



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

**Corrélation aux moyens des essais non
destructifs (END) et essai direct (ED) d'un
béton à base de matériaux locaux**

Dirigé par :

Pr: RAHMOUNI ZINE EL ABIDINE

Dr : BELOUADAH MESSAOUDA

Présenté par :

SOUICI MOUNIR

MOKRANI EL HASSEN

HICHAM

Promotion : 2018/2019.

Remerciements

D'abord, nous remercions Dieu, pour nous avoir permis d'acquérir ce savoir durant tout notre parcours, et permis d'arriver à ce stade du savoir

Aussi, noter encadreur, « Pr RAHMOUNI Zine El Abidine » et Co-encadreur, « Dr BELOUADAH Messaouda », qui nous ont soutenus et appuyé pour nos recherches ainsi que pour la réalisation de notre projet de fin d'étude.

A nos chers parents, qui nous ont longuement éduqués et veillé à notre réussite, incessamment encouragés pour qu'on puisse réaliser nos projets, puisse Dieu les garder en bonne santé.

A mes chers professeurs, aux membres du jury et au responsable de laboratoire matériaux de construction « Bakhti Yammna » ainsi qu'à mes amis « Omri Imen Yamina », « Dahmoun Malika Fouzia » et « Gharbi Faiza »

Nous remercions aussi, Dr MAZA, Dr BENYAHIA Abdessalem et Dr BAALI Laid pour nous avoir aidés et qui nous ont été aussi un bon conseil ainsi que l'ensemble des enseignants du département de génie civil.

Dédicaces

Nous dédions notre travail à nos chers parents,
Au savoir, espérant qu'il sera un outil de progrès aux prochaines
générations

A ma grande famille « MOKRANI » et « CHAKER » et
« SOUICI »

A nous frères et sœurs qui ont été toujours avec
moi dans mon cycle d'étude

Je le dédie aussi à mes amis : « Zinou, Mourad, Ali, Moâtassim
Tos, Tayeb et Abdelhamid » et mes amis de la cité universitaire

Et à tous mes amis de la promotion de Matériaux de
Construction et de Géotechnique « 2018-2019 »

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire s'articule autour de la formulation et de la recherche du béton ordinaire confectionnés à partir de déchets locaux pour voir l'effet de la nature du filler et l'effet de la variation de son pourcentage sur les propriétés physico-mécaniques à l'état durci afin d'évaluer la performance à court et long terme, au moyen des essais non destructifs afin d'établir des corrélations mathématiques reliant les grandeurs mesurées à ceux estimés. Pour cela, on a utilisé trois types de filler (poudre de verre, poudre de marbre et fumée de silice) avec des pourcentages variant entre 0, 5, 10, et 15%.

Les principaux résultats obtenus dans ce travail montrent que, l'utilisation de fillers pour l'amélioration des propriétés du béton à l'état frais et durci est appréciable pour l'amélioration de la fluidité et ainsi la résistance à la compression des bétons.

En général, nous pouvons dire que la variation du dosage de filler (marbre, verre et fumée de silice) conduit à une diminution de l'ouvrabilité, de la porosité et de l'absorption d'eau avec une augmentation de la résistance mécanique pour un rapport E/L variable. L'ajout du super plastifiant (MEDAPLAST SP40) donne des résultats très satisfaisants.

Les corrélations établies dans cette étude vont permettre d'évaluer les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons étudiés aux moyen d'essais non destructifs avec des erreurs acceptables.

Mots clés: bétons, superplastifiant, propriétés physiques et mécaniques, essais non destructifs, corrélations, poudre de verre, poudre de marbre et fumée de silice.

Abstract

The work presented in this thesis focuses on the formulation and research of ordinary concrete made from local waste to see the effect of the nature of the filler and its percentage variation on the physico-mechanical properties in the hardened state in order to evaluate the short and long term performance and these studies using non-destructive tests to make mathematical correlations between measured and estimated sizes. For this purpose, three types of filler (glass powder, marble powder and silica fume) were used with varying percentages from 0, 5, 10, and 15%.

The main results obtained in this work show that, the use of fillers for the improvement of the concrete properties in the fresh and hardened state is valuable for the improvement of the fluidity and thus the compressive strength (CS) of the concretes.

In general, we can say that variation of filler dosage (marble, glass and silica fume), leads to a decrease in workability, porosity and water absorption with increasing strength for a variable ratio E / L . the addition of the superplasticizer (Medaplasite SP40) gives very satisfactory results.

The carried out correlations in this study will allow to evaluate the physical and mechanical characteristics of the studied concretes using non-destructive tests with acceptable errors.

Keywords: Concrete, superplasticizer, physical and mechanical properties, non-destructive tests, correlations, silica fume, glass powder, marble powder.

ملخص

يركز العمل المقدم في هذه المدكرة على صياغة وبحث الخرسانة العادية المصنوعة من المخلفات المحلية لمعرفة تأثير طبيعة الحشو وتغير النسبة المئوية على الخواص الفيزيائية الميكانيكية في حالة التصلب من أجل تقييم الأداء على المدى القصير والطويل وتوضح هذه الدراسة تأثير نوع ونسبة الإضافات المعدنية على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة المصنوعة من المواد المحلية ، وكذلك استخدام الاختبارات غير المدمرة ميكانيكيا لإقامة علاقات رياضية بين المقاسات المقدر والمقدرة. لهذا الغرض ، تم استخدام ثلاثة أنواع من الحشو (مسحوق الزجاج ومسحوق الرخام و غبار السيليكا) بنسب تتراوح بين 0 و 5 و 10 و 15٪.

تشير النتائج الرئيسية التي تم الحصول عليها في هذا العمل إلى أن استخدام مواد الحشو لتحسين خواص الخرسانة في الحالة الطازجة والمصلبة أمر مهم لتحسين السيولة وبالتالي قوة الضغط للخرسانة.

بشكل عام ، يمكننا أن نقول أن تباين جرعة الحشو (الرخام والزجاج و غبار السيليكا) ، يؤدي إلى انخفاض في قابلية التشغيل ، والمسامية وامتصاص الماء مع زيادة القوة و نسبة E/L متغير وإضافة الملدن (Medaplasite SP40) يعطي الي نتائج مرضية للغاية. الارتباطات المتحصل عليها في هذه الدراسة تساعد في تقييم الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة التي تم دراستها مع نسب اخطاء مقبولة.

كلمات مفتاحية: الخرسانة، الملدن، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، الاختبارات غير الاتلافية، الارتباطات، مسحوق الزجاج ،مسحوق الرخام ، غبار السيليكا.

Sommaire

Sommaire.....	I
Liste des figures	VII
Liste des tableaux.....	IX
Notations.....	XII
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralité sur le béton ordinaire

I.1.Introduction.....	3
I.2.Définition	3
I.3. Composition du béton	3
I.3.1. Ciments	3
I.3.2. Les granulats	5
I.3.3. Eau de gâchage	6
I.4. les Propriétés essentielles du béton	6
I.4.1. Les propriétés physiques.....	6
I.4.1.1. L'ouvrabilité	6
I.4.1.2. La masse volumique du béton frais	6
I.4.1.3. Porosité.....	7
I.4.2. Les propriétés mécaniques.....	7
I.4.2.1. Résistance à la compression.....	7
I.4.2.2. Traction par flexion	8
I.5. Méthodes de formulation des bétons sans additions	9
I.5.1. Méthodes de Dreux- Gorisse	9
I.5.2. Méthode des volumes absolus	13
I.6. point de vue de la normalisation sur la prise en compte des additions dans la formulation des bétons.....	15
I.7. Point de vue des études récentes sur la prise en compte des additions dans la formulation des bétons.....	16
I.8. Conclusions.....	16

Chapitre II : Additions minérale

II.1. Introduction 15	17
II.2. Les avantages ajouts cimentaires	17
II.2.1. Avantages techniques.....	17
II.2.2. Avantages économiques	17
II.2.3. Avantages écologiques	18
II.3. Définition des ajouts cimentaires	18
II.4. Classification des ajouts minéraux.....	18
II.5. Principaux ajouts minéraux inertes.....	19
II.5.1. Fillers calcaires.....	19
II.5.2. Le marbre.....	19
II.5.2.1. Composition minéralogique	20
II.5.2.2. Utilisation	21
II.5.2.3. La poudre de marbre	21
II.6. Les ajouts minéraux actifs	21
II.6.1. La pouzzolane.....	21
II.6.1.1. Pouzzolane naturelle	22
II.6.1.2. Pouzzolane artificielle.....	22
II.6.2. Fumée de silice.....	22
II.6.3. Le laitier de haut fourneau	24
II.6.4. Les cendres volantes	26
II.6.5. La poussière.....	27
II.6.6. Le verre.....	27
II.6.6.1 Définition du verre	27
II.6.6.2 Comportement du verre dans un milieu cimentaire	28
II.7. Effets des ajouts sur les propriétés des bétons	29
II.7.1. Amélioration L'ouvrabilité.....	29
II.7.2. Chaleur d'hydratation	29
II.7.3. Durabilité.....	29
II.7.4. Développement des résistances	29
II.7.5. Développement des bétons à haute résistances.....	30
II.8. Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux	30

II.9. Rôle des ajouts minéraux actifs.....	30
II.10. L'utilisation des ajouts en Algérie	30
II.11. Conclusion.....	32

Chapitre III: Essais non destructifs

III.1. Introduction.....	33
III.2. But d'utilisation	33
III.3.1. Principaux domaines d'application	33
III.4. Historique.....	34
III.5. Avantages des ces méthodes réside dans	34
III.6. Méthodes D'essais.....	34
III.6.1. Introduction.....	34
III.6.2. Essai au scléromètre	35
III.6.2.1. Introduction	35
III.6.2.2. Principe.....	36
III.6.2.3. Appareillage	36
III.6.2.4. Mode Opérateur	36
III.6.2.5. Inconvénients de la méthode sclérométrique	38
III.6.2.6. Interprétation Des Résultats De Contrôle Du Béton Au Scléromètre	39
III.6.2.7. Références normatives.....	40
III.6.8 Les avantages	40
III.6.3.Essai d'auscultation dynamique.....	40
III.6.3.1. Introduction	40
III.6.3.2. Principe.....	40
III.6.3.3. Mode Opérateur	42
III.6.3.4. Interprétation Des Résultats De Mesure Aux Ultrasons.....	34
III.6.3.5. Références normatives.....	47
III.6.3.6. Les avantages	47
III.6.4. Méthodes combinées	48
III.6.4.1. Introduction	48
III.6.4.2. Principe.....	49
III.6.4.3.Les avantages	50
III.7. Conclusion	50

Chapitre IV: Matériaux et Procédures Expérimentales

IV.1 Introduction.....	51
IV.2 Caractéristiques des Matériaux.....	51
IV.2.1 Ciment	51
IV.2.2 Poudre de marbre.....	52
IV.2.3 Poudre de verre	54
IV.2.3 La Fumée de Silice (FS):	55
IV.2.5 Super plastifiant	56
IV.2.6 Eau de Gâchage :	56
IV.2.7 Caractéristique du sable	57
IV.2.7.1 Essai d'analyse granulométrique [NF EN 933-1] :	57
IV.2.7.2 Module de finesse :	57
IV.2.7.3 Masse volumique absolue [NF P18-555].....	58
IV.2.7.4 Masse volumique apparente [NF P18-555]	58
IV.2.7.5 Porosité.....	58
IV.2.7.6 Compacité:	59
IV.2.7.7 L'indice des vides :	59
IV.2.7.8 Equivalent de sable [NF EN 933-8] :	59
IV.2.7.9 Teneur en eau [NF P 18-555] :	60
IV.2.8 Caractéristique du Gravier Utilisé :	60
IV.2.8.1 Analyse granulométrique [NF EN 933-5]:.....	61
IV.2.8. Les caractéristiques physiques des graviers utilisés :	61
IV.2.8.1 Masse volumique apparent [NF P 18-554] :	61
IV.2.8.2 Masse volumique absolue :	62
IV.2.8.3 Compacité, porosité et l'indice de vide [NF EN 1097-4] :	62
IV.2.8.4 Teneur en eau du gravier [NF EN 1097-6] :	63
IV.2.9. Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés :	63
IV.2.9.1 Essai Los Angeles [NF EN 1097- 2] :	63
IV.3 Préparation et Conditionnement des Echantillons de Béton.....	64
IV.3.1 La formulation de la composition des bétons ordinaire	64
IV.3.2 Composition des différents bétons ordinaires.....	67
IV.3.3 Fabrication et conditionnement des éprouvettes	69

IV.3.4 Procédure de fabrication des bétons	69
IV.4 Essais à l'Etat Frais	70
IV.4.1 Affaissement au cône d'Abrams (slump test) : NF P18-305	70
IV.4.2 Vibration : NF P 18-421	70
IV.5 Essais à l'Etat Durci	71
IV.5.1 Cure appliquée [NF P 18-404]	71
IV.5.2 La Résistance à la Compression (essais d'écrasement) : NF P 18- 406	72
IV.5.3 Essai de la Traction par Flexion :NF P 18-407 [139] :	72
IV.5.4 Mesure le Taux d'Absorption d'Eau [EN 1097]	73
IV.5.5 Porosité : ASTM - C642	73
IV.5.6 Essais Non Destructifs :	74
IV.5.6.1 Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NF EN 12398] :	74
IV.5.6.2 Les Ultrasons [NF EN 12504-4] :	75
IV.6 CONCLUSION	75

Chapitre V : Résultats et discussion

V.1 Introduction	76
V.2 Méthodologie adaptée pour les manipulations.....	76
V.3 Présentation des résultats.....	76
V.4 A l'état frais (propriétés physiques)	77
V.4.1 Rapport E/L	77
V.4.2 La masse volumique (frais)	78
V.5 État durci (Propriétés physiques).....	79
V.5.1 La masse volumique apparente à l'état durci	79
V.5.2 La vitesse d'ultrason (V)	81
V.5.3 L'indice sclérométrique (Is)	82
V.5.4 Résistance à la compression (Rc)	83
V.5.5 Résistance à la flexion (Rf)	84
V.5.6 Porosité et l'absorption	85
V.6 Étude de corrélation	86
V.6.1 Étude de corrélation entre (ρ) et (V)	86
V.6.1.1 Corrélation entre (ρ) et (v) pour BF1	86
V.6.1.2 Corrélation entre (ρ) en fonction de (v) pour BF2	87
V.6.1.3 Corrélation entre (ρ) en fonction de (v) pour BF3	88

V.6.2 Étude de corrélation entre (ρ) et (Is).....	88
V.6.2.1 la corrélation (ρ) en fonction de (Is) pour BF1	88
V.6.2.2 la corrélation (ρ) en fonction de (Is) pour BF2	89
V.6.2.3 la corrélation (ρ) en fonction de (Is) pour BF3	90
V.6.3 Étude de corrélation entre (Rc) et (V)	90
V.6.3.1 la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour BF1	90
V.6.3.2 la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour BF2	91
V.6.3.3 la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour BF3	92
V.6.4 Étude de corrélation entre (Rc) et (Is)	92
V.6.4.1 la corrélation (Rc) en fonction de (Is) pour BF1	92
V.6.4.2 la corrélation (Rc) en fonction de (Is) pour BF2	93
V.6.4.3 la corrélation (Rc) en fonction de (Is) pour BF3	94
V.6.5.1 la corrélation porosité (P) en fonction de (V) pour BF1	94
V.7 les méthodes combinées	95
V.7.1 Corrélation (Rc) entre (V) et (Is) pour les bétons BF1	95
V.7.2 Corrélation (Rc) entre (V) et (Is) pour les bétons BF2	96
V.7.3 Corrélation (Rc) entre (V) et (Is) pour BF3	96
V.8 Conclusion.....	98
Conclusion générale.....	99
Références bibliographiques	101

Liste des Tableaux

Tableau	Chapitre	page
Chapitre-I		
Tableau I.1	Classification des ciments selon la norme EN 206	5
Tableau I.2	Valeur du coefficient G	10
Tableau I.3	Correction du dosage en eau selon le diamètre, D du mélange granulaire	11
Tableau I.4	valeur du terme correcteur (k)	11
Tableau I.5	Coefficient de compacité	12
Tableau I.6	Coefficients A et A`	13
Tableau I.7	Dosage en eau dans 1 m ³ du béton	14
Chapitre-II		
Tableau II.1	Composition chimique type de certaines fumées de silice	22
Tableau II.2	Composition chimique type de laitiers de haut fourneau	25
Tableau II.3	Composition chimique type de certaines cendres volantes	26
Tableau II.4	Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes	32
Chapitre-III		
Tableau III.1	Moyens de mesure selon le type de recul au scléromètre.	36
Chapitre-IV		
Tableau IV.1	Composition chimique et minéralogique du ciment	51
Tableau IV.2	Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment CEM II 42,5.	52
Tableau IV.3	Caractéristiques physiques de la poudre de marbre	53
Tableau IV.4	. Composition chimique de la poudre de marbre	53
Tableau IV.5	Composition minéralogique de la poudre de marbre, en%	53
Tableau IV.6	Composition chimique de la poudre de verre	54
Tableau IV.7	Caractéristique physique de la poudre de verre	54
Tableau IV.8	Caractéristiques chimiques et physique de la fumée de silice.	55
Tableau IV.9	Caractéristiques de MEDAPLAST SP 40	56
Tableau IV.10	Caractéristiques chimiques de l'eau.	56
Tableau IV.11	La masse absolue de sable en (g/cm ³).	56
Tableau IV.12	La masse volumique apparente à l'état lâche ,l'état compact (Kg/l)	56
Tableau IV.13	Porosité, compacité et indice des vides.	59
Tableau IV.14	Résultats obtenus pour l'équivalent de sable.	60
Tableau IV.15	Teneur en eau de sable utilisé.	60
Tableau IV.16	Masse volumique apparente du gravier.	62
Tableau IV.17	La masse volumique absolue du gravier.	62

Tableau IV.18	Porosité, compacité et l'indice des vides.	62
Tableau IV.19	Teneur en eau des graviers.	63
Tableau IV.20	Caractéristiques mécaniques du gravier recyclé.	63
Tableau IV.21	Classification des roches en fonction du coefficient LA	64
Tableau IV.22	La composition d'un m ³ de béton ordinaire	66
Tableau IV.23	Liste de Description bétons étudiés.	67
Tableau IV.24	Liste de différents bétons étudiés en pourcentage .	67
Tableau IV.25	Les quantités des constituants des mélanges des bétons ordinaires	68
Chapitre-V		
Tableau V.1	Formules de corrélation proposées pour l'estimation des propriétés physiques et mécaniques.	98

