouvette :

L'histogramme de la figure 1 montre les résistance à la compression mesurées par écrasements pour les différent esgéométries utilisées .le cylindre comme forme géométrique donne des valeurs de résistance a la compression légèrement inferieures par rapport a celle mesurées sur le prisme ou le cube

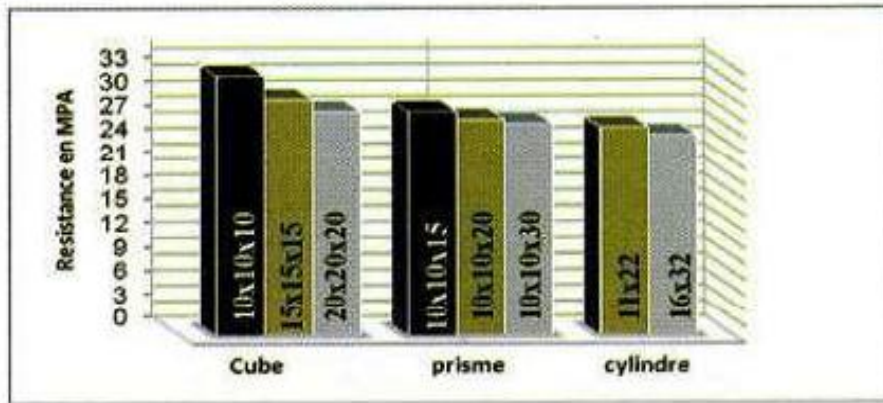


Fig II.25 : résistance a la compression des éprouvettes de différent esgéométries .

Le rapport de la résistance mesurée sur le cylindre 16x32 sur la résistance mesurée sur le cube de 20 cm d'arête varie de 0,7 a 0,9 selon les résultats de la littérature donnes par différentes formules empiriques (10). Ces résultats sont tires d'une grande investigation basée sur de nombreuses enquêtes internationales auprès de laboratoires de nombreux pays travaillant dans le domaine effectués par la RILEM . le comité européen du béton estime a 0,83 une moyenne admissible de ce rapport (10) .dans notre cas ce rapport est évalué a 0,89 .il semble ainsi que les différentes formules empiriques rendent bien compte des résultats de mesure en adoptant des coefficients pour relier les résistance strouvées sur des éprouvettes de formes différentes (10).

Une relation qui relie la résistances des éprouvettes selon leurs dimensions et telle que spécifiée par la littérature, permet d'estimer la résistance a la compression R_{cx} d'une éprouvette par rapport a la résistance sur cube d'arête 200 mm R_{CU200} . Elle est donnée par la relation suivante :

$$\frac{R_{cx}}{R_{cu200}} = 0,65 + \frac{0,7}{\left(1 + \frac{\sqrt{A}}{200}\right) \cdot \left(\frac{h}{A}\right) \cdot 1,05}$$

A et h représentent respectivement la section et la hauteur de l'éprouvette considérée . la relation peut aussi être adaptée aux cas des autres cubes traités d'arêtes 10 cm et 15 cm .

Les calculs des rapports des résistances de l'ensemble des spécimens cubiques par rapport a la résistance de référence sur les cylindres 16x32 (R_{C16}) sont rassemblés dans le tableau 25.

Chapitre 02

éprouvette	Cube 10	Cube 15	Cube 20	Cylindre 11*22
C_{oef} expérimental	0,77	0,85	0,89	0,96
C_{oef} calcule	0,80	0,85	0,90	1,00

Tableau II.25 : coefficients correcteurs de forme par rapport à l'éprouvette de référence
16*32

II-9 Les résultats des essais avec correction : (sont le tableau suivants)

Formulation N °01	temps	date de collage	Date eassai (ultrason/ écrasement)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de écrasement (MPA) / (KN)	Résistance par ultrason (MPA)
0/3 - 3/8	7 J	18-04- 2021	25-04-2021	T=31.1 V=4823	25.4 573.2	21.59
0/3 - 3/8	7 J	18-04- 2021	25-04-2021	T=30.4 V=4934	24.6 553.7	20.91
0/3 - 3/8	7 J	18-04- 2021	25-04-2021	T=30.7 V=4886	24.8 560.1	21.08
0/3 - 3/8	14 J	18-04- 2021	02-05-2021	T=32.4 V=4630	23.8 608.3	20.23
0/3 - 3/8	14 J	18-04- 2021	02-05-2021	T=32.6 V=4601	26.3 672.9	22.35
0/3 - 3/8	14 J	18-04- 2021	02-05-2021	T=32.2 V=4658	26.9 688.9	22.85
0/3 - 3/8	28 J	18-04- 2021	15-05-2021	T=30.2 V=4967	28.5 641.5	24.22
0/3 - 3/8	28 J	18-04- 2021	15-05-2021	T=29.4 v=5102	32.9 741.4	27.96
0/3 - 3/8	28 J	18-04- 2021	15-05-2021	T=27.6 V=5300	31 720.3	25.35

Tableau II.26 : Formulation n°01 avec correction

Chapitre 02

Formulation N °02	temps	date de collage	Date eassai (ultrason/ écrasement)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de écrasement (MPA) / (KN)	Résistance par ultrason (MPA)
0/3 - 15/25	7 J	17-04- 2021	24-04-2021	T= 28.9 V= 5190	23.4 527.6	19.89
0/3 - 15/25	7 J	17-04- 2021	24-04-2021	T=29.9 V=5017	25 564.5	21.25
0/3 - 15/25	7 J	17-04- 2021	24-04-2021	T=29.9 V=5017	24 535.5	20.4
0/3 - 15/25	14 J	17-04- 2021	01-04-2021	T=30.4 V= 4934	23.2 592	19.72
0/3 - 15/25	14 J	17-04- 2021	01-04-2021	T= 29.7 V=5051	23.6 602	20.06
0/3 - 15/25	14 J	17-04- 2021	01-04-2021	T=28.4 V=5282	24.6 551.5	20.91
0/3 - 15/25	28 J	17-04- 2021	14-04-2021	T= 29.4 V= 5052	28.4 640.9	24.14
0/3 - 15/25	28 J	17-04- 2021	14-04-2021	T=30.1 V=4980	34 765.8	28.9
0/3 - 15/25	28 J	17-04- 2021	14-04-2021	T= 30.5 V= 4878	34.4 773.3	29.24

Tableau II.27 : Formulation n°02 avec correction

Chapitre 02

Formulation N °03	temps	date de collage	Date eassai (ultrason/ écrasement)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de écrasement (MPA) / (KN)	Résistance par ultrason (MPA)
0/3 - 8/15	7 J	20-04- 2021	27-04-2021	T=41.6 V= 3606	28 631.3	23.8
0/3 - 8/15	7 J	20-04- 2021	27-04-2021	T= 30.1 V= 4983	29.5 664.4	25.07
0/3 - 8/15	7 J	20-04- 2021	27-04-2021	T=31.4 V=4777	30.2 680	25.67
0/3 - 8/15	14 J	20-04- 2021	04-05-2021	T=30.2 V=4967	29.4 750.2	24.99
0/3 - 8/15	14 J	20-04- 2021	04-05-2021	T= 29.9 V= 5017	28.8 740.1	24.48
0/3 - 8/15	14 J	20-04- 2021	04-05-2021	T=29.9 V=5017	29.6 752.3	25.16
0/3 - 8/15	28 J	20-04- 2021	17-05-2021	T= 29.4 V=4550	37.9 853.9	32.21
0/3 - 8/15	28 J	20-04- 2021	17-05-2021	T= 30.2 V=4967	34.0 765.3	28.9
0/3 - 8/15	28 J	20-04- 2021	17-05-2021	T= 33.1 V= 4532	37.6 844.8	31.96

Tableau II.28 : Formulation n°03 avec correction

Chapitre 02

Formulation N °04	temps	date de collage	Date eassai (ultrason/ écrasement)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de écrasement (MPA) / (KN)	Résistance par ultrason (MPA)
0/3 - 8/15 3/8	7 J	21-04- 2021	28-04-2021	T=29.4 V=5102	19.9 509	16.91
1/3 - 8/15 3/8	7 J	21-04- 2021	28-04-2021	T=30.7 V= 4886	23.5 601.2	19.97
0/3 - 8/15 3/8	7 J	21-04- 2021	28-04-2021	T= 30.01 V=4976	23.6 601.2	20.06
0/3 - 8/15 3/8	14 J	21-04- 2021	05-05-2021	T=30.4 V=4934	32.0 720.6	27.2
0/3 - 8/15 3/8	14 J	21-04- 2021	05-05-2021	T= 30.6 V= 4902	31.3 704.8	26.6
0/3 - 8/15 3/8	14 J	21-04- 2021	05-05-2021	T= 32.9 V=4959	31.7 710.5	26.94
0/3 - 8/15 3/8	28 J	21-04- 2021	18-05-2021	T=29.4 V=4559	33.6 757.2	28.56
0/3 - 8/15 3/8	28 J	21-04- 2021	18-05-2021	T= 30.2 V= 4967	35.4 800	30.09
0/3 - 8/15 3/8	28 J	21-04- 2021	18-05-2021	T=29.8 V= 5007	34.3 780	29.24

Tableau II.29 : Formulation n°04 avec correction

Chapitre 02

Formulation N °05	temps	date de collage	Date eessai (ultrason/ écrasement)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de écrasement (MPA) / (KN)	Résistance par ultrason (MPA)
0/3 - 3/8 15/25	7 J	22-04- 2021	29-04-2021	T=27.9 V= 5376	26.8 685.4	22.78
0/3 - 3/8 15/25	7 J	22-04- 2021	29-04-2021	T= 27.9 V= 5376	28.9 738.5	24.56
0/3 - 3/8 15/25	7 J	22-04- 2021	29-04-2021	T=28 V= 5246	33.5 855.5	28.47
0/3 - 3/8 15/25	14 J	22-04- 2021	06-05-2021	T= 28.4 V=5282	33.7 760	28.64
0/3 - 3/8 15/25	14 J	22-04- 2021	06-05-2021	T=28.1 V= 5338	31 698.4	26.35
0/3 - 3/8 15/25	14 J	22-04- 2021	06-05-2021	T=27.4 V=5474	37.3 839.8	31.7
0/3 - 3/8 15/25	28 J	22-04- 2021	19-05-2021	T= 29.9 V= 5576	37.3 860	31.7
0/3 - 3/8 15/25	28 J	22-04- 2021	19-05-2021	T=26.3 V= 5703	38.4 874	32.64
0/3 - 3/8 15/25	28 J	22-04- 2021	19-05-2021	T= 26.5 V=5660	39.7 895	33.74

Tableau II.30 : Formulation n°05 avec correction

Chapitre 02

Formulation N °06	temps	date de collage	Date eassai (ultrason/ écrasement)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de écrasement (MPA) / (KN)	Résistance par ultrason (MPA)
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	7 J	24-04- 2021	01-05-2021	T=27.9 V= 5376	22.6 578.4	19.21
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	7 J	24-04- 2021	01-05-2021	T= 29.2 V= 5137	29.1 742.5	24.73
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	7 J	24-04- 2021	01-05-2021	T= 29.1 V= 5115	26.3 671.7	22.35
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	14 J	24-04- 2021	08-05-2021	T=29.6 V=5068	36.1 812.3	30.68
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	14 J	24-04- 2021	08-05-2021	T=28.1 V=5338	38.4 874.5	32.64
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	14 J	24-04- 2021	08-05-2021	T=28.9 V=5190	31.1 700	26.43
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	28 J	24-04- 2021	20-05-2021	T= 27.5 V=5454	38.1 870	32.38
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	28 J	24-04- 2021	20-05-2021	T=27.2 V= 5514	40.22 902	34.18
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	28 J	24-04- 2021	20-05-2021	T=26.7 V=5434	41.1 912	34.93

Tableau II.31 : Formulation n°06 avec correction

Chapitre 03 :

analyse de résultat

Chapitre 03

III-1 Résultat Pour La Formulation N°01 :

- Résultat Ultrason (Vitesse Et Résistance)

M V (kg/m ³)	Eprouvette 15*15*15 cm				
2500	D (cm)	T (μ s)	V (m/s)	Ed (MPa)	RC (bars)
2500	15	31,5	4823,0	51919,3	255,1
2500	15	30,4	4934,0	54336,6	260,2
2500	15	30,7	4886,0	53284,4	258,0
2500	15	32,4	4630,0	47847,2	247
2500	15	32,60	4600,0	47229,1	246
2500	15	32,20	4658,4	48435,6	248
2500	15	30,20	4966,9	55063,4	262
2500	15	29,40	5102,0	58100,8	268
2500	15	27,60	5434,8	65926,3	286

Tab III.1 : Formulation n°01 / Résultat Ultrason vitesse et BAR

Formulatio n N°01	Temp s	Date de collage	Date eassai (ultrason /Comprissio n)	Résultats d'Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résistance par Ultrason (MPa)	Résistance par Ecrasement C / 16*32 (mpa)
0/3 - 3/8	7 J	18-04- 2021	25-04-2021	T=31.1 V=4823	25.51	21.59
0/3 - 3/8	7 J	18-04- 2021	25-04-2021	T=30.4 V=4934	26.0	20.91
0/3 - 3/8	7 J	18-04- 2021	25-04-2021	T=30.7 V=4886	28.5	21.08
0/3 - 3/8	14 J	18-04- 2021	02-05-2021	T=32.4 V=4630	24.7	20.23
0/3 - 3/8	14 J	18-04- 2021	02-05-2021	T=32.6 V=4601	24.6	22.35
0/3 - 3/8	14 J	18-04- 2021	02-05-2021	T=32.2 V=4658	24.8	22.85
0/3 - 3/8	28 J	18-04- 2021	15-05-2021	T=30.2 V=4967	26.2	24.22
0/3 - 3/8	28 J	18-04- 2021	15-05-2021	T=29.4 V=5102	26.8	27.96
0/3 - 3/8	28 J	18-04- 2021	15-05-2021	T=27.6 V=5300	28.6	26.35

Tab III.2: Formulation n°01 (sable 0/3 concasse + gravier 3/8)