Liste des Figures

Figure	CHAPITER	page
CHAPITER I		
Figure I.1	Illustration des différents les types de porosité dans un système cimentaire	7
Figure I.2	Courbe contrainte-déformation en compression simple	8
Figure I.3	Essai de traction par flexion	9
Figure I.4	Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E	10
CHAPITER II		
Figure II.1	Différents types d'ajouts cimentaires	18
Figure II.2	Gisement de marbre	20
Figure II.3	Poudre de marbre	20
Figure II.4	Pouzzolane	21
Figure II.5	Fumée de silice	23
Figure II.6	Laitier de haut fourneau	24
Figure II.7	Cendres volantes	26
Figure II.8	a) Structure en anneau de la Cristobalite ; b) Modèle proposé par Zachariassen	28
Figure II.9	a) L'empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de Na ₂ O et CaO brise des liaisons dans la silice amorphe et donne naissance au verre sodo-calcique	29
Figure II.10	Rupture d'un pont Si-O-Si par adjonction d'une molécule de modificateur Na ₂ O	29
CHAPITER III		
Figure III.1	scléromètre	35
Figure III.2	Grille de mesure sur ouvrage	37
Figure III.3	Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter	37
Figure III.4	Graphe de contrôle du fonctionnement de l'appareil	38
Figure III.5	Courbe de transformation unique	39
Figure III.6	Appareil de mesure	41
Figure III.7	Appareil d'auscultation sonique 58-E48 avec oscilloscope	42
Figure III.8	Mesures en transparence (directe)	43
Figure III.9	Mesures en surface	44
Figure III.10	Mesures semi directe	44
Figure III.11	Courbes de calibrages	46
Figure III.12	Courbe RILEM	47
Figure III.13	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)	48
Figure III.14	Abaque de la variation de la résistance à la compression en bars, en fonction de la vitesse des ultrasons (V) et de l'indice de rebondissement (N) du béton. CNERIB (1998)	49

CHAPITER IV		
Figure IV.1	Distribution granulométrique du ciment anhydre CEM II 42,5Mpa.	52
Figure IV.2	Poudre de marbre.	52
Figure IV.3	Distribution granulométrique de la poudre de marbre	53
Figure IV.4	Poudre de verre.	54
Figure IV.5	Distribution granulométrique de la poudre de verre.	55
Figure IV.6	Poudre de la fumée de silice.	55
Figure IV.7	Courbe d'analyse granulométrique du sable [NF EN 933-1].	57
Figure IV.8	Principe de l'équivalent de sable.	60
Figure IV.9	Courbe analyse granulométrique d'un gravier de deux fraction	61
Figure IV.10	Appareil de l'essai Los Angeles	63
Figure IV.11	La courbe granulométrique.	66
Figure IV.12	Présentation des différents bétons étudiés	68
Figure IV.13	Type des éprouvettes utilisées : prismatique, cubique.	69
Figure IV.14	Mesure de l'affaissement.	70
Figure IV.15	Table de vibration	71
Figure IV.16	Conservation les éprouvettes dans l'eau.	71
Figure IV.17	Essai compression.	72
Figure IV.18	Principe de l'essai traction par flexion.	73
Figure IV.19	Essai de mesure dans l'eau	74
Figure IV.20	Essai de Chauffage	74
Figure IV.11	Principe de l'essai scléromètre.	75
Figure IV.22	Appareil ultrason.	75
CHAPITER V		
Figure V.1	Variation de rapporte E/L en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 .	77
Figure V.2	Variation de rapporte E/L en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF2 .	78
Figure V.3	La variation de la masse volumique apparente à l'état frais en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 .	78
Figure V.4	La variation de la masse volumique apparente à l'état frais en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF2 .	79
Figure V.5	L'évolution de la masse volumique apparente en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 à 7, 21 et 28 jours.	80
Figure V.6	L'évolution de la masse volumique apparente en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF2 à 7, 21 et 21 jours.	80
Figure V.7	L'évolution de la vitesse ultrasonique en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 à 7, 14 et 28 jours.	81
Figure V.8	L'évolution de la vitesse ultrasonique en fonction du pourcentage pour l'ensemble de béton BF2 7, 14 et 21 jours.	81
Figure V.9	Évolution de l'indice sclérométrique en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 à 7, 21 et 28 jours.	82
Figure V.10	Évolution de l'indice sclérométrique en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF2 à 7, 21 et 21 jours.	83
Figure V.11	L'évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 à 7, 14 ,28 jours.	83
Figure V.12	L'évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF2 à 7, 14 ,21 Jours.	84

Figure V.13	La Résistance à la flexion à l'état durci en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 à 7, 14 et 28 jours.	85
Figure V.14	La variation de la l'absorption fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 .	85
Figure V.15	La variation de porosité en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 .	86
Figure V.16	Corrélation entre (ρ) et (v) pour BF1	87
Figure V.17	Corrélation entre (ρ) et (v) pour BF2	87
Figure V.18	Corrélation entre (ρ) et (v) pour BF3	88
Figure V.19	La corrélation (ρ) en fonction de (I_s) pour BF1	89
Figure V.20	La corrélation (ρ) en fonction de (I_s) pour BF2	89
Figure V.21	la corrélation (ρ) en fonction de (I_s) pour BF3	90
Figure V.22	la corrélation (R_c) en fonction de (V) pour BF1	91
Figure V.23	la corrélation (R_c) en fonction de (V) pour BF2	91
Figure V.24	La corrélation (R_c) en fonction de (V) pour BF3	92
Figure V.25	la corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BF1	93
Figure V.26	la corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BF2	93
Figure V.27	La corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BF3	94
Figure V.28	la corrélation porosité (P) en fonction de (V) BF1	95
Figure V.29	Corrélation entre la résistance à la compression, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique pour BF1	96
Figure V.30	Corrélation entre la résistance à la compression, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique pour BF2	96
Figure V.31	Corrélation entre la résistance à la compression, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique pour BF3	96

Notations

Abs(%) : taux d'absorption	Rc : Refus cumulé
A : poids de l'échantillon après étuvage	RC : résistance a la compression
A_f : affaissement	R² : coefficient de corrélation
BF1 : l'ensemble des béton non adjuvantes	R_f :résistance à la flexion
BF2 : l'ensemble des béton adjuvantes	S : section de l'éprouvette (mm ²).
BF3 : l'ensemble des béton non adjuvantes avec béton adjuvantes	V_p : volume des vides.
C(%) : Compacité	V_r : Volume du récipient
C : poids à l'air immersion et ébullition (g).	V : la vitesse ultrasons
D_{max} : Diamètre maximal du gros granulat.	W : Teneur en eau
D : poids à l'eau immersion et ébullition	V_e : volume initiale
e (%) : L'indice des vides	γ :coefficient de compacité
E/C : Rapport eau/ciment.	V_C volume de ciment
E/L : rapport eau/liant.	V_g : volume du granulat
E.S.V : Equivalent de sable visuel	A1015 : béton de 5% fume de silice et 10 % de poudre verre et 15% de poudre marbre
E.S.P : Equivalent de sable piston	A1510 : béton de 5% fume de silice et 15 % de poudre verre et 10% de poudre marbre
F : la charge de rupture (N).	B1010 : béton de 10% fume de silice et 10 % de poudre verre et 10% de poudre marbre
h₁ : hauteur du sable plus flocculat.	B155 : béton de 10% fume de silice et 15 % de poudre verre et 5% de poudre marbre
h₂ : hauteur du sable.	B515 : béton de 10% fume de silice et 5 % de poudre verre et 15% de poudre marbre
h₂' : hauteur du sable avec piston	C150 : béton de 15% fume de silice et 15 % de poudre verre et 0% poudre de marbre
IS : Indice sclérométrique	C510 : béton de 15% fume de silice et 10 % de poudre verre et 5% de poudre marbre
LA : Le coefficient de Los Angeles.	C105 : béton de 15% fume de silice et 10 % de poudre verre et 5% de poudre marbre
M1 : masse d'éprouvette après l'étuvage.	D1015 : béton de 5% fume de silice et 10 % de poudre verre et 15% de poudre marbre
M 2 : masse d'éprouvette saturée d'eau	D1510 : béton de 5% fume de silice et 15 % de poudre verre et 10% poudre de marbre
M_h : Masse des granulats humides	F515 : béton de 10% fume de silice et 5 % poudre de verre et 15% poudre de marbre
M_s : Masse des granulats sec	
M : masse totale	
m : masse après l'essai	
M_f : Module de finesse	
M₁ : masse du récipient vide	
M₂ : masse du récipient vide	
P_s : Masse volumique absolue	
P : Masse volumique apparent	
Papp : masse volumique à l'état lâche	
Pabs : masse volumique absolue	
P_c : Masse volumique à l'état compact	
P(%) : Porosité	

Introduction générale

La formulation des bétons qui, pendant très longtemps, a reposé sur une simple association ternaire ciment, eau et granulats, s'est progressivement compliquée au point qu'un béton actuel comporte de façon courante cinq constituants : ciment, eau, granulats, additions minérales et adjuvants.[1]

Cet accroissement du nombre de constituants est, d'un point de vue pratique, très avantageux car il conduit, généralement, à l'amélioration très significative des performances mécaniques, physiques et durabilités des bétons. L'incorporation des additions minérales est maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du béton telles que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc.. Ces additions minérales affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance et à leurs relations avec les essais indirects, la durabilité des matériaux durcis.

Les méthodes d'essais indirects sur les constructions en béton, en béton armé ou en béton précontraint sont particulièrement intéressantes pour l'importance que représente le contrôle de la qualité directement sur l'ouvrage. Les avantages de ces essais par rapport aux autres peuvent être résumés dans le caractère non destructif qui nous permet d'obtenir des informations dans des domaines inaccessibles aux méthodes directes, économiser des matériaux, du temps et des outils 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. Outre le progrès des technologies elles-mêmes.[2]

Le contrôle de la qualité de ces bétons in situ devient une priorité essentielle pour les Ingénieurs afin d'assurer le bon fonctionnement et le rendement de la structure. L'évaluation non destructive de la qualité du béton in situ, nous offre plus d'économie soit en termes de temps d'exécution de l'évaluation, ou bien en termes de coût de matériel de contrôle (presse hydraulique) ou du matériau à contrôler (éprouvettes en béton ou carottes) ; l'insuffisance majeure de ces méthodes non destructives est la fiabilité de ses résultats. Dans le cas d'un contrôle de qualité par des éprouvettes donnant des résistances faibles, on est fait recours à des essais non destructifs au scléromètre et à l'ultrason pour confirmer ou infirmer ces résultats. Des abaques de corrélations données par les fabricants du matériel ainsi que d'autres corrélations disponibles dans la littérature entre ces essais sont utilisés par les laboratoires de construction. Ces corrélations donnent lieu souvent à des confusions quant à l'interprétation de ces essais. Des contradictions ont été observées avec les essais aux carottes montrant la

nécessité d'avoir des corrélations spécifiques aux matériaux locaux et reflétant les conditions de l'environnement local.

L'objectif de notre travail, est la valorisation des fillers comme la poudre de verre, la poudre de marbre et le fumée de silice en différents pourcentage par substitution du ciment dans la formulation d'un béton à base de matériaux locaux. Ce travail a pour but de l'amélioration de certains ou de la totalité de béton et les incitations économiques et les avantages environnementaux.

Pour la réalisation de ce projet nous avons proposé le plan de travail suivant:

Le premier chapitre présente une revue générale sur le béton.

Le deuxième chapitre présente des notions générales sur les additions minérales.

Le troisième chapitre présente une synthèse sur les méthodes non destructives de la résistance du béton durci in situ soulignant leurs avantages et leurs inconvénients

Le quatrième chapitre présente les matériaux utilisés et leurs caractéristiques chimiques et physiques et mécaniques

Le cinquième chapitre présente les résultats obtenus pour la résistance à la compression, l'indice sclérométrique et la vitesse du son. L'analyse de ces résultats qui nous permettent d'établir des corrélations entre des différents paramètres

Nous terminons notre étude par les conclusions, les recommandations ainsi que les références bibliographiques.

Chapitre I : Généralités sur le béton ordinaire

I.1. Introduction

Le béton est un matériau de construction composite moderne, simple d'emploi et extrêmement répandu. Il se compose d'une matrice cimentaire (pâte de ciment hydraté) qui amalgame les inclusions rigides (graviers et sable). Un béton contient environ (en volume) : eau : entre 14 et 22 % ; ciment : entre 7 et 14 %, granulats (dont sable) : entre 60 et 78 %. [2]

Pour les différents bétons ayant un même dosage en ciment mais avec un rapport Eau/Ciment (E/C) différent, on remarque que ses propriétés s'en retrouvent affectés. En effet selon la combinaison des trois composants majeurs du béton, le matériau obtenu aura différentes propriétés (rhéologie, propriétés mécaniques, perméabilité...). L'ajout d'additifs et d'adjuvants (cendres volantes, fumés de silice, super plastifiants...) permet de modifier les propriétés souhaitées. [2].

I.2. Définition

Le béton est le matériau de construction par excellence depuis presque un siècle. Constitué à l'origine de seulement quatre composants (gravillons, sable, ciment et eau) leurs méthodes de formulation ont évolué d'un savoir-faire empirique vers la science des matériaux, Nous abordons dans ce travail un type de béton qui est le béton ordinaire. [29]

Le Béton ordinaire

C'est un matériau de construction composite constitué d'un mélange de granulats (sable, gravillons) et un liant. Le liant peut être « hydraulique », il est appelé ciment, et l'eau de gâchage. [3].

I.3. Composition du béton

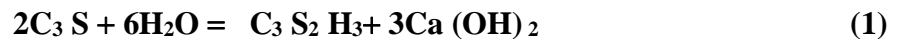
I.3.1. Ciments

Le ciment se présente sous forme d'une poudre fine de couleur grise ou blanche. La dimension des grains de ciment est caractérisée par la valeur de la finesse Blaine qui mesure la surface totale des grains contenus dans un gramme ; la finesse Blaine des ciments est de l'ordre de 3 500 à 4 500 cm²/g, La dimension caractéristique des grains de ciment est d'environ 30 à 50µ. Le clinker, issu de ce procédé est employé pour la préparation de la majorité des ciments. Les clinkers peuvent avoir des compositions variables mais les oxydes principaux sont toujours les mêmes : la chaux (CaO), la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et la ferrite (Fe₂O₃), Le clinker est un matériau de base auquel on peut trouver un nombre d'ajouts pour la préparation des ciments, qui sont disponibles sur le marché, On peut ainsi ajouter des

condres volantes, des laitiers de hauts fourneaux, ou encore des fumées de silice, en modifiant ainsi la composition du ciment et par voie de conséquence ses propriétés. Les compositions sont normalisées en fonction des compositions et des mélanges. [4].

Un ciment est constitué de phases anhydres qui vont s'hydrater en présence d'eau, C'est l'ensemble de ces réactions que l'on définit comme l'hydratation du ciment, le clinker, constitutif de l'essentiel de ce que l'on nomme un ciment Portland, peut être pris en exemple pour décrire le processus d'hydratation. Dans le cas de ciments dits « mélangés », les réactions sont identiques, seules vont changer les proportions ou certaines stœchiométries déshydratés formés au contact avec l'eau, les phases anhydres du clinker, notamment les silicates, Tri calciques (C_3S) et bicalciques (C_2S), se dispersent en solution aqueuse pour donner de différents ions tels que Ca^{+2} , OH^- , $SiO_4H_2^{+2}$, $SiO_4H_3^-$, $SiO_7H_4^{+2}$, Une fois que leur seuil de solubilité est atteint, ces anhydres se combinent en molécules hydratées par précipitation puis nucléation, Ce sont des réactions exothermiques car elles mettent en jeu beaucoup d'énergie [4].

La pâte fraîche obtenue se présente comme un système dispersé de grains de silicates, Les équations (1) et (2) représentent les réactions chimiques produites durant l'hydratation et donnant les composés hydratés du matériau selon [2] :



Les deux hydrates principalement formés sont les silicates de calcium hydratés de la forme $C_3S_2H_3$, notés « CSH » et la portlandite $Ca(OH)_2$ symbolisée CH, D'autres composés mineurs sont également formés durant l'hydratation, tels que des hydroxydes d'aluminium, des aluminates de calcium hydraté ou de l'étringite [2].

La quantité d'eau apportée durant la fabrication du matériau est généralement supérieure à la quantité utile à l'hydratation complète du ciment, pour favoriser la maniabilité à l'état frais, Cependant, avec l'avancée de l'hydratation, le cheminement de l'eau jusqu'aux phases anhydres est gêné par les hydrates déjà formés.

Ainsi, même si elle ralentit considérablement, l'hydratation se poursuit dans la microstructure du matériau par diffusion de l'eau, La quantité d'eau est généralement rapportée à la quantité de ciment et cela est noté comme le rapport eau sur ciment (E/C), Plus le matériau présent un E/C faible, plus sa matrice cimentaire est dense.

De ce fait, le rapport E/C est un paramètre qui influence la microstructure se formant durant l'hydratation [3].

Tableau I .1 Classification des ciments selon la norme EN 206 [3]

	Ciment Portland	Ciment Portland Composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pouzzolanique		Ciment au laitier et aux cendres		
	CEM I	CEM II/A	CEM II/B	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/C	CEM IV/A	CEM IV/B	CEM V/A	CEM V/B	
Clinker (K)	95%	80% ≤94 %	65% ≤79 %	35% ≤64 %	20% ≤34%	5% ≤19 %	65% ≤90%	45% ≤64%	40% ≤64 %	20% ≤39%	
Laitier (S)	-	6%≤ total ≤20 % fumée de silice ≤10 %)	21%≤ total ≤35% fumée de silice ≤10%)	36% ≤65 %	66% ≤80%	81% ≤90 %	-	-	18% ≤30 %	18% ≤30%	
Pouzzolanes (Z)	-			-	-	-	-	10%≤ total	36%≤ total	18% ≤ total	18%≤ total
Cendres siliceuses (V)	-			(fumée de silice ≤10%)	-	-	-	≤35% (fumée de silice ≤10%)	≤55% (fumée de silice ≤10%)		
Fumée de silice (D)	-			-	-	-	-	-	-	-	-
Cendres calcaies (W)	-			-	-	-	-	-	-	-	-
Schistes (T)	-			-	-	-	-	-	-	-	-
Calcaies (L)	-			-	-	-	-	-	-	-	-
Fillers (F)	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

I.3.2. Les Granulats

Les granulats (gravillon et sable) forment le squelette du béton. Les granulats doivent être chimiquement stables lors du contact avec les autres constituants. Pour obtenir un béton avec de bonnes caractéristiques, le choix de l'agrégat s'avère alors très important. La nature, la forme et la granularité des granulats influencent fortement sur les propriétés des bétons à l'état frais et durci, Les granulats constituent la phase dominante du béton, (70% du volume) et se caractérisent par les propriétés intrinsèques de la roche dont ils sont issus : coloration, caractéristiques mécaniques et physico-chimiques. Ils vont influencer directement sur les propriétés esthétiques, mécaniques et la durabilité du béton. Le granulat est généralement composé de fillers, de sable, de gravier, de pierres concassées, de galets ou de cailloux (selon sa dimension). Ils sont obtenus en exploitant des gisements de sable et de gravier d'origine alluvionnaire, terrestre ou maritime, en concassant des roches massives, ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition [3].

I.3.3. Eau de gâchage

L'eau est l'un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation [3].

L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences de la norme NF EN 1008, les autres comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, eaux d'origine souterraine, eaux naturelles de surface et eaux de rejet industriel, eau de mer, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire ainsi que les essais chimiques [5].

I.4. Les propriétés essentielles du béton

Chaque matériau possède plusieurs propriétés, et lorsque le béton étant défini comme un matériau composite, il se distingue par plusieurs propriétés que ce soit à l'état dur (résistance mécanique, retrait, porosité, perméabilité, ...) ou à l'état frais (fluidité, ségrégation, ouvrabilité, ...) [5].