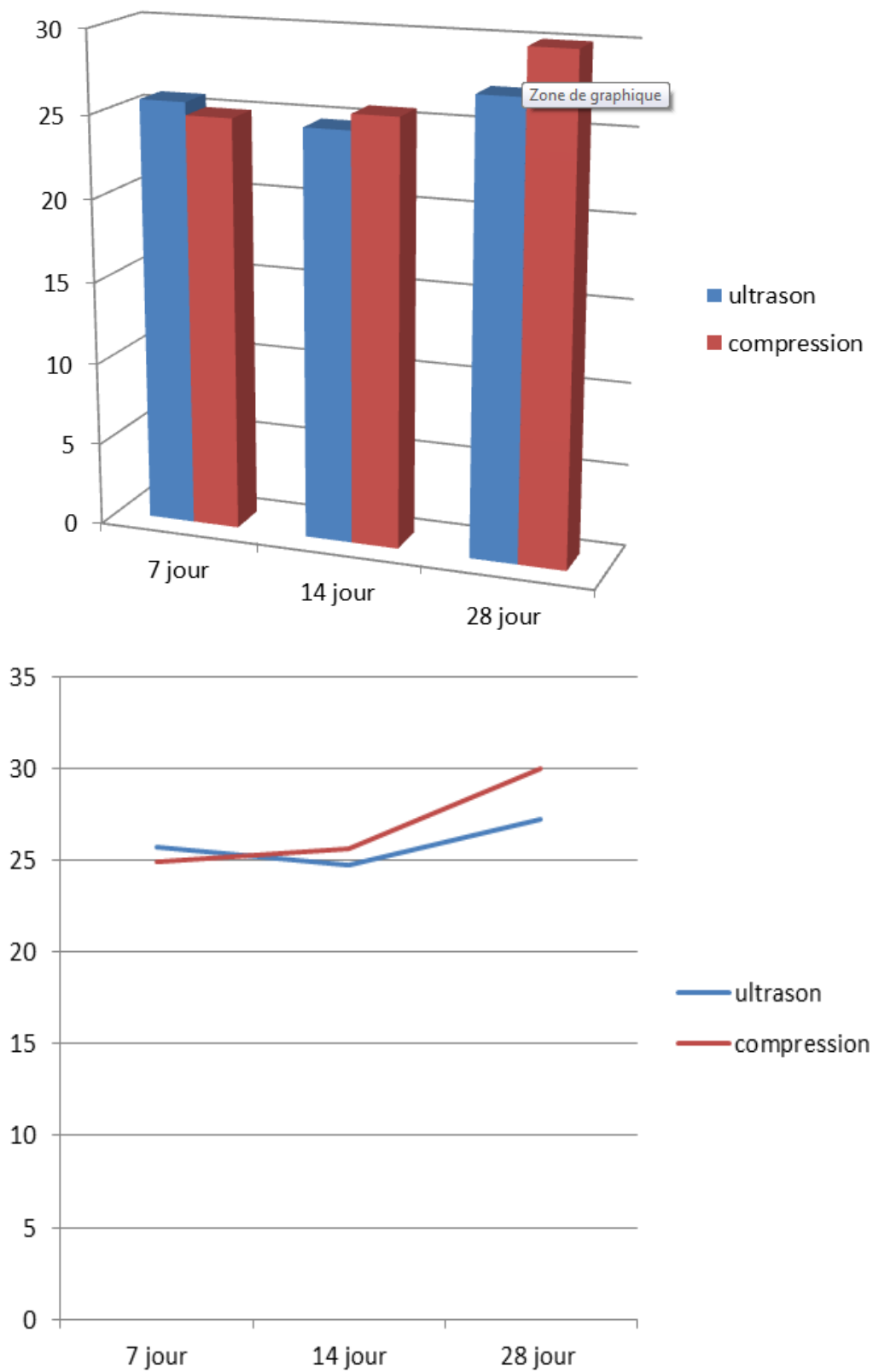


Fig III.2 : Comparaison des résultats de Ecrasement et Ultrason N°01 R(mpa)/T(jour)

Chapitre 03

III.2 Résultat Pour La Formulation N°02 :

- Résultat Ultrason (Vitesse Et Résistance)

M V (kg/m3)	Eprouvette 15*15*15 cm				
2500	D (cm)	T (μ s)	V (m/s)	Ed (MPA)	RC (bars)
2500	15	28,9	5190,0	51919,3	255,1
2500	15	29,9	5016,7	54336,6	260,2
2500	15	29,9	5016,7	54336,6	260,2
2500	15	30,4	4934,0	54336,6	260
2500	15	29,70	4600,0	47229,1	246
2500	15	28,40	5281,7	48435,6	248
2500	15	29,40	5102,0	58100,8	268
2500	15	30,10	4983,4	55429,9	263
2500	15	30,50	4918,0	53985,5	259

Tab III.3 : Formulation n°02 / Résultat Ultrason vitesse et BAR

Formulation n°02	temps	Date de collage	Date essai (ultrason / Comprission)	Résultats de Ultrason (T = μ s/ V=m/s)	Résultats de Ultrason (MPA)	Résultats de Ecrasement (mpa/kn)	Résultats Ecrasement C / 16*32 (mpa)
0/3 - 15/25	7 J	17-04-2021	24-04-2021	T=28.9 V= 5190	25.51	23.4 527.6	19.89
0/3 - 15/25	7 J	17-04-2021	24-04-2021	T=29.9 V=5017	26.02	25 564.5	21.25
0/3 - 15/25	7 J	17-04-2021	24-04-2021	T=29.9 V=5017	26.02	24 535.5	20.4
0/3 - 15/25	14 J	17-04-2021	01-04-2021	T=30.4 V= 4934	26	23.2 592	19.72
0/3 - 15/25	14 J	17-04-2021	01-04-2021	T= 29.7 V=5051	24.6	23.6 602	20.06
0/3 - 15/25	14 J	17-04-2021	01-04-2021	T=28.4 V=5282	24.8	24.6 551.5	20.91
0/3 - 15/25	28 J	17-04-2021	14-04-2021	T= 29.4 V= 5052	26.8	28.4 640.9	24.14
0/3 - 15/25	28 J	17-04-2021	14-04-2021	T=30.1 V=4980	26.3	34 765.8	28.9
0/3 - 15/25	28 J	17-04-2021	14-04-2021	T= 30.5 V= 4878	25.9	34.4 773.3	29.24

Tab III.4 : Formulation n°02 (sable 0/3 concasse + gravier 15/25)