I.4.1. Les propriétés physiques**I.4.1.1. L'ouvrabilité**

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton ; elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et de ferrailage. C'est l'aptitude d'un béton à une bonne adéquation à la méthode de sa mise en œuvre dans un ouvrage donné compte tenu de ses caractéristiques. Elle est influencée par la granulométrie et la forme des granulats, par le dosage en ciment et en eau, par l'emploi éventuel d'adjuvants. Les essais de mesure de consistance du béton les plus courants sont l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (norme NF P 18-451) et l'essai d'étalement à la table à secousses ; mais les essais Vébé et indice de serrage ne s'appliquent qu'à des bétons très fermes [7].

I.4.1.2. La masse volumique du béton frais

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage, après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante :

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

D : est la masse volumique du béton frais (kg/m³)

m₁ : est la masse du récipient (kg).

m₂ : est la masse du récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (kg).

V : est le volume du récipient en mètre cube (m³)

La masse volumique du béton est arrondie aux 10 kg/m³ les plus proches [7].

I.4.1.3. Porosité

La porosité est une caractéristique physique essentielle du béton qui conditionne plusieurs propriétés de ce dernier tel que sa perméabilité, sa résistance mécanique, son module d'élasticité et surtout sa durabilité. La porosité ouverte est considérée comme un indicateur de durabilité pertinent pour une large gamme de dégradations. En effet, elle conditionne les échanges entre le matériau et son milieu environnant. Ces pores sont surtout les capillaires continus qui contribuent au transport des espèces chimiques au sein de la structure poreuse [8].

La porosité ouverte interconnectée est donc particulièrement liée aux propriétés de transfert dans le béton, notamment la perméabilité à l'eau. Il y a trois types de pores : les pores fermés, les pores accessibles à l'eau non interconnectés et les pores accessibles à l'eau interconnectés (figure I.1) [8].

Les dimensions et le volume des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les propriétés physiques et mécaniques du béton. La porosité est essentiellement une fonction du rapport E/C du béton. Il a été démontré que pour un béton donné, la seule réduction du rapport E/C de 0,5 à 0,22, réduit d'un facteur 3 le volume total des pores capillaires [8].

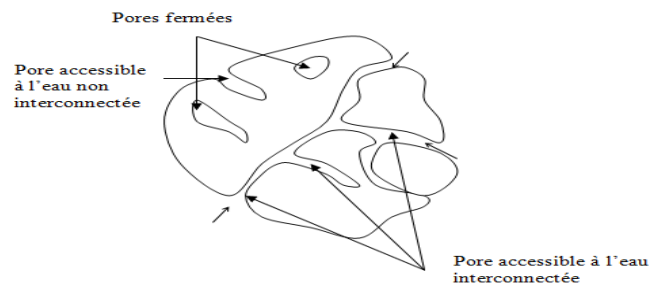


Figure I.1. Illustration des différents les types de porosité dans un système cimentaire [8].

I.4.2. Les propriétés mécaniques

I.4.2.1. Résistance à la compression

La résistance en compression est le paramètre de base pour le béton, elle définit souvent une classe de résistance dont sont censées découler beaucoup d'autres propriétés. Le

comportement de béton en compression est traduit principalement par une relation contrainte-déformation, cette relation est présentée schématiquement à la (figure I.2.).

On peut distinguer, à déformation croissante, trois phases de comportement [4] :

- ✧ Une phase de comportement analogue à celui d'un matériau homogène et élastique, se traduisant par une relation à peu près linéaire entre la contrainte et la déformation ;
- ✧ La phase de développement de la micro fissuration qui entrain une incurvation progressive de la courbe jusqu'à l'atteinte du maximum de contrainte ;
- ✧ La phase de développement des surfaces de fracture et d'une fissuration plus ou moins généralisée, c'est-à-dire la propagation progressive de la rupture [4].

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$R_c = \frac{F}{S}$$

R_c: résistance en compression, exprimée en méga pascal (Newton par millimètres carrés).

F : charge maximale, exprimée en Newtons.

S : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette.

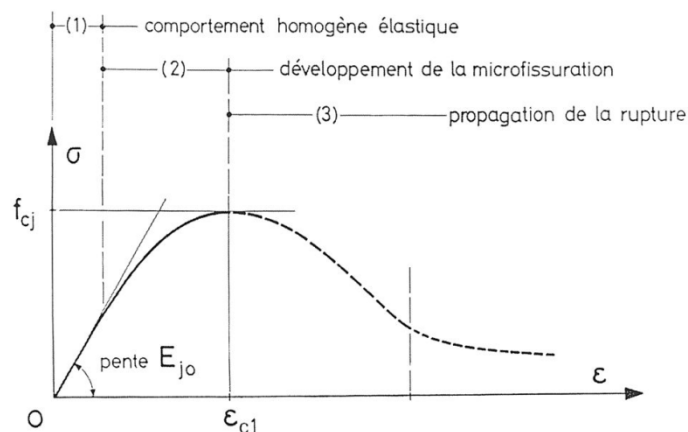


Figure I.2. Courbe contrainte-déformation en compression simple [4].

I.4.2.2. Traction par Flexion

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7 x 7 x 28 cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée [6].

Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NF P 18-407 (NA 428), munie d'un banc de flexion à 4 points.

Pour une charge totale P, le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est : $M = P \times a / 2$ et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est $f_{tj} = 6M / a^3$, la relation suivante permet de calculer la résistance :

$$F_{ij} = \frac{1.8P}{a^2}$$

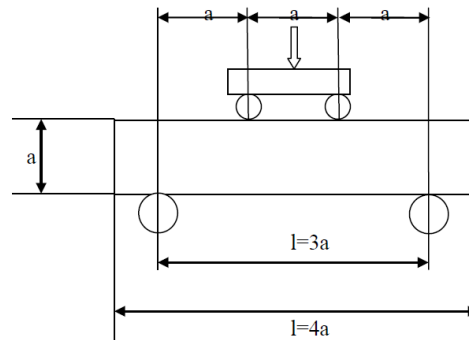


Figure I.3. Essai de traction par flexion [6].

I.5. Méthodes de formulation des bétons sans additions

Les méthodes de formulation des bétons sont utilisées pour déterminer les quantités relatives des différents constituants du mélange dans une configuration simple permettant d'obtenir les propriétés rhéologiques souhaitées du mélange à l'état frais ainsi que les résistances mécaniques requises pour le matériau à l'état durci. Ces méthodes ont fait depuis longtemps leurs preuves pour les bétons courants et disposent d'un retour d'expérience positif important [9].

Dans le document on présente l'application de différentes méthodes pour le calcul de la composition du béton sans additions en Algérie.

Nous présentons ici sommairement deux méthodes importantes : méthode pratique française de Dreux-Gorisse et méthode Russe dite Méthode des Volumes Absolus.

I.5.1. Méthodes de Dreux- Gorisse [10]

Présentée dans le Nouveau guide du béton, elle comprend les parties suivantes :

➤ **Résistance visée :**

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

$$FC = FC_{28} + 15\% FC_{28}$$

➤ **Détermination Du Dosage En Ciment :**

On évalue d'abord le rapport E/C en fonction de la résistance désirée sur la base de la

formule : $FC = G R_b \left(\frac{c}{E} - 0.5 \right)$

Avec:

✓ F_C : résistance à la compression du béton prévue à 28 jours;

- ✓ R_b : Classe vraie du ciment à 28 jours, en MPa ;
- ✓ **E et C** : dosage en eau et en ciment, en litre et kg;
- ✓ **G** : Coefficient granulaire donné par le tableau (1.2) en fonction de la qualité et de la dimension maximale (D max) du gravier.

Connaissant le rapport C/E et la fluidité désirée, qui est une donnée du problème, on peut déterminer le dosage en ciment d'après l'Abaque (figure I. 4)

Tableau I.2. Valeur du coefficient G [10]

Qualité des granulats	Dimension maximale des granulats		
	Fins $D_{max} \leq 12.5$ mm	Moyens $20 \leq D_{max} \leq 31.5$ mm	Gros $D_{max} \geq 50$ mm
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
passable	0.35	0.40	0.45

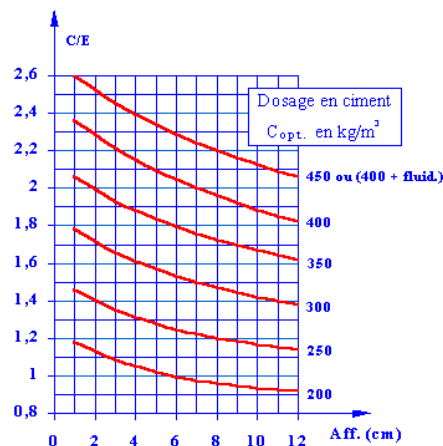


Figure I.4. Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E [10]

➤ **Détermination du dosage en eau :**

Connaissant C/E et le dosage en ciment (C) on déduit le dosage en eau total à prévoir

par la formule :
$$\frac{C}{E} = \frac{F_C}{R G} + 0.5$$

➤ **Ajustement du dosage en eau :**

Le dosage en eau est à ajuster. En effet, l'eau doit pouvoir humidifier tous les grains du mélange. Or pour humidifier un grain, il faut d'autant plus d'eau que son diamètre est petit. La quantité d'eau dépend donc également du diamètre des grains à humidifier. Le dosage en eau déterminé est indiqué pour mouiller tous les grains du mélange granulaire d'un diamètre représentatif maximal, $D=25$ mm. Pour les autres diamètres, il faut majorer ou minorer ce dosage selon ce diamètre, D.

Tableau I.3. : Correction du dosage en eau selon le diamètre, D du mélange granulaire [10].

Diamètre en (mm)	4	8	12.5	20	31.5	50	80
Correction en (%)	+ 15	+ 9	+ 4	0	- 4	- 8	- 12

➤ **Détermination du dosage en granulat:**

Sur un graphique d'analyse granulométrique on trace la courbe granulaire de référence OAB. Le point B (à l'ordonnée 100%) correspond à la dimension maximale du gravier (D max), le point (O) se trouve à l'origine des coordonnées et le point de brisure (A) a des coordonnées ainsi définies :

- Coordonnées de O :(0 ; 0)
- Coordonnées de B : (D ; 100)
- Coordonnées de A : (X ; Y)

- **En abscisse X :** (à partir de D max)

Si $D_{max} \leq 20\text{mm}$, l'abscisse est $D_{max} / 2$;

Si $D_{max} \geq 20\text{mm}$, l'abscisse est situé au milieu du « segment gravier » limité par le module 38 (5mm) et le module correspondant à (D max).

- **En ordonnée:**

Y est donnée par la formule suivante :

$$Y = 50 - \sqrt{Z} - K + Ks + Kp$$

K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (surtout le sable dont l'influence est ici prépondérante), ce coefficient dépend également du module de finesse du sable.

Tableau I .4. Valeur du terme correcteur (k) [10]

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluid	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du sable, au point de 5% de la courbe granulaire du gravier (si on utilise le gravier de fraction unique) ou de la première fraction (si on utilise le gravier de plusieurs fractions) et ainsi de suite.

On lit alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de

partage les pourcentages en volume absolu de chacun des granulats (sable, première fraction et deuxième fraction du gravier).

Si (C) est le dosage pondéral en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :

$$VC = \frac{c}{\rho_c}$$

ρ_c : C'est la masse spécifique pour les grains du ciment

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est $Vg = 1000K - VC$

Ou **K** : coefficient de compacité qui est donné par le (Tableau 1.5).

Remarque :

Ces valeurs sont convenables pour les granulats roulés, sinon il convient d'apporter les corrections suivantes :

- Sable roulé et gravier concassée on déduit 0.01
- Sable et gravier concassé on déduit 0.03

Pour $C \neq 350 \text{ kg/m}^3$ on a le terme correctif $K = \frac{c - 350}{5000}$

Les volumes absolus de chacun des granulats sont alors donnés comme suit :

$$VS = S.V_{ag}$$

$$V_g^1 = G_1 V_{ag}$$

$$V_g^2 = G_2 V_{ag} ; \text{ etc}$$

Tableau I.5. Coefficient de compacité [10].

consistance du béton frais	mode de serrage	D max 5 mm	D max 10 mm	D max 12.5 mm	D max 20 mm	D max 31.5 mm
molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810
	vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815
	vibration normal	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820
plastique	Piquage	0.760	0.790	0.805	0.820	0.820
	vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.825	0.825
	vibration normal	0.770	0.800	0.815	0.830	0.830
ferme	vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835
	vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.840
	vibration normal	0.780	0.810	0.825	0.835	0.845
	vibration puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.850

Si les masses spécifiques de chacun de ces granulats sont $\rho_s, \rho_g^1, \rho_g^2$, leurs masses donc respectivement : $S = V_s \cdot \rho_s$, $G_1 = V_g^1 \cdot \rho_g^1$, $G_2 = V_g^2 \cdot \rho_g^2$ et en trouve la masse totale des granulats. Il reste à tester la composition ainsi définie par l'essai de fluidité et d'écrasement des éprouvettes et d'apporter, suivant les résultats des essais, les corrections nécessaires.

Cette méthode est simple et pratique, mais elle utilise les graphes et tableaux préétablis pour déterminer le dosage en ciment et granulats, cela peut conduire à une erreur possible.

I.5.2. Méthode des volumes absolus [9]

La méthode des volumes absolus comprend les opérations suivantes :

Détermination du rapport $\frac{C}{E}$:

a / pour béton à $\frac{C}{E} \leq 2.5$:

$$Rb = A R_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad \text{D'où} \quad \frac{C}{E} = \frac{R_b}{A R_c} + 0.5$$

b/ pour béton à $\frac{C}{E} > 2.5$:

$$Rb = A' R_c \left(\frac{C}{E} + 0.5 \right) \quad \text{D'où} \quad \frac{C}{E} = \frac{R_b}{A' R_c} - 0.5$$

Les coefficients A et A' sont donnés au (tableau I.6)

Tableau I.6. Coefficients A et A' [9]

Granulats et liants	A	A'
Qualité supérieure	0.65	0.43
Qualité ordinaires	0.60	0.40
Qualité inférieure	0.55	0.37

Remarque :

Les matériaux de qualité supérieure sont : les pierres concassées provenant des roches compactes à haute résistance mécanique, le sable de grosseur optimale, et le ciment portland de classe élevée, les granulats lavés et fractionnés avec composition optimale du mélange des fractions.

Les matériaux ordinaires sont : les granulats de qualité moyenne y compris les graviers, le ciment d'activité moyenne (325 , 400), ou ciment portland aux laitiers.

Les matériaux de qualité inférieure sont : les gros granulats à faible résistance, les sables fins et les ciments de faible activité (< 325).

➤ **Détermination du dosage en eau pour 1 m³ de béton :**

Il se fait en prenant la valeur convenable du (tableau I.7).

Tableau I.7. Dosage en eau dans 1 m³ du béton [9]

Fluidité du béton frais (affaissement du cône) (cm)	Dosage en eau (l) par rapport à D _{max} (cm)					
	Gravier concassé			Gravier roulé		
	10	20	40	10	20	40
1	195	185	170	185	170	155
1 - 2.5	200	190	175	190	175	160
3 - 4	205	195	180	195	180	165
5	210	200	158	200	185	170
7	215	205	190	205	190	175
8	220	210	195	210	195	180
10 - 12	225	215	200	215	200	190

Remarque :

Les valeurs du tableau 1-10 sont valables pour les bétons à ciment portland, sable moyen et gravier roulé. Avec la pierre concassé, une addition de 10 l/ m³ sera apportée.

➤ **Détermination du dosage en ciment :**

$$C = \frac{C}{E} \cdot E \quad (kg)$$

➤ **Détermination du dosage en gravier :**

$$\frac{C}{\rho_C} + \frac{E}{\rho_E} + \frac{S}{\rho_S} + \frac{G}{\rho_G} = 1000 \quad (1)$$

$$\frac{C}{\rho_C} + \frac{S}{\rho_S} + E = P_G \cdot \frac{G}{\rho_G} \cdot \alpha \quad (2)$$

Ou, **C, E, S, G** : Dosage en ciment, eau, sable et gravier, $\rho_E = 1$

α : coefficient d'écartement des grains du gravier dans le béton.

α est pris égale à 1.05 – 1.10 pour les mélanges secs.

à 1.2 – 1.4 pour les mélanges fluides.

PG : porosité du gravier.

En résolvant simultanément les deux équations (1) et (2) on trouve :

$$G = \frac{1000}{\rho_g \cdot \frac{\alpha}{\gamma_g} + \frac{1}{\rho_s}} \text{ (kg)}$$

➤ **Détermination du dosage en sable :**

$$S = \left(1000 - \left(\frac{C}{\rho_c} + E + \frac{G}{\rho_G} \right) \right) \cdot \rho_s \text{ (kg)}$$

Il reste à vérifier la composition ainsi définie par des essais de fluidité et de résistance à la compression et apporter, si besoin, les corrections nécessaires. Cette méthode s'avère logique et plus simple dans la pratique [9].

Toutes ces méthodes ont fait leurs preuves pour des bétons courants, par contre, la formulation des mélanges avec additions minérales pose encore de nombreuses questions malgré que les maintes études sur les méthodologies de formulation des bétons avec additions minérales aient vu le jour pour optimiser la quantité d'addition ou définir les critères qui permettent d'obtenir les propriétés rhéologiques et mécaniques spécifiques pour les bétons.

I.6. Point de vue de la normalisation sur la prise en compte des additions dans la formulation des bétons

La norme européenne EN 206-1 définit les conditions de prise en compte des additions minérales en substitution partielle du ciment dans la formulation des bétons en considérant le concept de liant équivalent et définit un coefficient forfaitaire (k) de prise en compte des additions minérales qui est déterminé pour les cendres volantes et les fumées de silice utilisées avec un ciment de type CEM I.

Le concept du coefficient (k) et de liant équivalent autorise la prise en compte des additions de type II et de certaines additions de type I :

- En remplaçant le rapport eau/ciment par le rapport eau/ (ciment + k x additions).
- En remplaçant l'exigence relative au dosage minimal en ciment par la même exigence appliquée au liant équivalent.

Le liant équivalent est constitué de ciment de type **CEM I 42.5 N** ou **CEM I 42.5 R** ou **CEM I 52.5 N** ou **CEM I 52.5 R** et d'une des additions normalisées substituables au ciment au sens et sous les conditions de la norme EN 206-1.

Ce coefficient définit la proportion de l'addition qui participe avec le ciment dans la notion du liant équivalent comme suit :

$$L_{eq} = C + k.F$$

C : la quantité de ciment dans le béton (kg/m³),

F : la quantité d'addition dans le béton (kg/m³),

K : un coefficient de prise en compte des additions minérales dans le liant.

I.7. Point de vue des études récentes sur la prise en compte des additions dans la formulation des bétons [9]

Parmi les études réalisées dans le domaine de la formulation des bétons, on trouve celles qui sont basées sur l'adaptation des modèles prédictifs de résistance en compression existants et ont considéré spécialement les fumées de silice fortement active qui sont utilisées dans les mélanges cimentaires pour obtenir des bétons de hautes performances.

Ainsi, sur la base du modèle prédictif de **Féret** : la résistance en compression à 28 jours est définie comme suit :

$$F_{C28} = G_F f_{C28} \left[\frac{C}{c + e + v} \right]^2$$

C : désigne le volume de ciment dans le béton en l/m³ ;

e : désigne le volume d'eau dans le béton en l/m³ ;

v : désigne le volume d'air occlus dans le béton en l/m³ ;

GF : désigne un coefficient qui dépend de la nature des granulats ;

fc28 : désigne la résistance en compression du mortier normal à 28 jours.

Nous donnons cette formule de Féret à titre d'exemple, il existe beaucoup d'autres formules selon différents modèles prédictifs, comme le modèle de Bolomey, le modèle de Larard, le modèle de Kadri. Une approche plus générale a été avancée par Lawrence en étudiant l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires, dans laquelle il propose un schéma de principe pour l'évaluation de l'effet chimique et physico-chimique des cendres volantes et des additions calcaires et siliceuses sur la résistance en compression des mortiers. Dans cette approche, les additions sont introduites en substitution massique du ciment en conservant constant le rapport massique eau / (ciment+addition).

I.8. Conclusion

Nous avons fait une revue générale sur le béton, de ses constituants et ses propriétés à l'état frais et durci. Dans la pratique, l'ouvrabilité et la résistance mécanique, sont des propriétés qui doivent être mises au point en premier lors de la formulation des bétons.

En effet, l'ouvrabilité contrôle la mise en œuvre sur chantier tandis que la résistance mécanique conditionne la capacité portante de l'ouvrage. L'ouvrabilité est sensible au dosage en eau, en adjuvant et en fines. La résistance du béton est influencée par divers paramètres cités ci-dessus mais essentiellement contrôlée par la qualité du ciment et le rapport E/C.

Chapitre II : Additions minérales

II.1. Introduction

De nos jours, l'utilisation des sous-produits minéraux est devenue un impératif économique dans certains pays. L'industrie du ciment et du béton s'est intéressée à cette nouvelle orientation en utilisant certains de ces produits au cours du processus de fabrication du ciment ou du béton. Toutefois, cette utilisation est régie par certaines caractéristiques recommandées afin de ne pas nuire aux résistances et à la durabilité des bétons [11].

II.2. Les avantages ajouts cimentaires

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

II.2.1. Avantages techniques

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée.

L'ajout cimentaire améliore généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés, les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration [12].

II.2.2. Avantages économiques

Le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou béton sont des sous-produits, et, à ce titre, demandent relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment Portland.

Toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et le coût élevé du transport qui en résulte risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels. De même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés. Bien qu'il soit difficile à prédire, le prix des ajouts cimentaires pourrait se comparer à celui du ciment si la demande en béton ne diminuait pas, dans ce monde que menace le CO₂. Et c'est bien le gaz carbonique (dioxyde de carbone) qui pourrait finalement décider de la valeur de ces derniers. [12]

II.2.3. Avantages écologiques

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). De ce fait, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO₂. En général l'utilisation de calcaire comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie.

Il convient donc de considérer tous les paramètres avant d'établir les avantages écologiques de l'ajout cimentaire sur le ciment. [11]

II.3. Définition des ajouts cimentaires

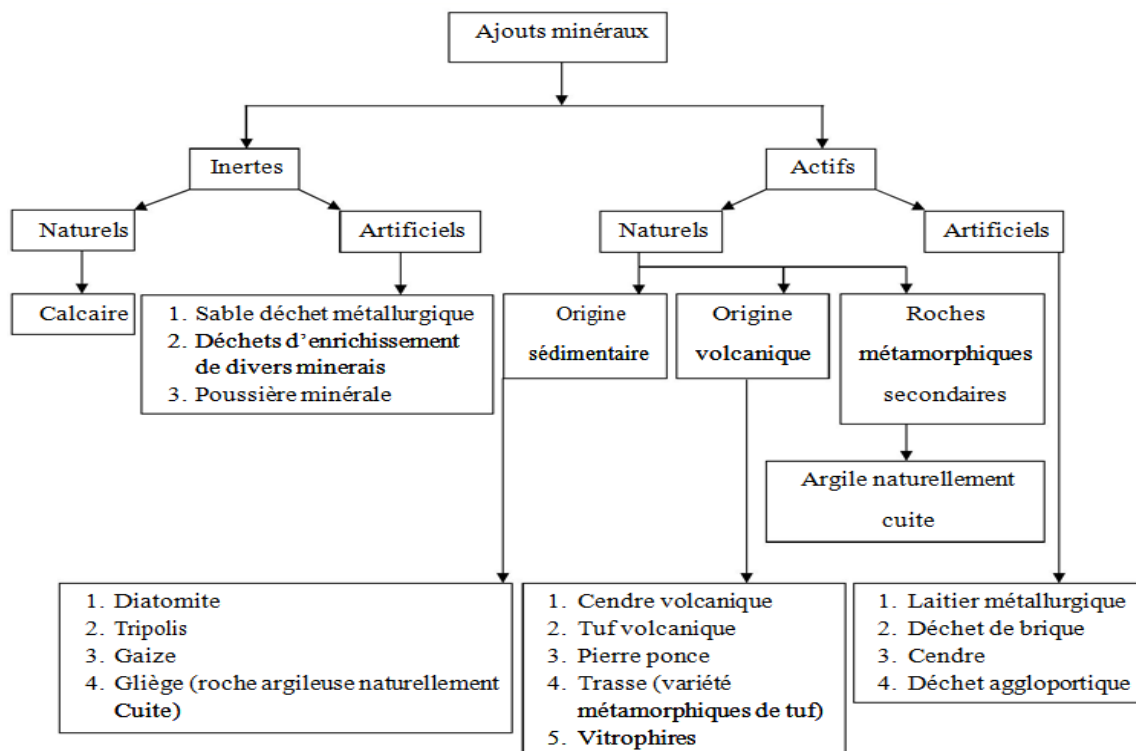
Les ajouts sont des matières premières naturelles, artificielles, sous produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluant, ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leurs pourcentages dans la masse varient suivant le but de l'addition et le rôle qu'elle peut jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. On distingue deux types d'ajouts : inertes et actives. [11]

II.4. Classification des ajouts minéraux

Selon la norme NF EN 197 1, les ajouts minéraux sont classés par deux types :

- Ajouts minéraux inertes;
- Ajouts minéraux actifs (naturels ou artificiels).

Figure II.1. Différents types d'ajouts cimentaires [7].



II.5. Principaux ajouts minéraux inertes (N F P 18- 305)

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière.

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégat. [12]

II.5.1. Fillers calcaires

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes ...etc.). [13]

Les fillers se différencient les uns des autres par :

- leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure; les impuretés qui' ils contiennent;
- leur finesse, la forme des grains, leur état de surface;
- leur dureté, leur porosité;

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles :

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle;
- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C_3S et du C_3A et à la formation de carboaluminates, germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates;
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulats [12].

II.5.2. Le marbre

Le marbre est une roche calcaire de texture assez dense, à tissu compact ou cristallin. Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect. Ces couleurs proviennent essentiellement d'oxydes métalliques du fer, il est blanc si la roche dont il provient est uniquement composée de calcite. [3]

Certains types de marbres portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte. Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangée à d'autres matières [3].

La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le blanc ils existent des variétés, beige, bleue, rose, gris, jaune, rouge, vert, violet ou noir.

Les produits marbrières algériens sont extraits et transformés conformément aux normes européennes : italiennes et françaises en particuliers. Les procédés utilisés en Algérie pour le travail du marbre sont ceux utilisés dans le monde:

- Sciage des masses au fil hélicoïdal, au fil diamanté et la haveuse pour l'abat âge et le tranchage des masses brutes de marbres naturels en carrières;
- Transformation en produits finis au moyen de lames et disques, débitages secondaires et ponçage avec des pierres ponces.

Le marbre est une roche métamorphique résultant de la transformation d'un calcaire pur « figure II.9.», souvent veiné de couleurs variées. Mis en œuvre dans la construction et la décoration, le marbre se révèle être une matière noble et durable très recherchée. [14]

Les roches métamorphiques sont issues de la transformation de roches préexistantes par une chaleur intense ou/et de très fortes pressions. [14]

Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect : il est blanc si la roche dont il provient était uniquement composée de calcite « figure II.2. ».



Figure II.2. Gisement de marbre.



Figure II.3. Poudre de marbre.

II.5.2.1. Composition minéralogique

Le marbre contient surtout de la calcite, mais peut contenir plus ou moins de la dolomite. On peut y trouver de la brucite, de l'olivine, de la serpentine, de la trémolite, du phlogopite en cas de transition vers les calcaires à silicates et la skarn. Les marbres sont

facilement rayés par le canif, ce qui sert à distinguer des quartzites blancs qui sont beaucoup plus durs. Le marbre a des cristaux généralement rhomboédriques.

Le marbre blanc est une roche de calcaire très pur « CaCO_3 », aussi c'est une calcite, qu'elle est l'un des minéraux les plus communs avec la dolomite représentant 22% des roches sédimentaires soit 273 millions de kilomètres cubes de roches carbonatées. Pendant très longtemps la calcite n'était connue que sous son nom de spath calcaire ou de chaux carbonatée. Peut-être est-ce Haidinger qui lui a donné le nom de calcite sous lequel elle est maintenant universellement connue. [3]

II.5.2.2. Utilisation

Du fait de sa résistance, de sa durabilité, de son aptitude au façonnage, de son adaptabilité architecturale et de son aspect esthétique, le marbre constitue depuis les temps historiques un important matériau de construction. L'industrie du marbre comprend deux branches principales: le marbre taillé et le marbre concassé et broyé. Le terme marbre taillé s'applique aux marbres exploités pour obtenir des blocs ou des plaques répondant à des spécifications de dimensions et de forme. Les fragments de marbre concassés et broyés vont des gros blocs aux granulés fins; on les utilise, par exemple, comme agrégats, ballasts, éclats pour toiture, charges, pigments, matériau pour le chaulage, etc. [3]

II.5.2.3. Le poudre de marbre

La poudre de marbre est une matière calcaire d'un blanc pur, au grain légèrement plus gros que la craie. Dans les temps anciens, elle a été utilisée comme fond, pour les fresques en raison de son imperméabilité parfaite. Elle a aussi servi comme matière de charge pour apprêts, pâtes de modelage et pigments. [3]

Pour le béton, des travaux ont vu le jour ces dernières années sur l'utilisation de cette poudre comme addition au béton.

II.6. Les ajouts minéraux actifs

II.6.1. La pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [15].

Les Normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments:



Figure II.4. : Pouzzolane

II.6.1.1. Pouzzolane naturelle

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.

II.6.1.2. Pouzzolane artificielle

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite et mouler.

On classe les pouzzolanes en trois catégories : [15]

- Les constituants actifs: phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées.
- Les constituants inertes: phase cristallisée autre que les zéolites.
- Les constituants nocifs: substances organiques et argiles gonflantes.

II.6.2. Fumée de silice

La fumée de silice est un sous produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de Ferrosilicium ou de zircone. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de Ferrosilicium). [3]

Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, SiO₂ se forme et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultra fines de silice SiO₂. [3, 11]

Tableau II.1. Composition chimique type de certaines fumées de silice [3]

Composés	Silicium (grise)	Ferro silicium (grise)	Blanche
SiO ₂	93.7	87.3	90.0
Al ₂ O	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
Fe ₂ O ₃	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2
Na ₂ O	0.2	0.2	0.9
K ₂ O	0.5	0.6	1.3
Perte au feu	2.9	0.6	1.2



Figure II.5. Fumée de silice

Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage. D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice (Tableau II.1.).

La teneur en SiO_2 de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée plus la teneur en SiO_2 de la fumée de silice est élevée.

Les fumées de silice produites durant la fabrication de silicium métal contiennent en général plus de 90% de SiO_2 . La fumée de silice produite lors de la fabrication d'un alliage Fe – Si à 75% à une teneur en silice généralement supérieure à 85%. Du point de vue structural, la fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse. [3]

Du point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre $0.03\mu\text{m}$ et $0.3\mu\text{m}$ (le diamètre moyen habituel se situant en dessous de $0.1\mu\text{m}$), de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/ 10 de micron.

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse.

Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler.

Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice. Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique.

La fumée de silice est aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, mais le terme fumé de silice est le plus généralement utilisé. La densité de la fumée de silice est

généralement de 2.2, mais aussi un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Elle est moins dense que le ciment Portland dont la densité est 3.1. Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise. Lorsque l'on considère les propriétés du béton aux fumées de silice, il importe de garder à l'esprit qu'on utilise ces dernières de deux manières différentes : [3]

✓ Comme substitut du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées, en général pour des raisons d'économie

✓ Comme ajout, pour améliorer les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci

II.6.3. Le Laitier de haut fourneau [16]

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.



Figure II.6. Laitier de haut fourneau

D'un point de vue chimique (tableau II.2.), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte.

Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au – dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément.

Tableau II.2. Composition chimique type de laitiers de haut fourneau [16]

Oxydes	Laitier français	Laitier nord U.S.A	Laitier algérien
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe ₂ O ₃	4%	0.3 à 20	2.0
MgO	6%	3 à 12	4.7
S	1.5%	-	0.15

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été broyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- Broyage poussé.
- Chaleur (étuvage, autoclavage).
- Produits chimiques (la chaux, la soude (NaOH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (gypse).

Cependant, comme on peut le voir dans le (tableau II-3) la composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut beaucoup varier. Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires. Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

- Les cendres silico-alumineuses (cendre de houille);
- Les cendres sulfo-calciques (cendre de lignite);
- Des cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines.

II.6.4. Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages de gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que Celles – ci sont reliées exclusivement au type d’impuretés qui sont contenues dans le charbon que l’on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables. [17]



Figure II.7. Cendres volantes

Cependant, comme on peut le voir dans le tableau (II.3) la composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier beaucoup

Tableau II.3. Composition chimique type de certaines cendres volantes [17].

Composés	Classe F	Classe F	Classe C	Sulfo-calciq	Sulfo-calciq
SiO ₂	59.4	47.4	36.2	24.0	13.5
Al ₂ O ₃	22.4	21.3	17.4	18.5	5.5
Fe ₂ O ₃	8.9	6.2	6.4	17.0	3.5
CaO	2.6	16.6	26.5	24.0	56
MgO	1.3	4.7	6.6	1.0	1.8
Na ₂ O	2.2	0.4	2.2	0.8
SO ₃	2.4	1.5	2.8	8.0	15.1
Perte au feu	2.0	1.5	0.6
SiO ₂ +AL ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	90.7	74.9	60	59.5	22.5
Chaux libre	28.0

La plupart des particules ont un diamètre compris entre 1µm et 100 µm, leur surface spécifique Blaine se situe généralement entre 250 et 600 m²/kg. La grande surface spécifique des cendres volantes signifie que le matériau réagit facilement avec l’hydroxyde de calcium.

D’une façon générale, l’introduction des cendres volantes dans le béton diminue la porosité et la perméabilité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives, en fixant progressivement la chaux. La cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable.

Il est reconnu que l'emploi des ciments aux cendres volantes entraîne une diminution du retrait hydraulique et thermique du béton. En plus des propriétés décrites, lorsqu'elles sont utilisées comme une fraction liante, les cendres volantes jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces [17]

II.6.5. La Poussière

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 $\mu\text{m}^2/\text{g}$. le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout. [19]

II.6.6. Le Verre

Dans un gaz, les atomes sont en agitation permanente et occupent tout le volume disponible : il est impossible de prévoir la position des atomes à un instant donné. En dehors des chocs, ces atomes ne sont pas en contact entre eux. L'état gazeux est un état totalement désordonné.

Un liquide occupe un volume constant, indépendant de la pression ; les atomes sont en contact entre eux. Même si les atomes ou les molécules sont très mobiles on peut définir leur proche environnement : on dit que les liquides possèdent un ordre à courte distance. [18]

II.6.6.1. Définition du Verre

L'état solide est plus ordonné que l'état gazeux ou que l'état liquide : les cristaux en sont une bonne illustration. Il existe des solides apparemment moins ordonnés : verre, polymères vitreux et des solides partiellement ordonnés comme les polymères semi-cristallins. Pour tous ces matériaux non-cristallins, il existe fréquemment une certaine forme d'ordre à courte distance, même si ce n'est pas l'ordre cristallin. [18]

Si l'on fond des cristaux de quartz naturel, on constate après refroidissement brutal que le matériau manifeste des propriétés différentes de celles du matériau initial. On obtient un verre : silice vitreuse.

- L'étude approfondie de la silice vitreuse, en particulier par diffraction des rayons X, montre que les distances interatomiques imposées par les liaisons covalentes sont toujours respectées.
- Les tétraèdres continuent à exister dans la silice vitreuse, comme dans la cristobalite, mais il n'y a pas de motif qui se répète périodiquement (Figure II.8).

- Les tétraèdres continuent d'exister en formant un réseau continu irrégulier et sont désorientés dans les trois dimensions [18]

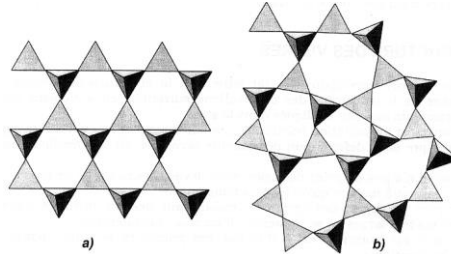


Figure II.8. a) Structure en anneau de la Cristobalite ; b) Modèle proposé par Zachariasen [3]

En 1921, LEBEDV avait proposé un modèle pour le verre prévoyant l'existence de très petits domaines ordonnés appelés cristallites et reliés les uns aux autres par des domaines désordonnés. La théorie de ZACHARASEN [1932] décrit la silice vitreuse comme un réseau désordonné conservant les assemblages SiO_4 de la cristobalite. Le passage de la cristobalite à l'état vitreux s'explique par une trop grande viscosité du liquide qui empêche les tétraèdres désordonnés de reformer la cristobalite. Le matériau n'est ni totalement désordonné (conservation des tétraèdres), ni dans un état métastable au sens de la thermodynamique mais il évolue simplement vers l'état cristallin avec une cinétique très lente. ZACHARASEN [1932] a formulé les quatre conditions suivantes pour la formation des verres d'oxydes:

- ✓ la coordinence du cation doit être petite;
- ✓ un ion oxygène ne doit pas être lié à plus de deux cations;
- ✓ les polyèdres construits par les oxygènes ne peuvent avoir en commun que leurs sommets et non leurs arêtes ou leurs faces;
- ✓ trois sommets au moins de chaque polyèdre doivent appartenir en même temps à d'autres polyèdres.

L'état vitreux est donc caractérisé par un désordre (Figure II-9-), proche de celui d'un liquide qui tend à cristalliser. La cinétique de cristallisation est, en général, suffisamment lente pour que le matériau apparaisse comme stable à l'échelle de la vie humaine.

La silice et tous les oxydes qui permettent de telles constructions sont appelés formateurs de réseau. Chaque liaison entre deux polyèdres est effectuée par un atome d'oxygène bivalent : un tel atome est appelé oxygène pontant.