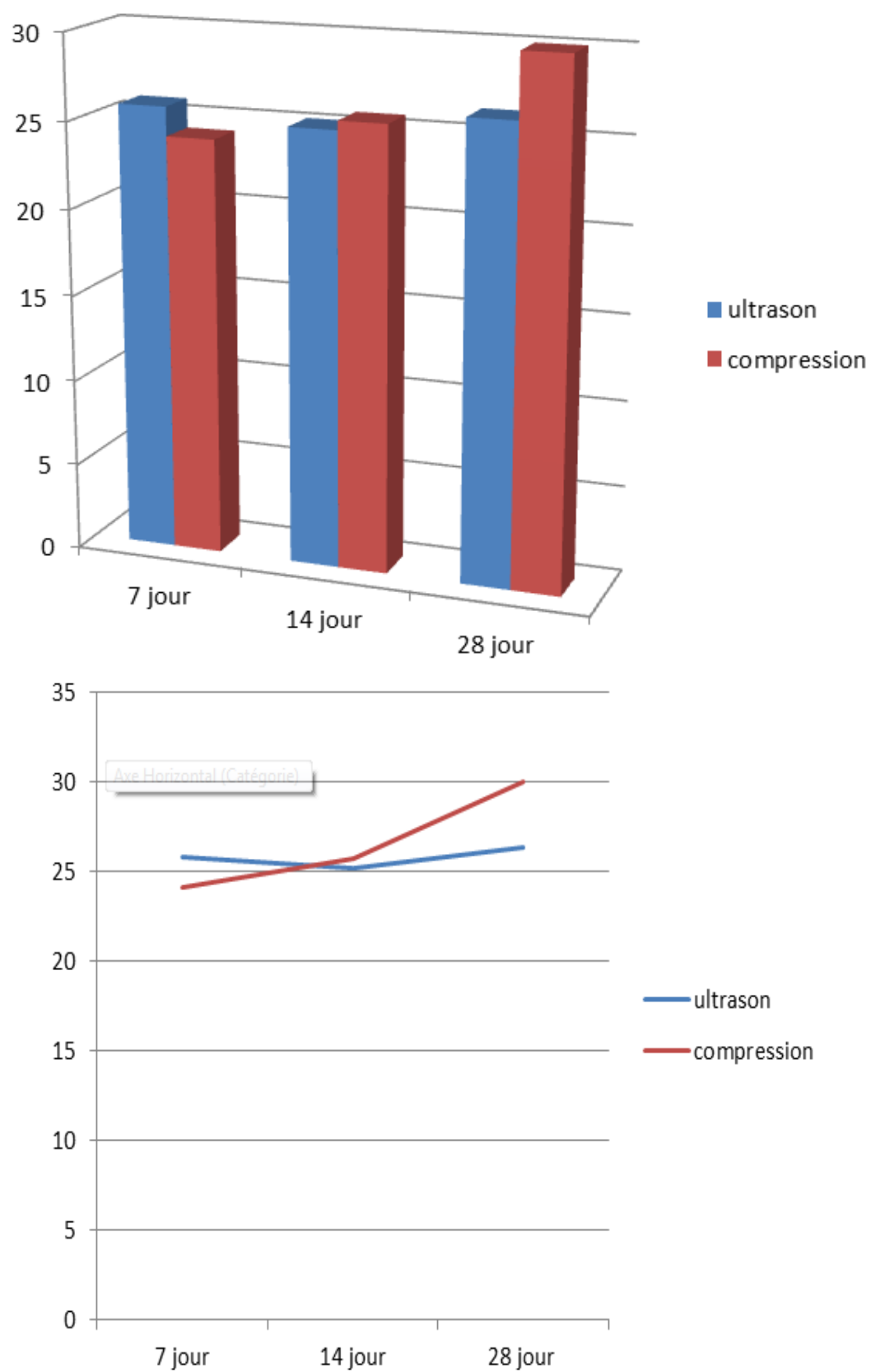


Fig III.3 : Comparaison des résultats de **Ecrasement** et **Ultrason N°02 R(mpa)/T(jour)**

Chapitre 03

III-3 Résultat Pour La Formulation N°03 :

- Résultat Ultrason (Vitesse Et Résistance)

Eprouvette 15*15*15 cm					
M V (kg/m ³)	D (cm)	T (μ s)	V (m/s)	Ed (MPa)	RC (bars)
2500	15	27,9	5376,0	64507,9	282,8
2500	15	27,9	5376,0	64507,9	282,8
2500	15	28	5246,0	61425,8	275,7
2500	15	28,1	5338,0	63599,2	274
2500	15	28,40	5282,0	62271,7	278
2500	15	27,40	5474,5	66892,2	288
2500	15	29,90	5576,0	69396,8	268
2500	15	26,30	5703,4	72604,8	302
	15	26,50	5660,4	71513,0	299

Tab III.5 : Formulation n°03 / Résultat Ultrason vitesse et BAR

Formulation n n °03	temps	Date de collage	Date eessai (ultrason / Comprission)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de Ultrason (MPa)	Résultats de Ecrasement (mpa/kn)	Résultats Ecrasement C / 16*32 (MPa)
0/3 - 8/15	7 J	20-04-2021	27-04-2021	T=41.6 V= 3606	28.28	28 631.3	23.8
0/3 - 8/15	7 J	20-04-2021	27-04-2021	T= 30.1 V= 4983	28.28	29.5 664.4	25.07
0/3 - 8/15	7 J	20-04-2021	27-04-2021	T=31.4 V=4777	27.57	30.2 680	25.67
0/3 - 8/15	14 J	20-04-2021	04-05-2021	T=30.2 V=4967	27.4	29.4 750.2	33.49
0/3 - 8/15	14 J	20-04-2021	04-05-2021	T= 29.9 V= 5017	27.8	28.8 740.1	24.48
0/3 - 8/15	14 J	20-04-2021	04-05-2021	T=29.9 V=5017	28.8	29.6 752.3	25.16
0/3 - 8/15	28 J	20-04-2021	17-05-2021	T= 29.4 V=4550	26.8	37.9 853.9	32.21
0/3 - 8/15	28 J	20-04-2021	17-05-2021	T= 30.2 V=4967	30.2	34.0 765.3	28.9
0/3 - 8/15	28 J	20-04-2021	17-05-2021	T= 33.1 V= 4532	29.9	37.6 844.8	31.96

Tab III.6: Formulation n°03 (sable 0/3 concasse + gravier 8/15)

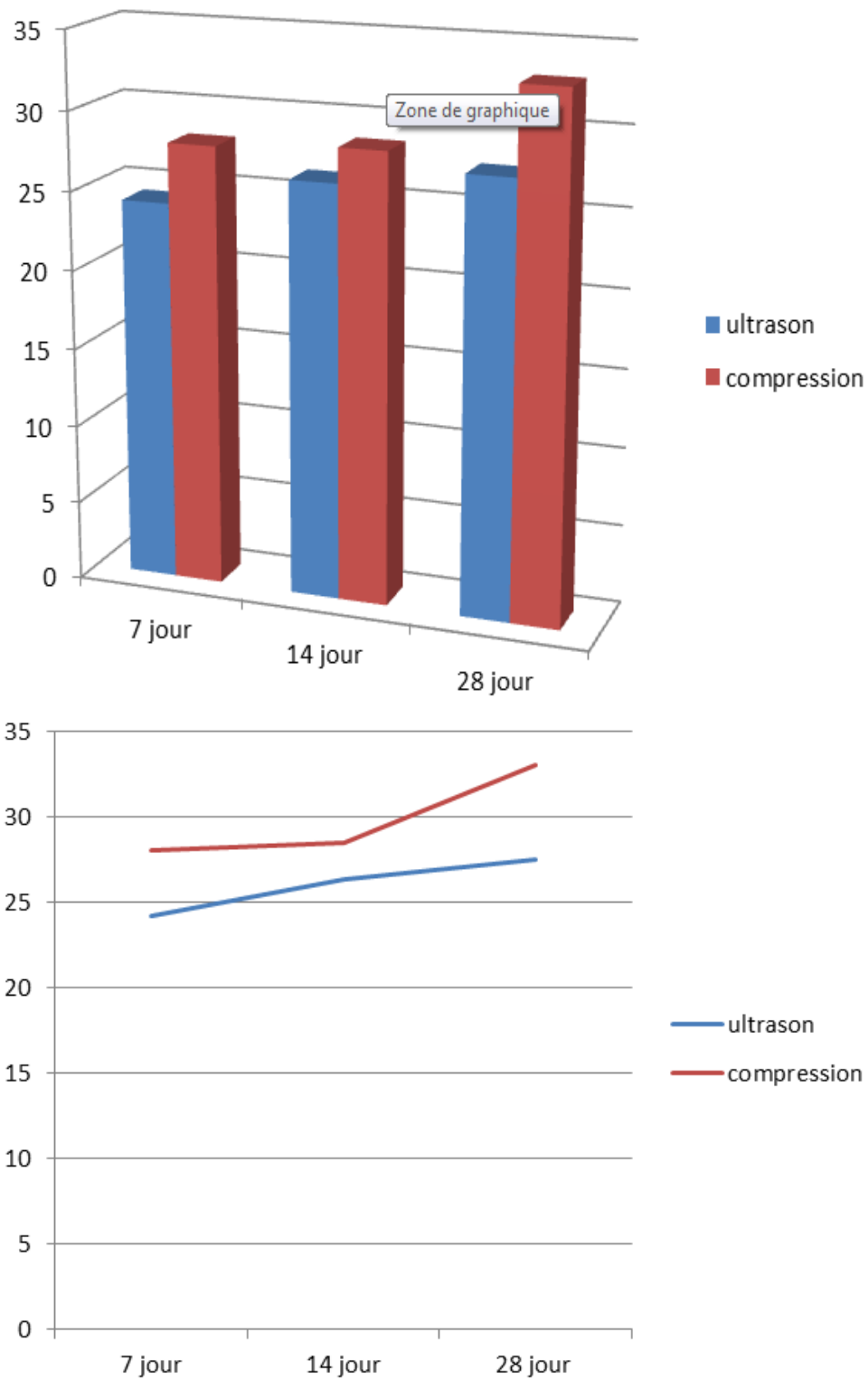


Fig III.4 : Comparaison des résultats de Ecrasement et Ultrason N°03 R(mpa)/T(jour)

Chapitre 03

III-4 Résultat Pour La Formulation N°04 :

- Résultat Ultrason (Vitesse Et Résistance)

M V (kg/m3)	Eprouvette 15*15*15 cm				
	D (cm)	T (μ s)	V (m/s)	Ed (MPA)	RC (bars)
2500	15	29,4	5102,0	58099,9	268,3
2500	15	30,7	4886,0	53284,5	258,0
2500	15	30,1	4886,0	53284,5	258,0
2500	15	30,4	4976,0	55265,6	260
2500	15	30,60	4902,0	53634,1	259
2500	15	32,90	4559,3	46396,5	244
2500	15	29,40	4559,0	46391,0	244
2500	15	30,20	4966,9	55063,4	262
	15	29,80	5033,6	56551,5	265

Tab III.7 : Formulation n°04 / Résultat Ultrason vitesse et BAR

Formulation n °04	temp s	Date de collage	Date eassai ultrason/ comprissio n	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de Ultrason (mpa)	Résultats de Ecrasement (mpa/kn)	Résultats Ecrasement C / 16*32 (mpa)
0/3 - 8/15 3/8	7 J	21-04-2021	28-04-2021	T=29.4 V=5102	26.83	19.9 509	16.91
0/3 - 8/15 3/8	7 J	21-04-2021	28-04-2021	T=30.7 V=4886	25.80	23.5 601.2	19.97
0/3 - 8/15 3/8	7 J	21-04-2021	28-04-2021	T= 30.01 V=4976	25.80	23.6 601.2	20.06
0/3 - 8/15 3/8	14 J	21-04-2021	05-05-2021	T=30.4 V=4934	26	32.0 720.6	27.2
0/3 - 8/15 3/8	14 J	21-04-2021	05-05-2021	T= 30.6 V= 4902	25.9	31.3 704.8	26.6
0/3 - 8/15 3/8	14 J	21-04-2021	05-05-2021	T= 32.9 V=4959	24.4	31.7 710.5	26.94
0/3 - 8/15 3/8	28 J	21-04-2021	18-05-2021	T=29.4 V=4559	24.4	33.6 757.2	28.56
0/3 - 8/15 3/8	28 J	21-04-2021	18-05-2021	T= 30.2 V= 4967	26.2	35.4 800	30.09
0/3 - 8/15 3/8	28 J	21-04-2021	18-05-2021	T=29.8 V= 5007	26.5	34.3 780	29.24

Tab III.8 : Formulation n°04 (sable DJAMAA + gravier 3/8 + gravier 8/15)