On peut modifier la structure d'un verre en y introduisant des modificateurs de réseau. Ce sont des oxydes alcalins de formule M_2O , comme Na_2O et K_2O ou des alcalino-terreux de formule MO , comme CaO et BaO . En ajoutant les fondants (oxydes alcalins), la température de fusion passe de 1730°C à 1400°C (économie d'énergie) et les possibilités de travail sont facilitées. Avec Na_2O nous avons (figure II-10-)

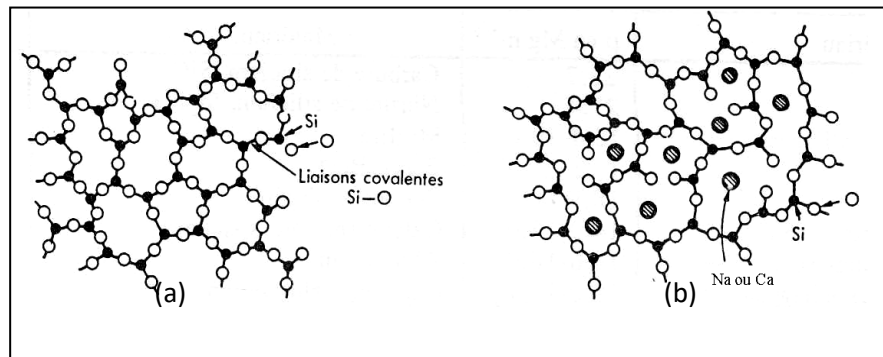


Figure II.9. a) L'empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de Na₂O et CaO brise des liaisons dans la silice amorphe et donne naissance au verre sodo-calcique [18].

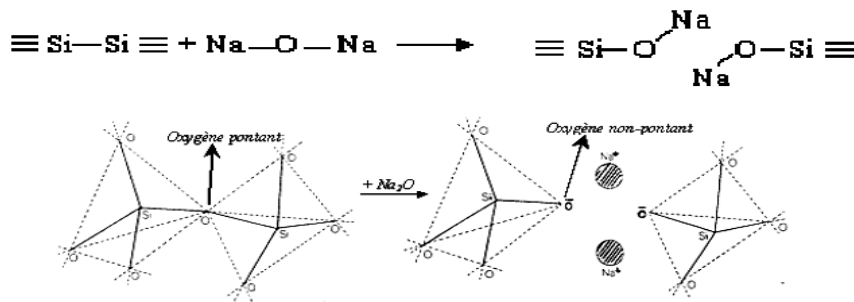


Figure II.10. Rupture d'un pont Si-O-Si par adjonction d'une molécule de modificateur Na₂O [18]

La présence de Na₂O provoque l'interruption des liaisons du réseau continu non cristallin, rendant le verre plus fluide à haute température. La formation de ces discontinuités entrain un affaiblissement de la structure vitreuse dont la solidité augmente avec le nombre de ponts Si-O-Si.

L'introduction de CaO entraîne l'existence d'ions O²⁻ liés au silicium d'un seul coté et apporte ainsi une certaine discontinuité au réseau. Mais la liaison CaO est considérablement plus forte que la liaison NaO, à cause de la bivalence de l'ion Ca²⁺, de sorte que les deux oxygènes non pontant se trouvent en quelque sorte liés à travers l'ion Ca²⁺ [18].

II.6.6.2. Comportement du verre dans un milieu cimentaire

Le verre incorporé dans les bétons peut manifester plusieurs types de comportement, essentiellement en fonction de sa granularité : une granularité grossière tend à provoquer un phénomène d'alcali-réaction générateur de désordres, alors qu'un verre fin développe une action bénéfique identifiable à une réaction pouzzolanique. [3]

II.7. Effets des ajouts sur les propriétés des bétons**II.7.1. Amélioration l'ouvrabilité**

Si nous ajoutons une quantité d'une fine poudre à un béton, nous diminuons le ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des cendres volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance. Pour cette consistance, l'utilisation de poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire. La demande en eau et la maniabilité d'un béton contenant des ajouts minéraux dépend de leur forme et de la granulométrie des particules [20].

II.7.2. Chaleur d'hydratation

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent, la fissuration d'origine thermique du béton. Cette chaleur est égale à environ la moitié de celle du ciment portland. [20]

II.7.3. Durabilité

Par rapport au ciment portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité pour un même rapport E/C, et une diminution de la quantité de CH. Les sulfates peuvent détruire le béton en se combinant avec les aluminates du ciment pour former de l'étrangeté expansive.

Les conditions pour que cette réaction se passe sont : la perméabilité du béton, la quantité de CH et la quantité d'aluminate dans le mélange à cause de leur bonne imperméabilité et surtout d'une faible quantité de CH, des bétons faits à partir de ciment au laitier résistent très bien à l'attaque des sulfates, malgré une quantité importante de C₃A dans le ciment. Les ajouts pouzzolaniques tels que le laitier, diminuent l'expansion des bétons qui se produit par réactions entre les alcalis du ciment et les granulats réactifs. Les alcalis sont piégés dans le C-S-H formé par l'ajout. [20]

II.7.4. Développement des résistances

Bien que le développement des résistances soit lent, les résistances à long terme dépassent quelques fois celles du ciment portland sans ajouts à condition d'optimiser la quantité d'ajout. Cette augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de C-S-H. [20]

II.7.5. Développement des bétons à haute résistances

L'utilisation des ajouts, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la durabilité des bétons, en remplacement d'une partie du ciment, tend à diminuer les résistances initiales et à augmenter les résistances finales.

Les pouzzolanes très réactives, comme les fumées de silice, sont capables de donner des bétons à haute résistances tant à jeune âge d'eau. Tous les ajouts utilisés qu'à long terme, surtout si la quantité d'eau est diminuée par l'addition d'un agent réducteur en remplacement partiel des granulats fins augmentent les résistances à tous les âges.

Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment Tandis que celles à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et remplacement du CH par C-S-H. [15]

II.8. Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux

- Retard de prise;
- Résistance à la compression à jeune âge plus faible;
- Mûrissement plus long;
- Résistance à l'écaillage controversée;
- Le broyage et le transport plus cher.

II.9. Rôle des ajouts minéraux actifs

Le rôle des ajouts minéraux actifs consiste à fixer la portlandite Ca(OH)_2 du ciment qui se dégage lors de l'hydratation de C_3S pour former des compositions difficilement solubles (stables) qui contribuent à la résistance du ciment.[20]

Les ajouts minéraux actifs améliorent la compacité du mortier et du béton, cette compacité donne une meilleure protection du ciment à l'agressivité des eaux douces et des sels.

II.10. Utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf. Le tableau (II.4.), (donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes).

Tableau II.4. Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [20].

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
ERCE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El Kebira	
	Hamma Bouziane	
	H'djar Essaoud	Laitier
	Tebessa	
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raïss Hamidou	Poussière
	Sour EL Ghozlane	Calcaire/Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	

II.11. Conclusion

L'utilisation de l'addition minérale dans les bétons est devenue nécessaire pour améliorer ses propriétés mécaniques et physiques et rhéologiques, et aussi pour des raisons économiques et techniques et écologiques.

Il y a plusieurs additions minéraux soit inertes ou bien actifs, dans notre mémoire nous allons utiliser trois composants supplémentaires dans la formulation de béton ils sont le poudre de verre, poudre de marbre et la fumée de silice.

Chapitre III: Essais non destructifs

III.1. Introduction

Les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, c'est 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. [21]

Le contrôle par essais destructifs nécessite la confection d'éprouvettes prélevées représentant un échantillon. Ce contrôle ne peut être effectué à 100 % ou tout au moins sur un échantillonnage significatif. De plus, l'échantillon prélevé n'est pas toujours représentatif du béton de la structure réelle. Ainsi, pour répondre à ces problèmes, on a développé une gamme d'essais in situ appelés « essais non destructifs » venant compléter les essais destructifs.

Les essais non destructifs consistent à prendre des mesures qui n'endommagent pas les constructions, ils représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées aux structures de bâtiments.

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.

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. [21]

III.2. But d'utilisation

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. [22]

III.3. Principaux domaines d'application

Les essais non destructifs permettent de contrôler la qualité de la construction et de mesurer de façon indirecte les caractéristiques des matériaux à savoir:[23]

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

III.4. Historique

L'essai non destructif du béton est de grande importance scientifique et pratique. Le sujet a suscité l'attention croissante pendant ces dernières années, particulièrement le besoin de caractérisation de la qualité des constructions endommagées faites en béton, en utilisant des méthodes non destructives.

Une gamme d'essais non destructifs in-situ, a été développée, par tant de chercheurs dans ce domaine : Le premier essai non destructif à été réalisé par WILLIAMS EN (1936), en suite et pendant le développement du domaine de construction, ERNEST SCHMILT (1948), JONES (1962), WHITEHURST (1966), MALHOTRA (1976) ont présenté une enquête complète de littérature sur les méthodes non destructives normalement utilisées pour l'essai et l'évaluation du béton, BUNGEY (1982). Au milieu des années soixante SKRAMTAEV ET LESHCHINSKY (1966) ont proposé pour la première fois l'utilisation de deux méthodes non destructives ensemble, et 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 réduction de la consommation de travail de l'essai, une diminution de la consommation de travail des travaux préparatoires, un peu de dommages structuraux, une possibilité d'examiner la résistance en structures ne peuvent pas être forés avec application de moins d'équipement d'essai cher, par rapport à l'essai destructif. Ces avantages sont sans valeur si les résultats ne sont pas fiables, représentatifs, et aussi étroitement comme possible à la force réelle de la partie examinée de la structure. [21]

III.5. Avantages de ces méthodes réside dans

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

III.6. Méthodes d'essais

III.6.1. Introduction

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 :

- Essai au scléromètre:
- Essai d'auscultation dynamique
- Méthodes combinées
- Méthode par carottage,...etc.

III.6.2. Essai au scléromètre

III.6.2.1. Introduction

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 en fonction de : [22]

- ✓ 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 d'essai au marteau Schmitt ou essai au scléromètre. Le marteau de Schmitt (figure III.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-entend des problèmes complexes d'impact et de propagation de l'onde qui lui sont associés.



Figure III.1. scléromètre

III.6.2.2. 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 la quelle frappe la masse.

Dans l'essai au scléromètre une masse approximative de 1.8 kg montée sur un ressort a une quantité potentielle fixe d'énergie qui lui est transmise par un ressort tendu à partir d'une position fixe, ce que l'on obtient en pressant la tête du marteau contre la surface du béton mis à l'essai. Lors de son relâchement, la masse rebondit depuis la tête, toujours en contact avec la surface du béton et la distance qu'elle parcourt, exprimée en pourcentage de l'extension initiale du ressort est appelée l'indice de rebondissement. Cet indice est indiqué par un curseur qui se déplace le long d'une règle graduée.

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. [21]

Tableau III.1. Moyens de mesure selon le type de recul au scléromètre. [21]

Type de recul	Moyen de mesure
Recul linéaire	Un indicateur à lame
Recul angulaire	Un système de freinage

III.6.2.3. Appareillage

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

L'appareil est composé d'une masselotte chargée par un ressort qui se projette sur une tige métallique appelée tige de percussion. Il est livré avec une pierre à polir et un bloc d'étalonnage [21]

III.6.2.4. Mode opératoire [23]

a - Préparation de la surface

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

b - Points de mesures

La surface de mesure doit être divisée en zones de 400 cm² au moins, et structurée en une grille de points de mesure ayant pour espacement $d = 30 / 50$ mm. Les points de mesures

extrêmes doivent être au moins à 30 mm des bords de la surface testée.

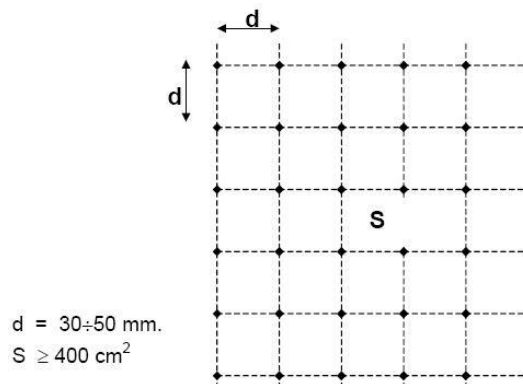


Figure III.2. Grille de mesure sur ouvrage [23]

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

c - Méthodes de mesure de l'indice de rebondissement

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

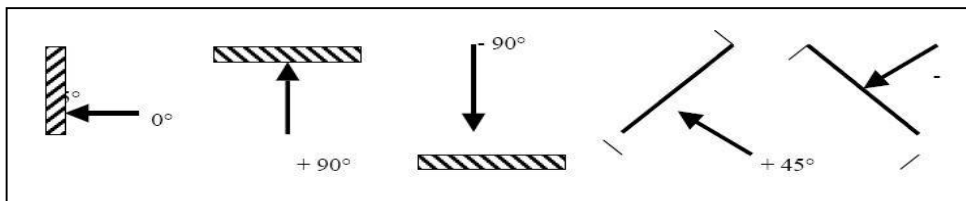


Figure III.3 Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter [21]

d - Étalonnage de l'appareil

Le scléromètre doit être contrôlé par des essais d'étalonnage, car les constantes des ressorts changent après plusieurs utilisations. Deux méthodes sont utilisées :

e - Sur Bloc en néoprène armé

Effectuer sur le bloc en néoprène, posé sur une assise rigide et plane, deux séries de 27 mesures espacées de 5 s et calculer la moyenne de l'indice sclérométrique I de la 2ème série. La position de l'appareil doit être verticale. Deux cas peuvent se présenter:

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

f - Sur éprouvette de béton

Cette méthode consiste à déterminer la moyenne de l'indice sclérométrique I par des mesures effectuées sur trois séries de trois éprouvettes de béton, correspondant aux trois classes de résistances à la compression 15, 25 et 35 MPa. Les mesures de l'indice I sont suivies d'un essai d'écrasement des éprouvettes. Les trois couples de valeurs sont reportés sur le graphique de la figure III.4. Dans le cas où les trois points représentatifs se retrouveraient à l'intérieur du fuseau, le fonctionnement de l'appareil est donc satisfaisant. Dans le cas contraire, le fonctionnement de l'appareil est défectueux. Une révision est nécessaire avec un certificat d'étalonnage. [24]

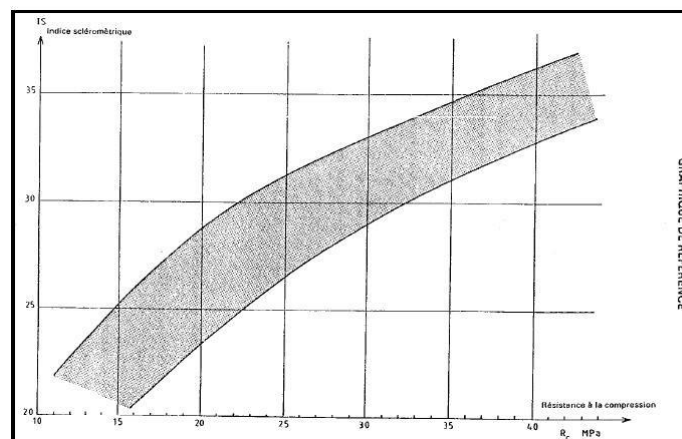


Figure III.4. Graphe de contrôle du fonctionnement de l'appareil [24]

III.6.2.5. Inconvénients de la Méthode sclérométrique

La méthode sclérométrique constitue une voie directe utilisée pour la détermination du degré d'homogénéité du béton et la dureté de la surface de l'élément en béton. Bien que l'essai au scléromètre soit utile, il ne constitue nullement une mesure fiable de la résistance du béton compte tenu des paramètres influant la précision de détermination de cette résistance.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour la transformation des indices sclérométriques en résistance mécanique à la compression du béton.

III.6.2.6. Interprétation des résultats de contrôle du béton au scléromètre

a - Méthode de la courbe de calibrage

De la même manière que pour l’ultrason, la courbe de calibrage est déterminée en effectuant l’essai au scléromètre sur au moins 30 éprouvettes. La courbe de calibrage doit être revue en cas de changement de la composition du béton ou des conditions de conservation. La précision sur la résistance du béton obtenue par la méthode de la courbe de calibrage est évaluée à ± (20% ÷ 25%). [23]

b - Méthode de la courbe unique

Dans la plupart des cas, la composition du béton ainsi que les conditions de conservation affectant la corrélation « Indice sclérométrique – Résistance du béton » sont inconnues. On utilise alors une courbe de transformation unique figurant sur l’appareil fourni par le fabricant. La précision sur la résistance du béton obtenue par la méthode de la courbe peut être évaluée à ± 50%.

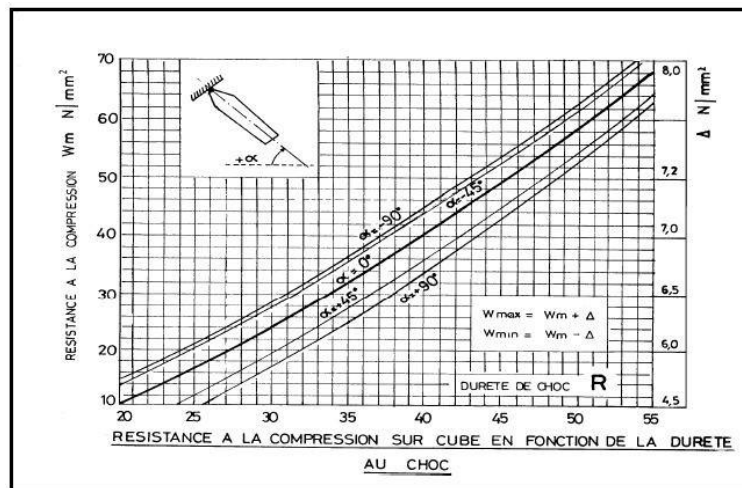


Figure III.5. Courbe de transformation unique [21]

La résistance du béton peut aussi être obtenue à partir de la formule suivante :

$$R = \frac{I^2}{32}$$

Avec:

R: résistance

I: indice sclérométrique.

III.6.2.7. Références normatives (NF EN 12504-2)

Essais pour béton dans les structures - Partie 2 : Essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement.

III.6.2.8. Les avantages

- ❖ C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide. FELDMAN (1977).
- ❖ L'essai au scléromètre est comparatif, il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués NEVILLE (2000).
- ❖ L'essai peut aussi être utilisé pour vérifier si la valeur de l'indice de rebondissement a atteint la valeur désirée correspondant à la résistance du béton, ce qui peut aider à décider du moment où l'on peut mettre la structure en service.
- ❖ Une utilisation de cet essai est de pouvoir vérifier si le développement de la résistance d'un béton a été affecté par le gel au jeune âge. (Selon la norme ASTM C 805-85 un béton encore gelé peut donner un indice de rebondissement très élevé).
- ❖ Une application particulière de l'essai au scléromètre consiste à évaluer la résistance à l'abrasion des planchers de béton, qui dépend largement de la dureté de surface. [24]

III.6.3. Essai d'auscultation dynamique**III.6.3.1. Introduction**

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée. [25]

III.6.3.2. 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. [25]

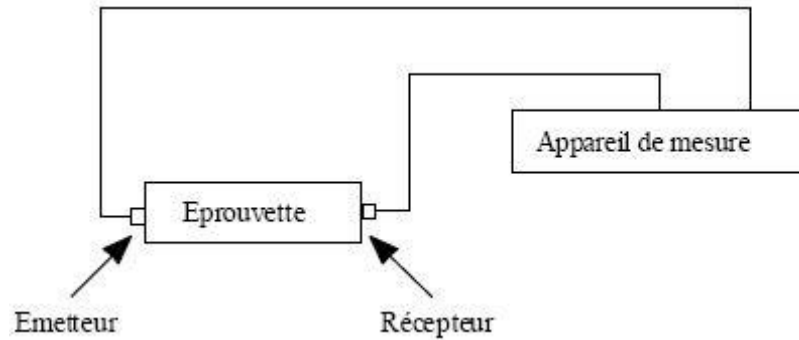


Figure III.6. Appareil de mesure [21]

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonique et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variables tels que l'âge 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 représentent 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 pratique, 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. [21]

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 influents toutefois sur la prise de mesures : [21]

- ◆ 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)
- ◆ 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'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

- ◆ 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).
- ◆ 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 l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion



Figure III.7. Appareil d'auscultation sonore 58-E48 avec oscilloscope [21]

III.6.3.3. Mode opératoire [27]

a - Travaux préparatoires

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

b - Points de mesures

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

c - Distances minimales entre points de peseurs

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

d - Étalonnage de l'appareil

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

e - 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 :

f - 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. (Figure III.8). [27]

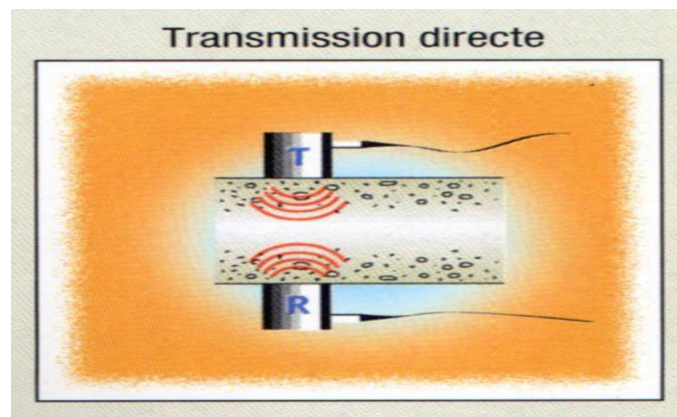


Figure III.8. Mesures en transparence (directe) [27]

g - 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 (III, 9), 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.

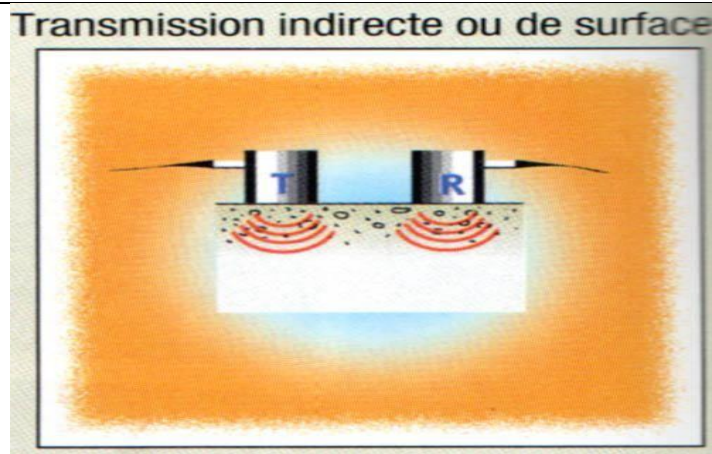


Figure III.9. Mesures en surface [27]

h- 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 III.10.)

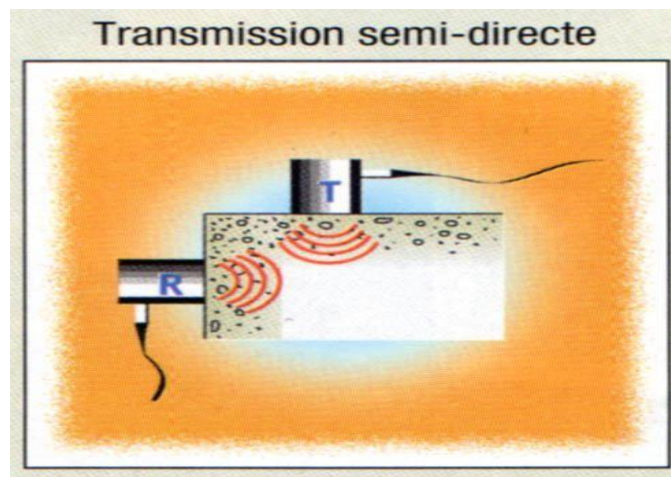


Figure III.10. Mesures semi directe [27]

III.6.3.4. 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. [21]

a - 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 soumise à des conditions d'essai identiques,

- ✓ 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 œuvre in situ. [24]

b - 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 granulats 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. [24]

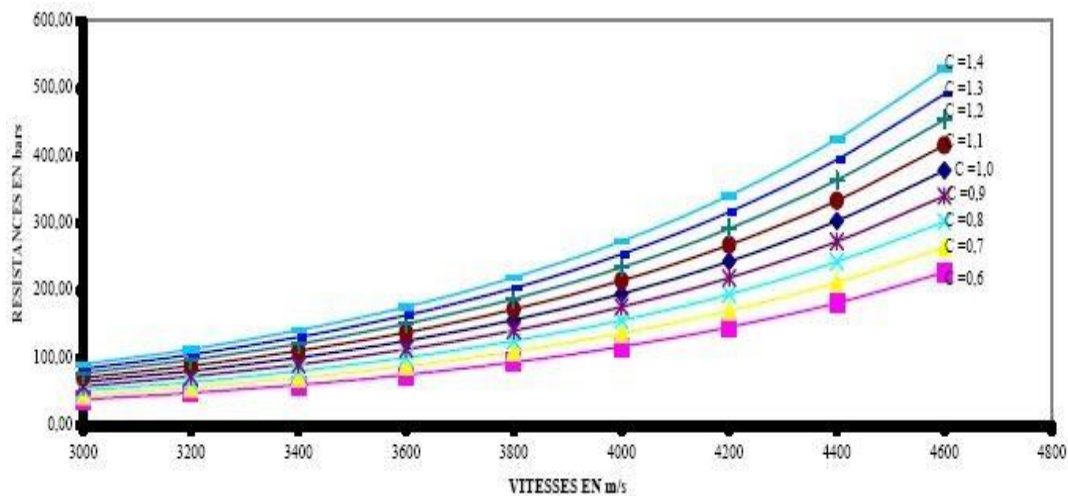


Figure III.11. Courbes de calibrages [24]

Excepté le cas où 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 du béton in situ sera étudiée au cas par cas.

c - Autres interprétations possibles

Les résultats obtenus en appliquant la courbe de la RILEM (voir figure III.10.) sont donnés dans le cas où le béton testé est considéré connu. 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: [24]

- 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

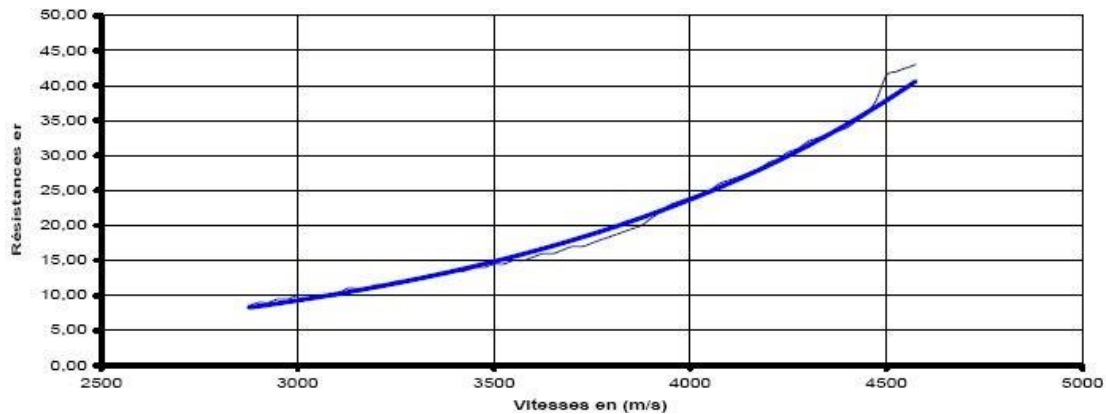


Figure III.12. Courbe RILEM [24]

III.6.3.5. Références normatives

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

III.6.3.6. Les avantages

- ❖ C'est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton.
- ❖ L'essai peut être utilisée autant sur les ouvrages complétés que sur ceux en construction.
- ❖ La mesure des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton. Et selon CHUNG ET LAW (1983) l'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour détecter la fissuration (mais les fissures parallèles au déplacement de l'onde), les vides de détériorations dues au gel ou de feu et l'uniformité du béton dans des éléments semblables. L'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour suivre les changements microstructuraux dans un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel-dégel.
- ❖ ELVERY ET IBRAHIM (1976) et pendant leurs études sur la relation de la vitesse et la résistance dans plusieurs âges ont montrés que l'essai peut aussi être utilisé pour évaluer la résistance du béton à très jeune âge, à partir de trois heures et plus, ce qui peut être intéressant dans le domaine de la préfabrication du béton ou comme outil de décision pour déterminer le moment adéquat des opérations de décoffrage. [26]

III.6.4. Méthodes combinées

III.6.4.1. Introduction

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 d'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 sclérométrique 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 grandes parties de la structure. Le soin devrait être pris pour considérer l'influence des tailles et des endroits variables des éléments structuraux. [27]

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 (3.11). La RILEM (1993) propose des recommandations sur l'utilisation combinée d'essais non destructifs [20]

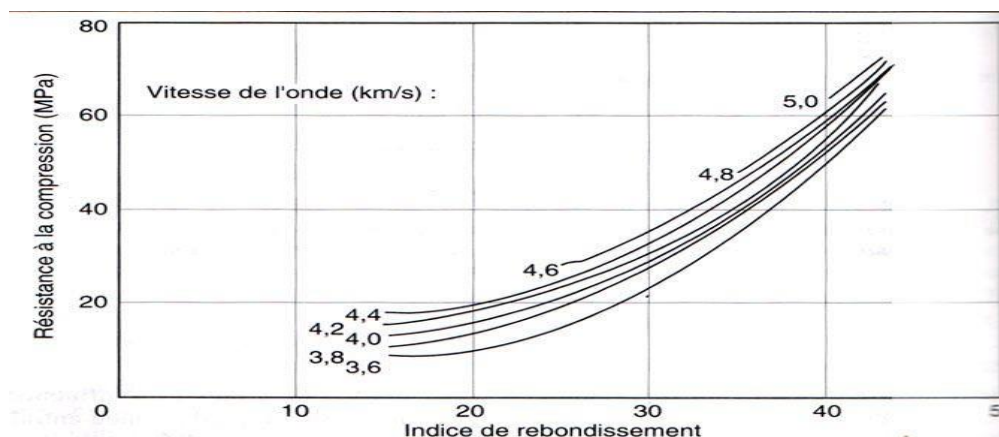


Figure III.13. Courbe d'estimation la résistance à la compression in situ par utilisation conjointe de la mesure de la propagation d'ondes ultrasoniques et des résultats d'essai au scléromètre selon U. BELLANDER (1977) [27]

III.6.4.2. Principe

Dans notre étude on s'est 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 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 aux laboratoires.

Cette technique est utilisée pour la détermination de la résistance en compression en tenant compte à la fois la 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: [27]

- 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.

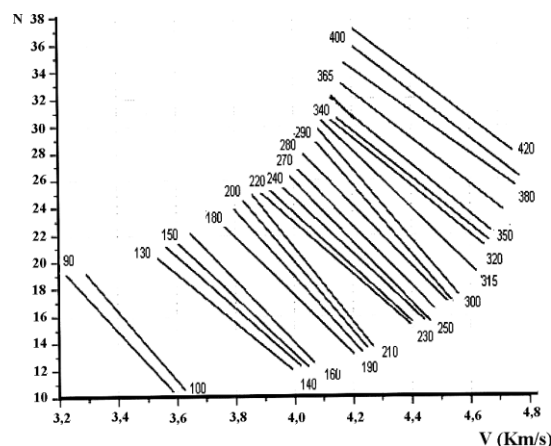


Figure III.14.: Abaque de la variation de la résistance à la compression en bars, en fonction de la vitesse des ultrasons (V) et de l'indice de rebondissement (N) du béton. CNERIB (1998). [21]

III.6.4.3. Les avantage

- ❖ L'utilisation combinée d'essais non destructifs garantit au résultat final obtenu une précision supérieure. Elle permet d'annuler des effets parasites. Par exemple lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires BELLANDER(1977)
- ❖ Cette technique est utilisée afin d'essayer d'augmenter la fiabilité des essais non destructifs en détectant la résistance du béton.
- ❖ Évaluer la qualité du béton in situ, avec un minimum de connaissance antérieure au sujet du béton examiner. [21]

III.7. Conclusion

Dans l'état actuel les habitudes d'évaluations de la qualité du béton dans les domaines de la construction, consistent à faire des essais destructifs à la compression ou à 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 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 Schmitt et des méthodes ultrasoniques de vitesse d'impulsion.

Ainsi il y a un besoin énorme des outils efficaces de méthodes END d'évaluer les éléments en béton dans les structures

Chapitre IV : Matériaux et procédures expérimentales

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que leurs caractéristiques et on présente les calculs de formulation de notre béton et d'écrit les différents modes opératoires des essais destructives (compression, flexion) et non destructives (l'ultrason, scléromètre).

IV.2 Caractéristiques des matériaux

Les matériaux utilisés dans notre étude sont des matériaux locaux, nous avons effectué des études expérimentales sur leurs caractéristiques au niveau du laboratoire de Génie Civil à l'Université Mohamed Boudiaf - M'sila.

IV.2.1 Ciment

Le ciment utilisé pour l'ensemble des compositions est un ciment portland composé (CPJ CEM II/A - 42,5) obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts (gypse et calcaire) et provenant de la cimenterie Lafarge de Hammam Dalâa (Wilaya de M'sila).

L'analyse chimique et minéralogique du ciment a été établie par la fiche technique. Les compositions chimiques et minéralogiques du ciment sont représentées au tableau (IV.1).

Tableau IV.1. Composition chimique et minéralogique du ciment. [3]

Composition chimique (%)										
Constituants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I	Totale
Clinker	18.51	4.88	2.96	58.3	1.85	2.39	0.1	0	8.74	97.746
Composition minéralogique										
Constituants	C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A			C ₄ AF		
Teneur	95		14		6			10		

Le tableau (IV.2) présente les résistances, le temps de prise et la fin de prise obtenus sur le ciment CEM II 42,5.

Tableau IV.2. Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment CEM II 42,5 (Mpa).[3]

Caractéristiques physiques		Caractéristiques mécaniques		
Poids spécifique (g/cm³)	3,01	Résistance en compression MPa (NA 234)	2 jours	24.81
Retrait (µm/m)	834		7 jours	11.22
Gonflement (µm/m)	0,00		28 jours	46.23
S.S. Blaine (cm²/g)	3410,	Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	2,51
Consistance (%H₂O)	028,3		7 jours	6,23
Début de prise (h:min)	2h :06'		28 jours	7,42
Fin de prise (h:min)	2h :56'			

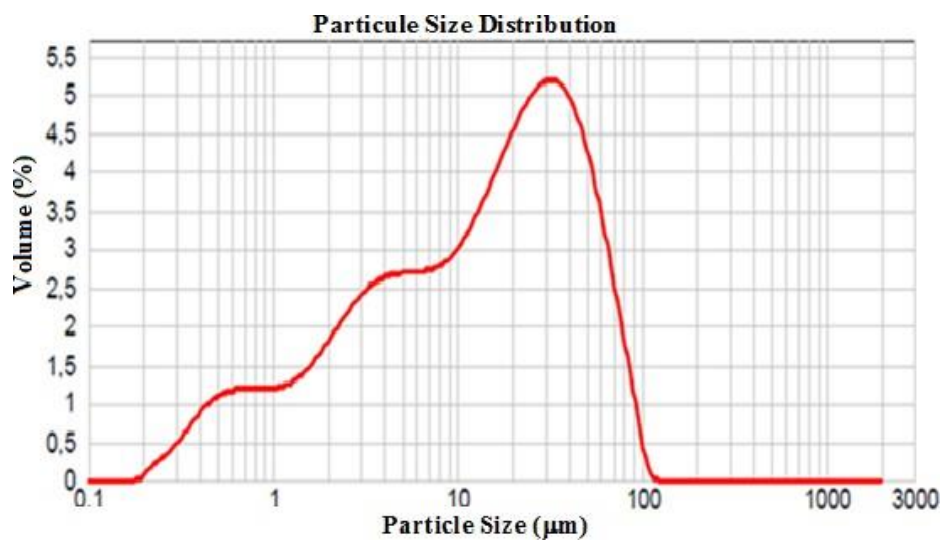


Figure IV.1. Distribution granulométrique du ciment anhydre CEM II 42,5Mpa. [3]

IV.2.2 Poudre de marbre

La poudre de marbre (PM) est une roche métamorphique compacte de la marbrerie de Bou-Sâada. Les caractéristiques de la poudre de marbre sont présentées dans le tableau (IV.3).



Figure IV.2 Poudre de marbre.

Tableau IV.3. Caractéristiques physiques de la poudre de marbre

Couleur	Structure	Masse Volumique	Masse spécifique	S.S.B
Blanche	Microcristalline	650,0 kg/m ³	2,68 g/cm ³	7500 cm ² /g

La composition chimique est indiquée dans le tableau (IV.4). Elle a été déterminée par l'essai de Spectrométrie à Fluorescence aux rayons X au laboratoire de la cimenterie de Lafarge hammam Dalâa . L'analyse s'effectue sur un échantillon finement broyé, afin de déterminer sa composition chimique.

Tableau IV.4 . Composition chimique de la poudre de marbre.[3]

Oxide	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	PAF
%	1.47	55.3	0.01	0.14	0.35	0.12	0.04	0.01	42.56

La composition minéralogique est indiquée dans le tableau (IV.5). Elle a été déterminée par l'essai de DRX au laboratoire de la cimenterie de Lafarge Hammam Dalâa.

Tableau IV.5. Composition minéralogique de la poudre de marbre, en%. [3]

Minéraux présents	Teneur
Quartz SiO ₂	2.2
Calcite CaCO ₃	52.2
Dolomite CaMg(CO ₃) ₂	31
Albite NaAlSi ₃ O ₈	-
Feldspaths K (Orthoclase) (K ₂ O 6SiO ₂ Al ₂ O ₃)	-
Illite 2K ₂ O Al ₂ O ₃ 24SiO ₂ 2H ₂ O	-
Total	100

Les analyses granulométriques laser sont données sur la figure (IV.3).

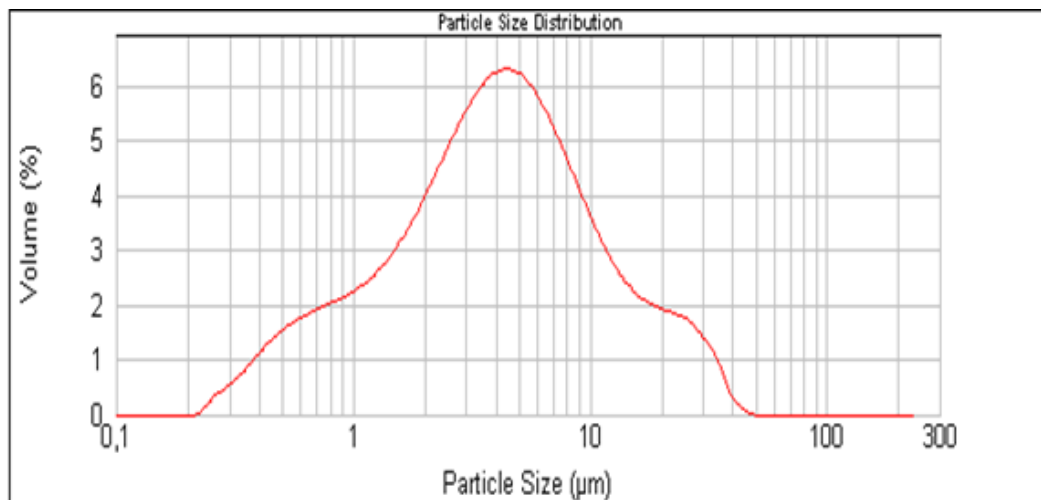


Figure. IV.3. Distribution granulométrique de la poudre de marbre. [3]

IV.2.3 Poudre de verre

La poudre de verre est obtenue après broyage de débris de verre transparent et après passage au tamis de 80µm pour aboutir à la finesse voulue. Les caractéristiques physico-chimiques de la poudre de verre sont illustrées dans les tableaux (IV.6, IV.7).