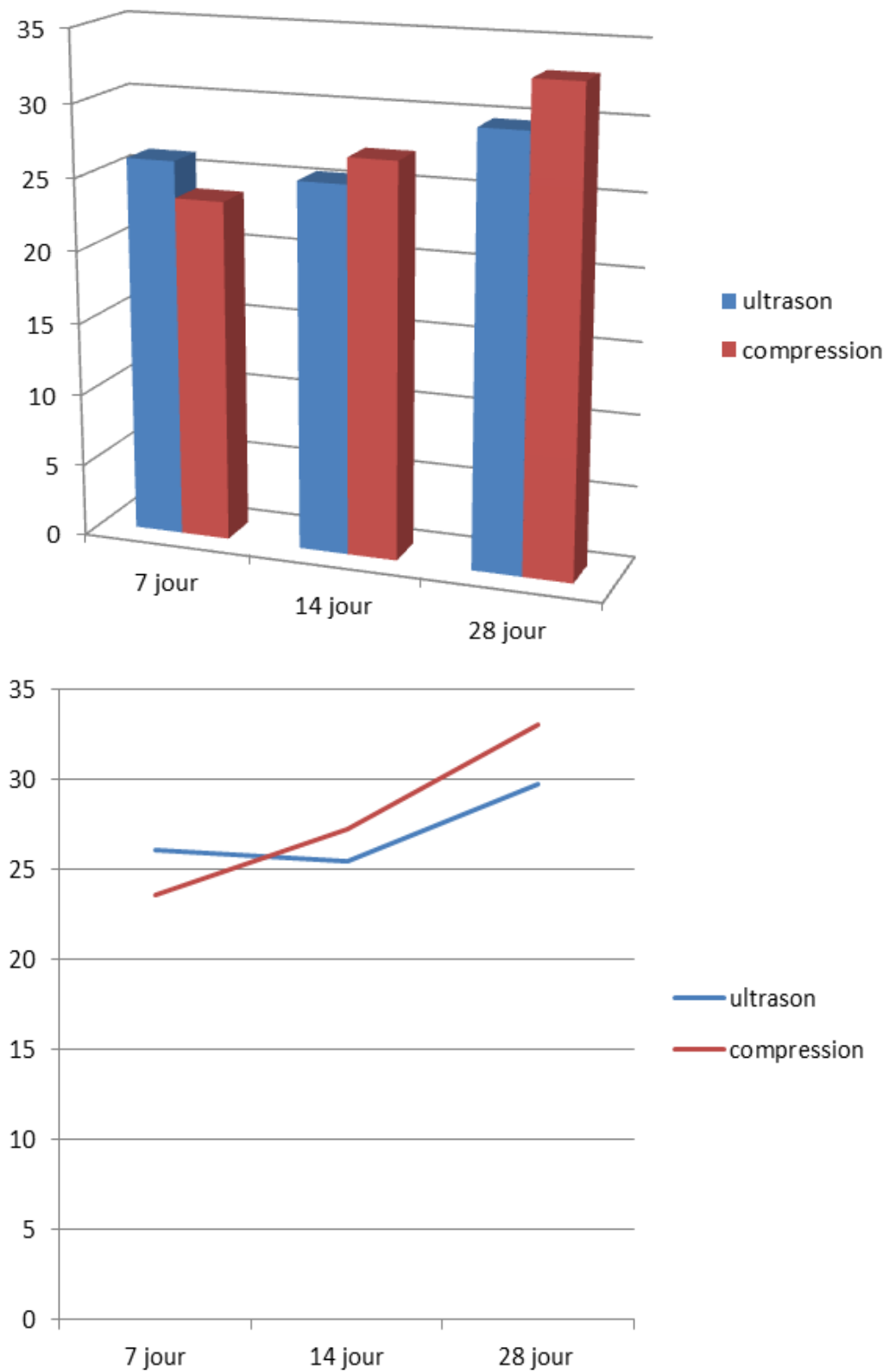


Fig III.5 : Comparaison des résultats de Ecrasement et Ultrason N°04 R(mpa)/T(jour)

Chapitre 03

III-5 Résultat Pour La Formulation N°05 :

- Résultat Ultrason (Vitesse Et Résistance)

Eprouvette 15*15*15 cm					
M V (kg/m3)	D (cm)	T (μ s)	V (m/s)	Ed (MPA)	RC (bars)
2500	15	41,6	3606,0	29023,2	211,6
2500	15	30,1	4983,0	55421,2	262,5
2500	15	31,1	4777,0	50933,6	253,1
2500	15	30,2	4967,0	55065,9	262
2500	15	29,90	5017,0	56180,1	264
2500	15	29,90	5016,7	56173,9	264
2500	15	29,40	4559,0	46391,0	244
2500	15	30,20	4966,9	55063,4	262
	15	33,10	4531,7	45837,5	243

Tab III.9 : Formulation n°05 / Résultat Ultrason vitesse et BAR

Formulation n°05	temps	Date de collage	Date eassai ultrason/ comprission	Résultat s de Ultrason (mpa)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de Ecrasement (MPA) / (KN)	Résultats Ecrasement C / 16*32 (mpa)
0/3 - 3/8 15/25	7 J	22-04-2021	29-04-2021	T=27.9 V= 5376	21.16	26.8 685.4	22.78
0/3 - 3/8 15/25	7 J	22-04-2021	29-04-2021	T= 27.9 V= 5376	26.25	28.9 738.5	24.56
0/3 - 3/8 15/25	7 J	22-04-2021	29-04-2021	T=28 V= 5246	25.31	33.5 855.5	28.47
0/3 - 3/8 15/25	14 J	22-04-2021	06-05-2021	T= 28.4 V=5282	26.2	33.7 760	28.64
0/3 - 3/8 15/25	14 J	22-04-2021	06-05-2021	T=28.1 V= 5338	26.4	31 698.4	26.35
0/3 - 3/8 15/25	14 J	22-04-2021	06-05-2021	T=27.4 V=5474	26.4	37.3 839.8	31.7
0/3 - 3/8 15/25	28 J	22-04-2021	19-05-2021	T= 29.9 V= 5576	24.4	37.3 860	31.7
0/3 - 3/8 15/25	28 J	22-04-2021	19-05-2021	T=26.3 V= 5703	26.2	38.4 874	32.64
0/3 - 3/8 15/25	28 J	22-04-2021	19-05-2021	T= 26.5 V=5660	24.3	39.7 895	33.74

Tab III.10 : Formulation n°05 (sable DJAMAA + gravier 3/8 +gravier 15/25)

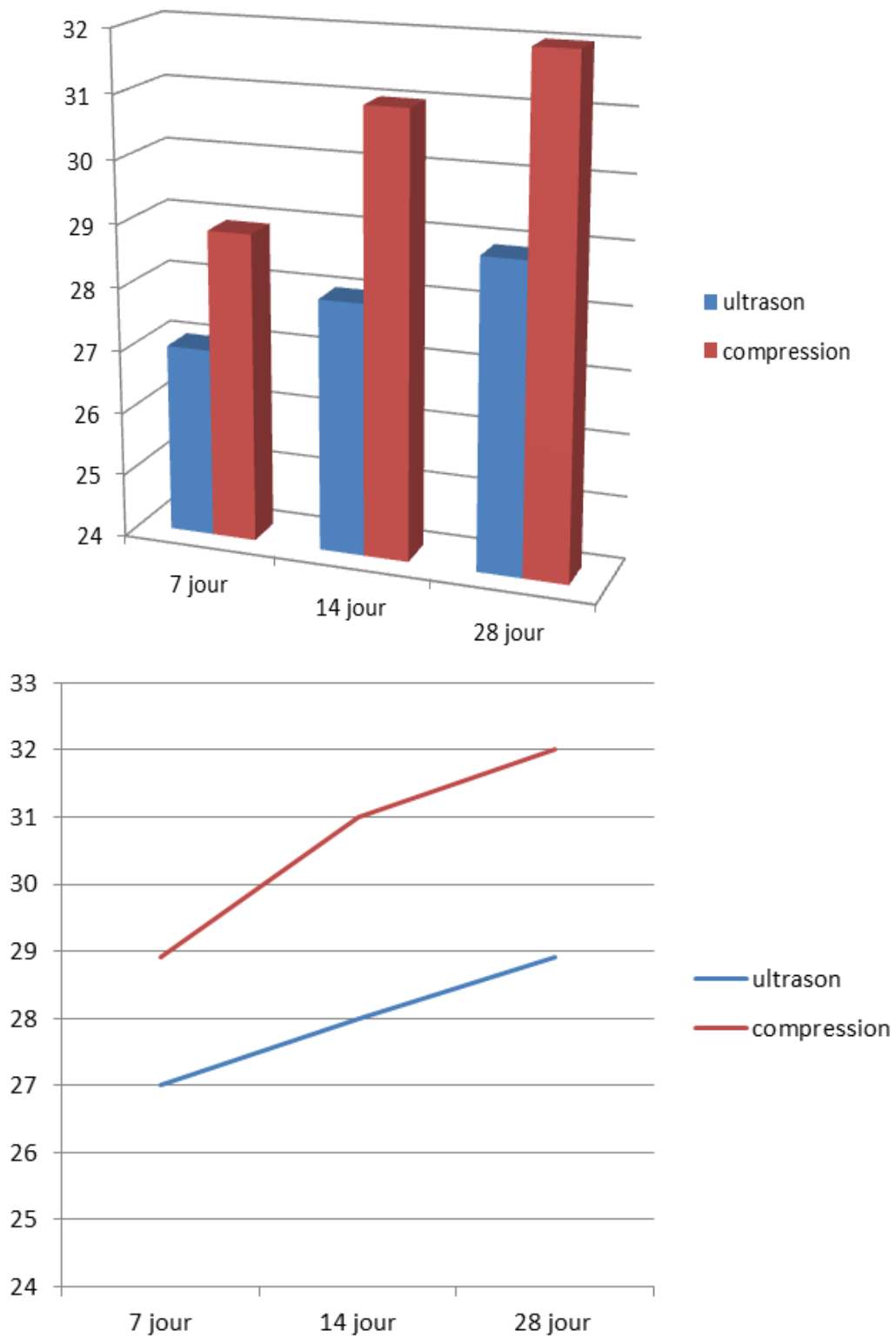


Fig III.6 : Comparaison des résultats de Ecrasement et Ultrason N°05 R(mpa)/T(jour)