Figure IV.4. Poudre de verre.

Les analyses granulométriques sont réalisées par tamisage à sec sur les fractions supérieures à 80µm (NFP 94-040) et par sédimentométrie sur les fractions inférieures à 80µm (NF P 94-057). L'analyse granulométrique est illustrée par la figure (IV.5).

Tableau IV.6. Composition chimique de la poudre de verre.[3]

Oxides	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
%	72,84	0,98	0,55	9,66	1,76	0,25	0,43	12,69	0,01	0,04	0,79

Tableau IV. 7. Caractéristique physique de la poudre de verre. [3]

Caractéristiques	Poudre de verre
Densité absolu (Kg/l)	2.7
Surface spécifique (cm²/g)	8530
Couleur	blanc
Activité pozzoulanique	28,5 g (Ca(OH)₂/g (PV)

La composition chimique globale de la poudre de verre au tableau (IV.9) montre que le matériau contient principalement du silicium (72.84 % exprimé en SiO₂), des alcalins (12.69 % Na₂O) et du calcium (9.66 % exprimé en CaO). Le dosage en chlorure montre une faible teneur (0,11 %).

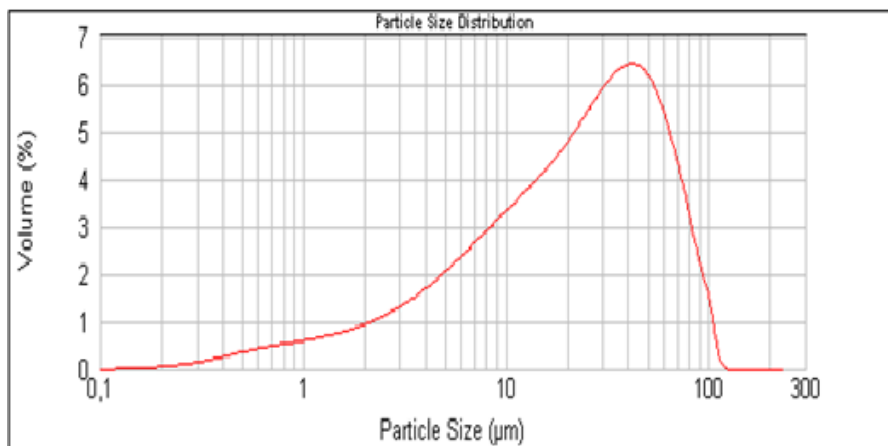


Figure IV.5. Distribution granulométrique de la poudre de verre. [3]

IV.2.3 La Fumée de silice (FS)

Les substances minérales sont composées essentiellement de silice de couleur grise claire comme le ciment, que possède une propriété pouzzolanique, grâce à la structure fine de la fumée de silice (10 à 20 fois que le ciment) (Figure IV.6). Ce produit est commercialisé par l'entreprise GRANITEX (Alger-Algérie).



Figure IV.6 : Poudre de la fumée de silice.

Tableau IV.8 : Caractéristiques chimiques et physique de la fumée de silice. [3]

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Valeurs	Unité
SiO ₂	85 – 95	Masse volumique absolue	2.2	g/cm ³
CaO	0.8 – 1.2			
MgO	1 – 2	Densité	250	kg/cm ³
Fe ₂ O ₃	0.05 – 1	Surface spécifique de Blaine	15000	m ² /kg
Al ₂ O ₃	1 – 3			
Pert au feu	0.5 – 1	Taille des particules	<1	µm

IV.2.5 Super plastifiant

Le MEDAPLAST SP40 est un super-plastifiant haut réducteur d'eau à base de polymères combinés, fourni par l'entreprise GRANITEX (Alger-Algérie). Il est recommandé dans la réalisation des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton.

L'adjuvant MEDAPLAST 40 permet d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et long terme. Il est applicable à tout type de ciment conforme à la norme EN934-2 NA 774. La page de dosage recommandée est : 0,6 à 2,5% du poids de ciment, soit 0.5 L à 2 L par 100 Kg de ciment. Ses caractéristiques physiques et chimiques sont représentées dans le tableau (IV.9).

Tableau IV.9. Caractéristiques de MEDAPLAST SP 40

Superplastifiant	Forme	Couleur	PH	Densité	Teneur en chlore	Extrait sec
Medaplast SP 40	Liquide	Brun clair	8.2	1.2±0.01	< 1g /l	40%

IV.2.6 Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisé est une eau potable pure et limpide apportée du laboratoire de l'université de M'sila. On a effectué les analyses chimiques au laboratoire de chimie (M'sila). Elle est donnée par (Tableau IV.10) :

Tableau IV.10 : Caractéristiques chimiques de l'eau.[26]

La mesure	Teneur en (mg/l)
Le temps de prise d'échantillon	10/05/2005 (9 :25)
Degré de température	24.7
PH	7.78
Conductibilité	1799
Chlore Cl ⁻	234.3
Sulfate So ⁻⁴	351.6
Magnésium Mg ²⁺	110.8
Sodium Na ⁺	/
Calcium Ca ²⁺	267.2
Sédiment sec	1412
Rééligibilité d'oxydation en eau	1024

IV.2.7 Caractéristique du sable

Le sable de base de notre recherche provient des abords d’Oued MAITAR (BOUSAADA).

IV.2.7.1 Essai d'analyse granulométrique [NF EN 933-1] :

Selon la norme indiquée, les résultats obtenus sont représentés dans le (Figure IV.6) suivant :

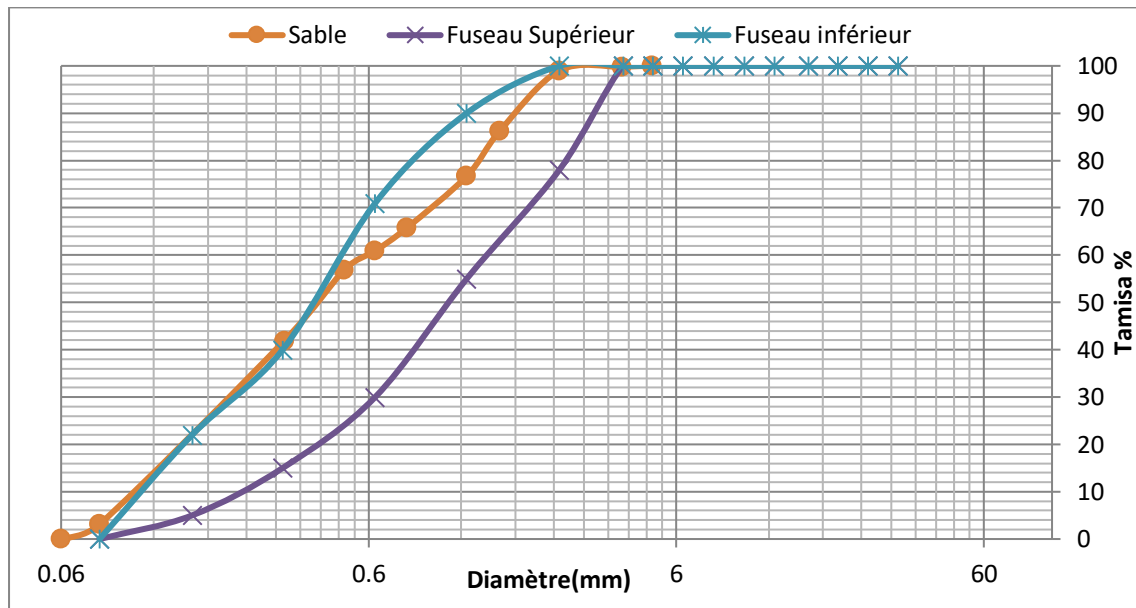


Figure IV.7 : Courbe d’analyse granulométrique du sable [NF EN 933-1].

IV.2.7.2 Module de finesse :

C’est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés par les tamis de maille : [0,16-0,315-0,63-1,25-2,5 ET 5(mm)] sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$Mf = \frac{\sum Rc}{100} \quad (III.13)$$

Où : **Rc** : Refus cumulé.

Pour le sable de Boussaâda : $Mf = 2.08$

Les normes soviétiques spécifient le Mf des sables comme suit :

- ✓ Sable gros $Mf > 2,5$;
- ✓ Sable moyen $2 < Mf < 2,5$;
- ✓ Sable fin $1,5 < Mf < 2$;
- ✓ Sable très fin $1 < Mf < 1,5$.

On se basant sur cette classification, on trouve le résultat suivant :

Pour le sable de Boussaâda : $2 < Mf < 2.5$ C’est un **Sable moyen**

IV.2.7.3 Masse volumique absolue [NF P18-555]

Calculée par la formule : $\rho_{abs} = \frac{M}{V_1}$, M=300g. Les résultats obtenus en (Tableau IV.11).

Tableau IV.11 : La masse absolue de sable en (g/cm³).

Essais	M _g	V _e (ml)	V (ml)	ρ _s en (g/cm ³)
1	300	300	413	2.58
2	300	300	420	
3	300	300	416	

IV.2.7.4 Masse volumique apparente [NF P18-555]

A- Masse volumique à l'état lâche

Qui est définie : $\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$ et les résultats en (Tableau IV.12):

Papp: Masse volumique à l'état lâche

M1 : Masse du récipient à vide .

M2 : Masse du récipient plus le sable .

Vr : Volume du récipient.

A- Masse volumique à l'état compact

Qui est définie: $\rho_c = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$, le (Tableau IV.12) représente les résultats obtenus :

ρ_c : Masse volumique à l'état compact

Tableau IV.12: La masse volumique apparente à l'état lâche et l'état compact en (Kg/l).

	N ° d'essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	V _R (ml)	ρ _{app} (kg/l)	ρ _{app} moy
LECHE	1	115	1421.4	900	1.451	1.471
	2	115	1448.1	900	1.481	
	3	115	1449.1	900	1.482	
COMPACT	1	115	1671.1	900	1.729	1.739
	2	115	1684.4	900	1.743	
	3	115	1685.4	900	1.744	

IV.2.7.5 Porosité

C'est le volume des vides entre les grains du sable .La porosité peut être déterminée par la formule suivante :

$$P(\%) = 100 - (Masse\ volumique\ apparente / Masse\ volumique\ absolue) \times 100$$

$$P(\%) = \left[1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right] \times 100$$

ρ_{app} : Masse volumique à l'état lâche

ρ_{abs} : Masse volumique absolue

IV.2.7.6 Compacité

La compacité d'un matériau est la proportion de son volume réellement occupée par la matière solide qui le constitue, c'est -à-dire le rapport du volume absolue des grains au volume apparent du matériau.

$$C(\%) = 100 - P$$

P(%) : Porosité en pourcentage

IV.2.7.7 L'indice des vides

L'indice des vides est le rapport entre le volume du vide et le volume de solide avec P en pourcent (%).

$$e(\%) = \frac{V_v}{V_s} = \frac{P}{(100 - P)}$$

V_v : volume du vide

V_s : volume du solide

Tableau IV.13 : Porosité, compacité et indice des vides.

Porosité P(%)		Compacité C(%)		Indice des vides e (%)	
Lâche	Compact	Lâche	Compact	Lâche	Compact
42.965	32.59	57.03	67.40	0.753	0.483

IV.2.7.8 Equivalent de sable [NF EN 933-8]

Cet essai qui s'effectue sur la fraction de sol ou de granulat passant, au tamis à mailles carrés de 5 mm, est réalisé pour déterminer le degré de pollution d'un sable.

❖ **Equivalent de sable visuel ($E_{S,V}$) :** $E.S.V = \frac{h_2}{h_1} * 100 (\%)$

❖ **Equivalent de sable piston ($E_{S,P}$) :** $E.S.P = \frac{h_2^2}{h_1} * 100 (\%)$

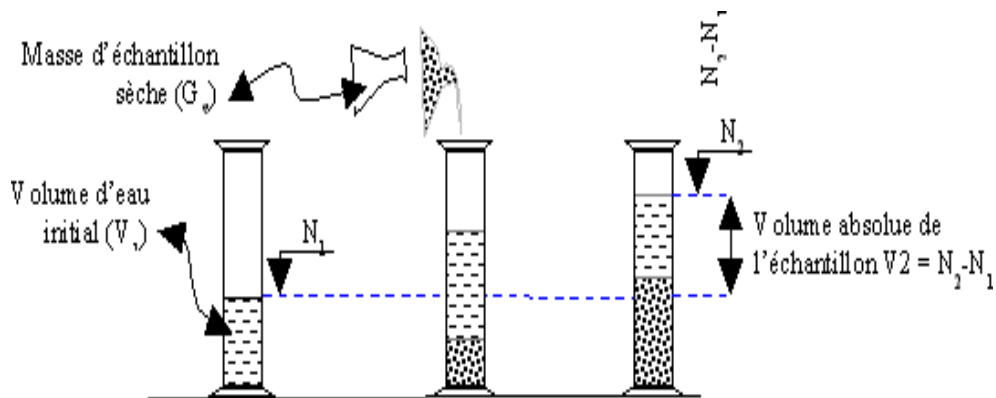


Figure IV.8 : Principe de l'équivalent de sable.

Tableau IV.14 Résultats obtenus pour l'équivalent de sable.

Essais	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	E.S.V (%)	h ₂ '(cm)	E.S.P (%)
1	11.7	10.5	89.74	9	76.92
2	10	9.1	91	8.5	85
3	10.5	9.5	90.47	8.8	83.80

h₁: hauteur du sable plus tube.

h₂: hauteur du sable.

h₂': hauteur du sable avec piston

$$E. S. V_{moy} = 90.40 \% \quad Et \quad E. S. P_{moy} = 81.910\%$$

Pour le sable de Boussaâda : C'est un **Sable très propre**

IV.2.7.9 Teneur en eau [NF P 18-555]

L'essai de teneur en eau permet de déterminer quel est le pourcentage massique (W%) d'eau dans le sable étudié, c'est-à-dire quelle est la masse d'eau présente par rapport à 300 grammes de sable sec.

Les résultats obtenus en (Tableau IV.15) que :
$$W = \frac{(M_h - M_s)}{M_s} * 100 (\%)$$

M_h: Masse des granulats humides.

M_s: Masse des granulats sec.

Tableau IV.15 : Teneur en eau de sable utilisé.

Essais	M _h (g)	M _s (g)	W(%)	W _{moy} (%)
1	300	297.2	0.942	0.593
2	300	299	0.334	
3	300	298.5	0.502	

IV.2.8 Caractéristique du gravier utilisé

Le gravier de base utilisé dans la confection du béton est obtenu, par concassage de la roche d'une carrière située à 25Km de M'sila, en allant vers B.B.A (carrière COSIDER).

- ✓ Fraction 3/8.
- ✓ Fraction 8/16.

IV.2.8.1 Analyse granulométrique [NF EN 933-5]

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, ...).

- Fraction 3/8 $M_{G3/8} = 1.6 \text{ kg.}$
- Fraction 8/16 $M_{G8/16} = 3.2 \text{ kg.}$

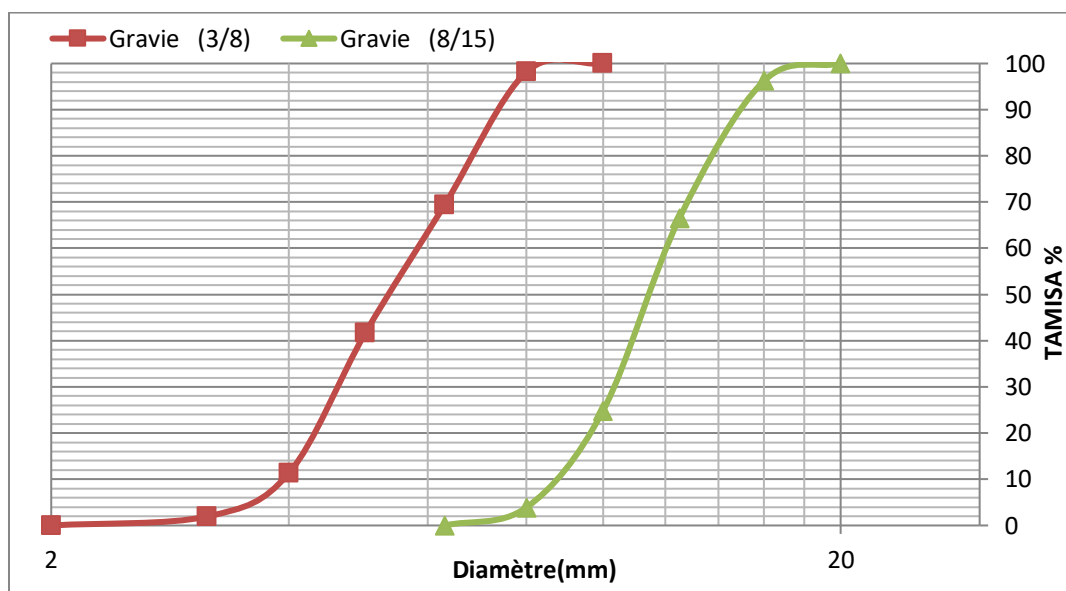


Figure IV.9 : Courbe analyse granulométrique d'un gravier de deux fraction (3/8, 8/16).

IV.2.8. Les caractéristiques physiques des graviers utilisés

IV.2.8.1 Masse volumique apparent [NF P 18-554]

Est déterminée par la formule suivante :

$$\rho = \frac{(M2 - M1)}{v}$$

M1 : Masse du récipient à vide.

M2 : Masse du récipient avec graviers.

Tableau IV.16 : Masse volumique apparente du gravier.

Gravier	V(l)	M ₁ (Kg)	M ₂ (Kg)	ρ (kg/l)	ρ _{moy} (kg/L)
3/8	7	2.925	12.304	1.340	1.34
		2.925	12.330	1.343	
		2.925	12.325	1.343	
8/16	10	3.465	16.760	1.3295	1.32
		3.465	16.775	1.331	
		3.465	16.750	1.3285	

IV.2.8.2 Masse volumique absolue

Le mode opératoire est même effectuée pour le sable, et les résultats sont regroupés dans le (Tableau IV.17).

$$\rho_{abs} = \frac{(M2 - M1)}{V}$$

Tableau IV.17 : La masse volumique absolue du gravier.

Gravier	Essais	M(g)	V _e (cm)	V (cm)	ρ _s (g/cm ³)	ρ _{S_{moy}} (g/cm ³)
3/8	1	300	300	415	2.608	2.67
	2	300	300	410	2.727	
	3	300	300	412	2.678	
8/16	1	300	300	418	2.542	2.57
	2	300	300	415	2.608	
	3	300	300	417	2.564	

IV.2.8.3 Compacité, porosité et l'indice de vide [NF EN 1097-4]

On calcule les paramètres (Tableau IV.18 :) et les mêmes formules que le gravier.