Chapitre 03

III-6 Résultat Pour La Formulation N°06 :

- Résultat Ultrason (Vitesse Et Résistance)

Epreuve 15*15*15 cm					
M V (kg/m ³)	D (cm)	T (μs)	V (m/s)	Ed (MPa)	RC (bars)
2500	15	27,9	5376,0	64507,9	282,8
2500	15	29,2	5137,0	58899,7	270,1
2500	15	29,1	5115,0	58396,3	269,0
2500	15	29,6	5068,0	57328,1	274
2500	15	28,10	5282,0	62271,7	278
2500	15	28,90	5190,3	60128,6	273
2500	15	27,50	5454,0	66393,3	285
2500	15	27,20	5514,7	67879,5	291
	15	26,70	5618,0	70445,7	297

Tab III.11 : Formulation n°06/ Résultat Ultrason vitesse et BAR

Formulation n°06	temp s	Date de collage	Date eessai (ultrason / Comprission)	Résultats de Ultrason (T =us/ V=m/s)	Résultats de Ultrason (MPa)	Résultats de Ecrasement (MPa) / (KN)	Résultats Ecrasement C / 16*32 (mpa)
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	7 J	24-04-2021	01-05-2021	T=27.9 V= 5376	28.28	22.6 578.4	19.21
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	7 J	24-04-2021	01-05-2021	T= 29.2 V= 5137	27.01	29.1 742.5	24.73
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	7 J	24-04-2021	01-05-2021	T= 29.1 V= 5115	26.9	26.3 671.7	22.35
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	14 J	24-04-2021	08-05-2021	T=29.6 V=5068	27.4	36.1 812.3	30.68
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	14 J	24-04-2021	08-05-2021	T=28.1 V=5338	27.8	38.4 874.5	32.64
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	14 J	24-04-2021	08-05-2021	T=28.9 V=5190	27.3	31.1 700	26.43
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	28 J	24-04-2021	20-05-2021	T= 27.5 V=5454	28.5	38.1 870	32.38
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	28 J	24-04-2021	20-05-2021	T=27.2 V= 5514	29.1	40.22 902	34.187
0/3 - 3/8 8/15 - 15/25	28 J	24-04-2021	20-05-2021	T=26.7 V=5434	29.7	41.1 912	34.93

Tab III.12 : Formulation n°06 (sable DJAMAA + gravier 3/8 + gravier 8/15 + gravier 15/25)

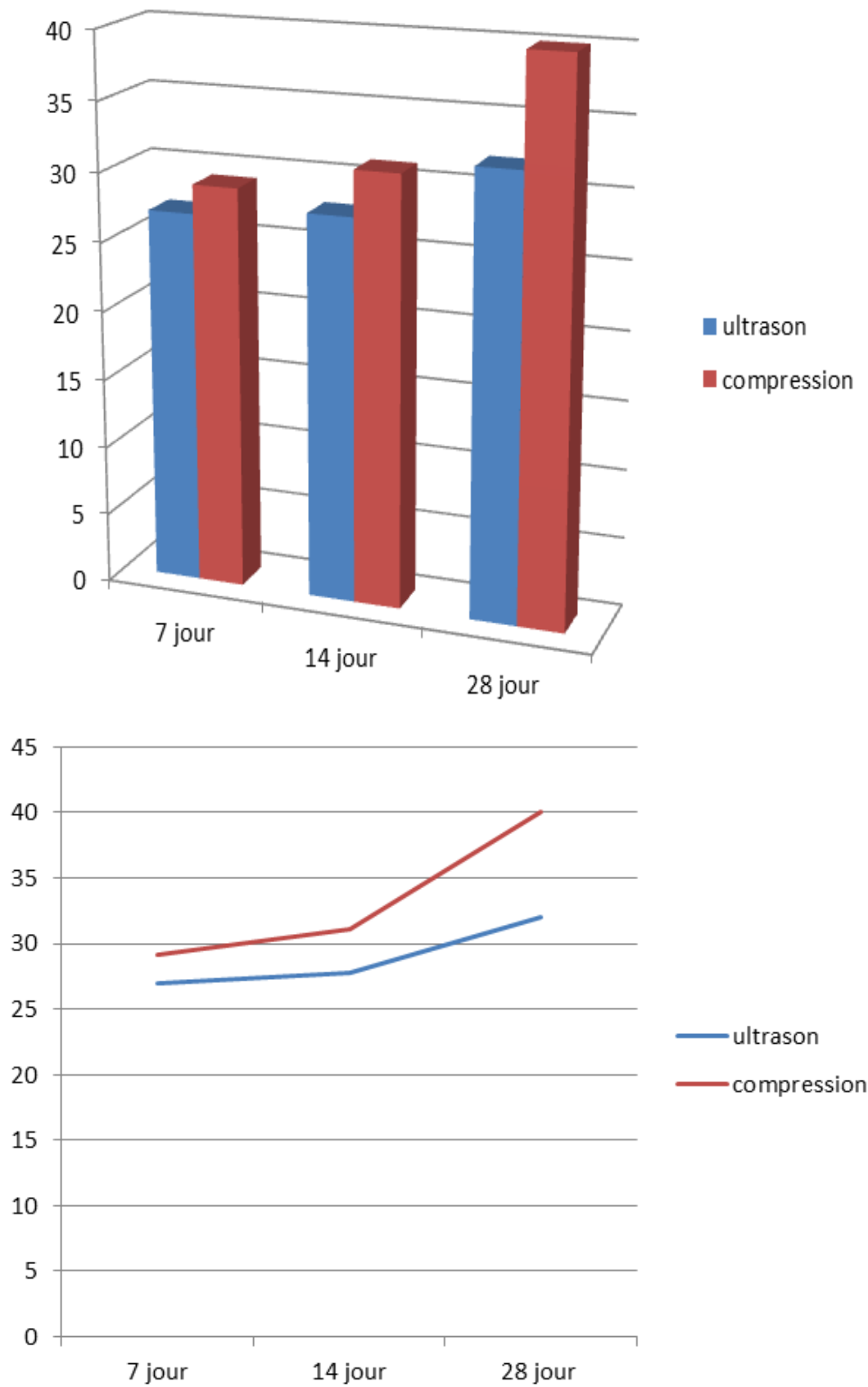


Fig III.7 : Comparaison des résultats de **Ecrasement** et **Ultrason N°06 R(mpa)/T(jour)**

Analyse des résultats:

1- Variation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse ultrasonore

La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats.

Les 6 Tableaux (Résultat Ultrason (Vitesse Et Résistance)) présentent l'ensemble des valeurs de chaque éprouvette de la résistance mécanique en compression à 28 jours et des vitesses des ultrasons associées. Il est à noter que la résistance à la compression varie d'une formulation à une autre. En effet, la vitesse des ondes dépend du module d'élasticité du granulat utilisé et de la quantité qu'en contient le béton. Il n'existe donc pas de relation unique entre la résistance à la compression et la vitesse des ondes sonores. Cependant, pour un granulat donné et une composition donnée, la vitesse de propagation des ondes dépend des modifications de la pâte de ciment durci, tel qu'un changement du rapport eau/ciment influe sur le module d'élasticité de la pâte. Aussi les ondes se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vite rempli d'air. Par conséquent, les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes. On peut conclure que c'est difficile de trouver une relation entre la vitesse ultrason et la résistance à la compression car la vitesse est influencée par plusieurs paramètres rentrant dans la composition du béton.

2- Variation de la résistance à la compression par écrasement et par ultrason en fonction du temps

Les 6 autres Tableaux [Résultat Pour Les Formulations N°1/2/3/4/5/6] montrent la variation de la résistance à la compression par écrasement et par ultrason en fonction du temps pour 6 formulations du béton. L'évolution des résistances en fonction de l'accroissement de la durée de durcissement pour toutes les compositions est bien constatée mais avec des cinétiques différentes. Nous remarquons que les résistances augmentent au cours d'âge jusqu'à ce que le béton atteigne sa résistance normale après environ 28 jours. Cette valeur est atteinte après la stabilisation des réactions entre les différents constituants du béton. Cela signifie qu'il a fini de durcir. Le béton continue certes à durcir après 28 jours, mais de manière si faible que presque rien ne change à sa résistance. La poursuite de son durcissement n'a donc aucun impact sur les propriétés du béton et sa résistance normale atteinte après 28 jours est totalement suffisante sur le chantier.

Chapitre 03

Chacun des Six formulations atteint un pourcentage de la résistance normale par écrasement dans le septième et le quatorzième jour. Ceci est dû à la variation de la composition du béton qui influe sur plusieurs paramètres. Ces pourcentages sont montrés dans le tableau III.2

Numéro de la formulation	1	2	3	4	5	6
% de R (7J)	81	73	80	64.8	77.3	69.5
% de R (14J)	83.3	75	89.5	91.8	88.4	88.4

Tableau III.2 : Variation du pourcentage de la résistance normale par écrasement atteint en 7J et 14J pour les différentes formulations

Nous constatons aussi que les bétons 1 et 2 ont des résistances par écrasement moyennes très proches après 28 jours. De même pour les bétons 3 et 4 mais meilleurs que les bétons 1 et 2. Les meilleures performances sont obtenues avec les bétons 5(sable DJAMAA + gravier 3/8 +gravier 15/25) et 6 (sable DJAMAA + gravier 3/8 + gravier 8/15 + gravier 15/25) avec des résistances les plus élevées.

3 -Variation de la résistance à la compression par écrasement et par ultrason en fonction du temps

Les figures (courbes) montrent la variation de la résistance à la compression par écrasement et un par ultrason au cours du temps jusqu'à ce que le béton atteigne sa résistance normale après environ 28 jours. Nous constatons que la résistance par écrasement augmente avec temps. En effet, l'augmentation de la résistance par écrasement est due à l'instabilité des réactions entre les différents constituants du béton. Pour la résistance par ultrason, on observe que l'augmentation est très légère avec l'âge. Ce résultat peut être expliqué par l'absence des fissures dans la matrice cimentaire vu que la méthode ultrason est une technique non destructive. Ces résistances varient aussi d'un échantillon à un autre car la résistance est influencée par la composition du béton. Il est à noter qu'il y a un écart entre les courbes des résistances par écrasement et les résistances par ultrason. Cet écart peut être expliqué l'imprécision de la technique par ultrason. En effet, les deux méthodes par écrasement et par ultrason sont complémentaires car la première donne des valeurs réelles de la résistance et la deuxième est une méthode facile à mettre en œuvre et n'endommage pas le béton. Pour cela plusieurs formules reliant les deux résistantes ont été élaborées dans la littérature.

conclusion

Conclusion générale

La résistance à la compression à 28 jours est la principale caractéristique utilisée pour caractériser l'évolution des propriétés mécaniques du béton.

Des essais de compression ont été réalisés pour six formules de bétons à 7 jours, 14 jours et 28 jours de la date de la confection des éprouvettes dans le but de poursuivre l'évolution de la résistance à la compression par écrasement et par ultrason du béton au cours du temps et en fonction de la vitesse ultrasonore. A chaque âge, six éprouvettes sont testées.

Dans ce travail, nous avons présentés les essais expérimentaux de 6 échantillons de béton. Les variations de la résistance à la compression par écrasement et par ultrason du béton au cours du temps et en fonction de la vitesse ultrasonore ont été étudiées. Les résultats montrent que :

- La vitesse ultrasonore est influencée la composition du béton.
- Les meilleures performances sont obtenues avec les bétons 5 (sable DJAMAA + gravier 3/8 +gravier 15/25) et 6 (sable DJAMAA + gravier 3/8 + gravier 8/15 + gravier 15/25) avec des résistances les plus élevées.

Références

Références bibliographiques

[NET1]

- <http://thesis.univ-biskra.dz/1328/5/partieI%20chapitre%2003.pdf>

[1].

- Marc Goueygou, Fethi Soltani, Zoubeir Lafhaj, Bogdan Piwakowski, Pawel Safinowski, Jean-Paul Balayssac (2007), « Relation entre la vitesse ultrasonore et la porosité dans le mortier et le béton ». Groupe Electrique-Acoustique, IEMN DOAE UMR CNRS 8520, Ecole Centrale de Lille ; Laboratoire de Mécanique de Lille, LML
- UMR CNR CNRS 8107, Ecole Centrale de Lille ; Laboratoire matériaux et durabilité des constructions, INSA de Toulouse.

[2].

- Fethi Soltani¹, Zoubeir Lafhaj¹, Marc Goueygou, (2007), « Etude expérimentale de la propagation de l'onde de surface dans un milieu poreux sec et saturé ». LML UMR CNRS 8107, Ecole Centrale de Lille ; IEMN DOAE UMR CNRS 8520, Ecole Centrale
- de Lille. Villeneuve d'Ascq, France.

[3].

- A .Lambert, Y .Pralus et J. Rivenez, (1997), « Ultrasons Propagation des ondes ultrasonores ». Niveau 2, Centre Technique des Industries Mécanique (CETIM), pp 43.

[4].

- SHAILESH GOKHALE, (2007), «Determination of applied stresses in rails using the acoustoelastic effect of ultrasonic Waves». Thesis of doctorat, Mumbai University,
- Mumbai, India.

[5].

- P. Safinowski, B. Piwakowski, J-P .Balayssac, M. Goueygou, A.Kosecki, (2007), « Contrôle non destructif du béton par ultrason a laide d'un dispositif automatisé ».
- Groupe Electrique-Acoustique, IEMN DOAE UMR CNRS 8520, Ecole centrale de Lille ; Laboratoire matériaux et durabilité des constructions (LMDC INSA-UPS).

[10].

- B. Redjel, 2004 «Mécanique des matériaux » cours DEUA 3 , Département Génie Civil, Université de Annaba.