Tableau IV.18 : Porosité, compacité et l'indice des vides.

Fraction du gravier	Porosité P(%)	Compacité C (%)	L'indice des vides e (%)
3/8	49.75	50.24	0.99
8/16	48.29	51.70	0.93

IV.2.8.4 Teneur en eau du gravier [NF EN 1097-6]

Tableau IV.19: Teneur en eau des graviers.

Gravier	N°d'essai	M _h (g)	M _s (g)	W(%)	W _{moy} (%)
Gravier 3/8	01	500	499,4	0,12	0,133
	02		499,0	0,20	
	03		499,6	0,08	
Gravier 8/16	01	500	499,3	0,14	0,146
	02		499,2	0,16	
	03		499,3	0,14	

IV.2.9. Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés

IV.2.9.1 Essai Los Angeles [NF EN 1097- 2]

La résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité sans dimension est appelée, par définition, coefficient de Los Angeles du matériau (Figure III.5), que :

$$LA = \left(\frac{m}{M}\right) * 100.$$

M : la masse du matériau soumis à l'essai

m : la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm



Figure IV.10: Appareil de l'essai Los Angeles

Tableau IV.20 : Caractéristiques mécaniques du gravier recyclé.

Gravier	Masse initiale M (kg)	Masse m (kg)	coefficient de los Angeles L _A (%)
3/8	5	1.175	23.40
8/16	5	1,027	20.54

Le (Tableau IV.21) représente la classification des roches en fonction du coefficient Los Angeles.

Tableau IV.21: Classification des roches en fonction du coefficient L_A

Coefficient L_A	Nature de los Angeles L_A
<20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
<50	Très tendre

- Le gravier (3/8) : est un gravier **de nature dure** .
- Le gravier (8/16) : est un gravier **de nature Très dure** .

IV.3 Préparation et conditionnement des échantillons de béton

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux- Go risse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sable/gravillons sur une courbe de référence.

IV.3.1 La formulation de la composition des bétons ordinaire

L'objectif de toutes les méthodes de formulation des bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible.

Sur le graphe d'analyse granulométrique on trace la courbe granulaire de référence OAB.

- Point B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D des plus gros granulats. Point B :
- **$X = 16 \text{ mm}$**
- **$Y = 100 \%$**

Point de brisure A à pour coordonnées :

- En l'abscisse : **$D_{MAX} \leq 25, X = D/2;$**
- En ordonnée : **$Y = 50 - \sqrt{D} + K + Ks + Kp$**
- Les valeurs de K et Ks et Kp sont données par des tableaux.
- Dosage de ciment **$C = 350 \text{ kg/m}^3 \rightarrow K = 2,$** pour les granulats concassé.

Pour le dosage en ciment de 350kg/m³, et avec un granulat concassé et une vibration normale et le module de finesse

➤ $Mf = 2.08$ est :

➤ $Ks = -2.502$

➤ $K = 2$

➤ $Kp = 0$

Point A: $X = D/2 = 16/2 = 8mm$

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + Ks + Kp$$

$$Y = 50 - \sqrt{16} - 2.502 + 2 = 45.50$$

✓ Dosage des granulats:

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphe (Graphe -2-) que les courbes granulométriques des granulats composants.

On trace alors les lignes de partage entre chacun en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point à 5% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite.

On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats S, G3/8, G8/15 Les résultats obtenus sont :

$$\text{Sable (S)} = 36 \%$$

$$\text{Gravier (G3/8)} = 12 \%$$

$$\text{Gravier (G8/15)} = 52 \%$$

✓ coefficient de compacité γ :

$D = 16$ donc : Béton plastique $\gamma = 0,815$ Vibration puissante

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- sable roulé et gravier concassé = - 0.01 ; Donc $\gamma = 0.805$

✓ détermination de volume des granulats:

$$VC = \frac{C}{3.10} = \frac{350}{3.10} = 113l/m^3$$

$$Vg = VT - VC$$

$$Vg = 1000\gamma - VC$$

$$Vg = 1000(0.805) - 113 = 692 l/m^3$$

- ✓ détermination du volume absolu de chaque granulat:
 - *Volume absolu du sable* = $692 \times 0.36 = 249.54 \ell$
 - *Volume absolu de gravier (3/8)* = $692 \times 0,12 = 83.31 \ell$
 - *Volume absolu de gravier (8/15)* = $692 \times 0.52 = 359.15 \ell$
- ✓ Les masses spécifiques sont :
 - **Sable** = 2.58 g/cm^3
 - **Gravier (3/8)** = 2.67 g/cm^3
 - **Gravier (8/15)** = 2.57 g/cm^3
- ✓ Les dosages en matériaux secs seront donc en kg/ m^3 :
 - **Ciment** = 350 kg/m^3
 - **Sable** = $2.54 \times 249.54 = 632.46 \text{ kg/m}^3$
 - **Gravier (3/8)** = $2.56 \times 83.31 = 213.273 \text{ kg/m}^3$
 - **Gravier (8/15)** = $2.62 \times 359.15 = 940.58 \text{ kg/m}^3$
 - **Eau total** = 201 l/m^3

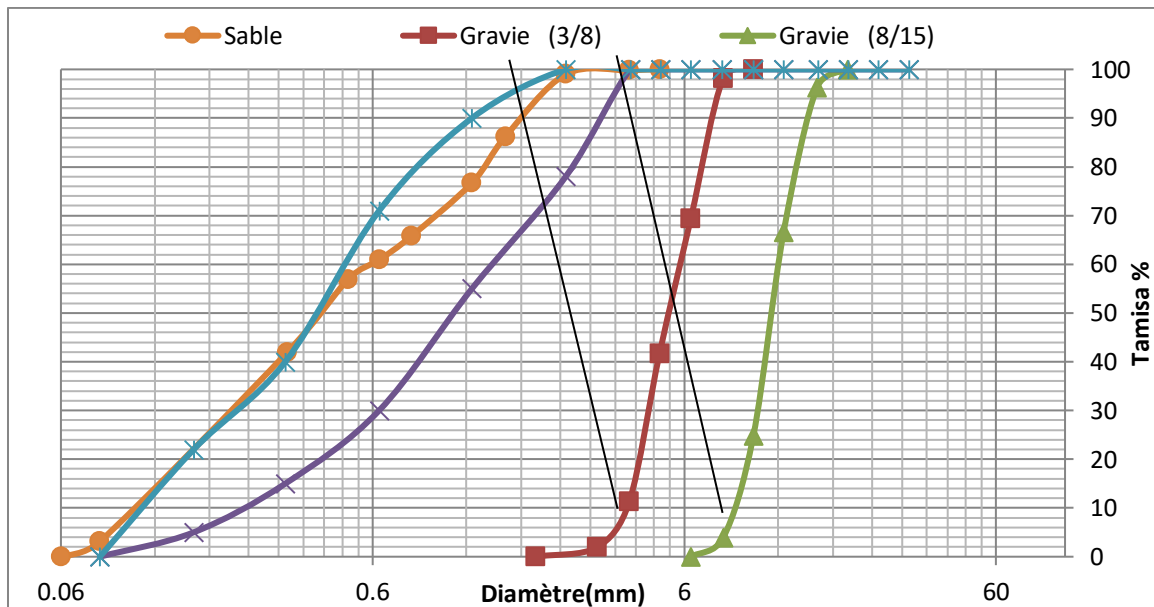


Figure IV.11. La courbe granulométrique.

Notre béton a été formulé d'après la méthode de Droux-Gorisse. Les constituants et leurs quantités sont présentés au Figure suivant (Figure IV.9).

Tableau IV.22 : La composition d'un m³ de béton ordinaire

Constituants	Quantité kg/m^3
Ciment	350
Gravier (3/8)	213.273
Gravier (8/16)	940.58
Sable (0/5)	632.46

IV.3.2 Composition des différents bétons ordinaires

Nous avons réalisé des essais sur des bétons confectionnés avec de super plastifiant et des additifs de bétons à base de ciment Portland substitué en poids par différents pourcentages voir le tableau (**Tableau IV.23**) et (**Tableau IV.22**) .

Tableau IV.23 : Liste de Description bétons étudiés.

Désignation	Description
BF 0	Béton témoin
A1015	béton de 5% fumée de silice et 10 % de poudre verre et 15% de poudre marbre
A1510	béton de 5% fumée de silice et 15 % de poudre verre et 10% de poudre marbre
B1010	béton de 10% fumée de silice et 10 % de poudre verre et 10% de poudre marbre
B155	béton de 10% fumée de silice et 15 % de poudre verre et 5% de poudre marbre
B515	béton de 10% fumée de silice et 5 % de poudre verre et 15% de poudre marbre
C150	béton de 15% fumée de silice et 15 % de poudre verre et 0% poudre de marbre
C510	béton de 15% fumée de silice et 10 % de poudre verre et 5% de poudre marbre
C105	béton de 15% fumée de silice et 10 % de poudre verre et 5% de poudre marbre
D1015	béton de 5% fumée de silice et 10 % de poudre verre et 15% de poudre marbre
D1510	béton de 5% fumée de silice et 15 % de poudre verre et 10% poudre de marbre
F515	béton de 10% fumée de silice et 5 % poudre de verre et 15% poudre de marbre

Tableau IV.24 : Liste de différents bétons étudiés en pourcentage.

Béton	Verre (%)	Marbre (%)	Fumée de silice (%)	Ciment (%)	superplastifiant (%)
BF 0	0	0	0	100	0
B1010	10	10	10	70	0
C150	15	0	15	70	0
A1015	10	15	5	70	0
B515	5	15	10	70	0
C510	5	10	15	70	0
C105	10	5	15	70	0
A1510	15	10	5	70	0
B155	15	5	10	70	0
D1015	10	15	5	70	1.5
D1510	15	10	5	70	1.5
F515	5	15	10	70	1.5

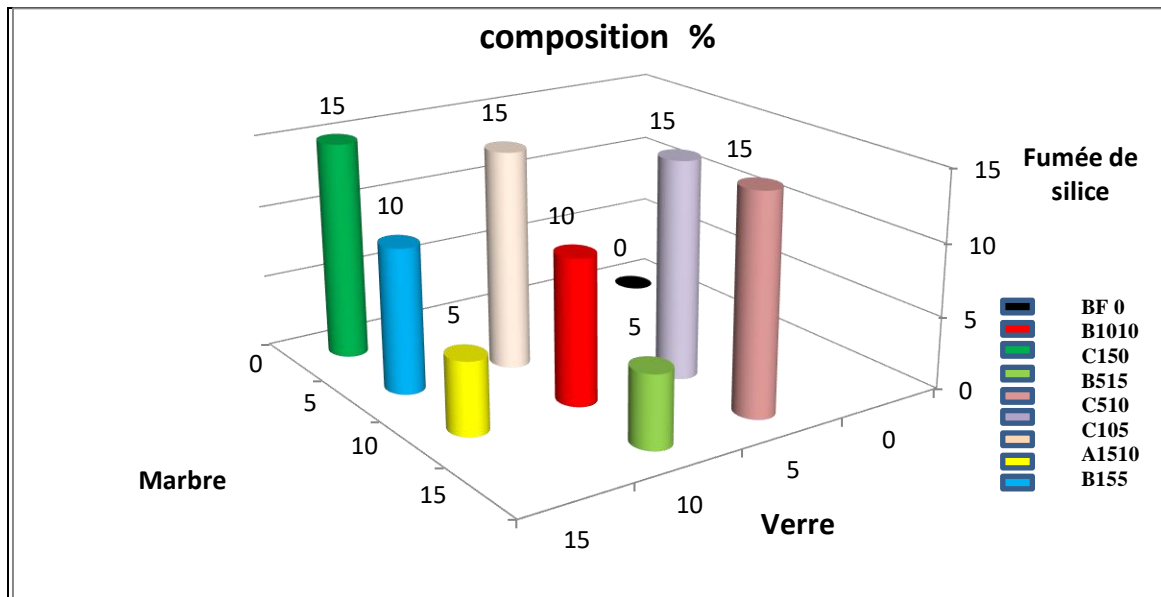


Figure IV.12. Présentation des différents bétons étudiés

Ces bétons ont été conservés pendant 28 jours dans une eau de robinet, on effectué sur ces béton différents essais physiques et mécaniques (masse volumique, essais au cône d'abrams, essais à la compression, essais à l'ultrason, essais sclérométriques). Les tableaux (IV. 23) et (IV. 24) donnent la composition des différents bétons étudiés.

Tableau IV.25. Les quantités des constituants des mélanges des bétons ordinaires

Composition	Désignation des bétons ordinaires												
	BF 0	B1010	C150	A1015	B515	C510	C105	A1510	B155	D1015	D1510	F515	
E/L	0.55	0.65	0.70	0.56	0.66	0.68	0.66	0.61	0.65	0.52	0.49	0.49	
Eau (L)	5.28	6.28	6.8	5.45	6.4	6.6	6.4	5.9	6.3	2.52	2.4	2.4	
Ciment(kg)	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	4.83	4.83	4.83	
G (3/8)(kg)	5.96	5.960	5.960	5.960	5.960	5.960	5.96	5.96	5.96	2.94	2.94	2.94	
G (8/16)(kg)	26.3	26.30	26.30	26.30	26.30	26.30	26.3	26.3	26.3	12.97	12.97	12.97	
S (0/5)(kg)	17.4	17.46	17.46	17.46	17.46	17.46	17.4	17.46	5.96	8.72	8.72	8.72	
Poudre de marbre (kg)	0	0.98	1.47	1.47	1.47	0.98	0.49	0.98	0.49	0.724	0.483	0.724	
Poudre de verre (kg)	0	0.98	0	0.98	0.49	0.49	0.98	1.47	1.47	0.483	0.724	0.24	
Fumée de silice (kg)	0	0.98	1.47	0.49	0.98	1.47	1.47	0.49	1.47	0.24	0.24	0.483	
Super plastifiant (kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.072	0.072	0.072	
Volume (m³)	0.028									0.0138			

IV.3.3 Fabrication et conditionnement des éprouvettes

Le béton a été coulé dans les moules cubiques et prismatiques qui a été vibrée sur une table vibrante pendant 10 secondes. Pour réaliser les essais, nous utiliserons des moules cubiques de dimensions 10 cm x 10 cm x 10 cm et des moules prismatiques de dimensions 7 cm x 7 cm x 28 cm, les éprouvettes cubiques sont destinées aux essais de la masse volumique, essais au cône d'abrams, essais à la compression, essais à l'ultrason, essais sclérométriques). Les éprouvettes prismatiques sont réservées à la mesure de la résistance à la flexion et la porosité.



Figure IV.13 : Type des éprouvettes utilisées : prismatique, cubique.

IV.3.4 Procédure de fabrication des bétons

On sait que le béton est le matériau obtenu par solidarisation par un liant de ciment, un squelette granulaire compose d'un ou plusieurs sables et d'un ou plusieurs graviers.

- ✚ Vérifier en premier le nombre et l'état des moules prismatique et cubique nécessaires pour les essais, ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- ✚ Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- ✚ Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, si non les sécher préalablement dans l'étuve.
- ✚ Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée, le super plastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.
- ✚ Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, fumée de silice et poudre de marbre et de poudre de verre) .
- ✚ les constituants sont introduit dans le malaxeur à l'ordre suivant :gravier 3 /8 , 8 /16 , ciment+sable de dune et de poudre de marbre et de poudre de verre et de fumée de silice .
- ✚ Malaxer pend 1min et 30 secs.
- ✚ L'eau de gâchage est ajoutée à un tiers du volume de super plastifiant et de malaxage se poursuite pendant 2.5 mn.
- ✚ Le super plastifiant restant est ajouté avec un malaxage final d'une minute
- ✚ Malaxer pendent 3min et ajouter l'eau tout attentivement.

- ✚ Mesurer l'affaissement à chaque fois par cône d'Abrams jusqu'à la valeur désirée ($7\text{cm}\pm 0,5$)
- ✚ On remplit les moules de béton, l'exécution en trois couches.
- ✚ On fait la vibration sur la table vibrante pendant 20s.
- ✚ Peser 3 moules avant et après leur remplissage et la vibration pour déterminer la masse volumique de béton à l'état frais.
- ✚ Maintenir les éprouvettes à l'air libre au laboratoire pendant 24 h et faire la cure et marquer par peinture et conserver dans un bac d'eau jusqu'au jour d'essais (7,14 et 28).

IV.4 Essais à l'état frais

IV.4.1 Affaissement au cône d'Abrams (slump test) NF P18-305

C'est l'essai le plus souvent utilisé car il est très simple à mettre en œuvre, il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40mm, il réalise à l'ordre suivant :

- ✓ Introduire le béton dans le moule légèrement humidifié et huilé en trois couches d'égales
- ✓ Piquer chaque couche 25 coups avec une tige de $\Phi = 16\text{mm}$.
- ✓ Araser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur de moule.
- ✓ Démouler le cône et mesurer l'affaissement à l'aide d'un portique et arrondi au centimètre



Figure IV. 14 : Mesure de l'affaissement.

IV.4.2 Vibration NF P 18-421

La vibration est la méthode de compactage la plus répandue, le degré de compactage d'un béton frais par vibration dépend de la fréquence et de l'amplitude des oscillations, ainsi que de la durée de vibration.

- ✓ Remplir les moules cubique $10\times 10\times 10\text{ cm}^3$ prismatiques $7\text{ cm} \times 7\text{cm} \times 28\text{ cm}$.
- ✓ Faire la vibration sur la table vibrante pendant 15s.
- ✓ Peser les moules avant et après leur remplissage et la vibration pour déterminer la masse volumique de béton à l'état frais.
- ✓ Procéder à l'arasement.

Les éprouvettes sont maintenues à l'air libre au laboratoire pendant 24h puis décoffrées et marquer par marqueur et conserver dans l'eau.



Figure IV. 15 : Table de vibration

IV.5 Essais à l'état Durci

IV.5.1 Cure appliquée [NF P 18-404]

Toutes les éprouvettes utilisées dans cette campagne expérimentale ont suivi la même cure et le même conditionnement suivant la norme NF P 18-404. Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées pendant 24 heures dans leur moule à température ambiante (20 ± 2) °C. A l'issue de ce temps de conservation initiale, elles ont été démoulées, puis plongées dans l'eau à 20 °C pendant (07, 14, 21, 28) jours. Ce mode de conservation permet d'assurer l'hydratation du béton et d'éviter toute fissuration due à la dessiccation. Il permet également de maintenir les bétons saturés et de se rapprocher ainsi des conditions réelles qu'on peut rencontrer dans certains ouvrages souterrains



Figure IV.16. Conservation les éprouvettes dans l'eau.

IV.5.2 La Résistance à la compression (essais d'écrasement) [NF P 18- 406]

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle, la détermination de cette résistance est nécessaire pour contrôler cette qualité essentielle de notre du béton.

L'essai consiste à placé entre les plateaux d'une presse hydraulique de capacité 3000KN à une vitesse constant (0,5 KN/S) des éprouvettes cylindriques de dimension (10X10X10)cm.

Celles –ci doivent être bien centrées entre les plateaux afin d'éviter l'apparition des moments dus l'excentricité de la charge de compression .On calcule la résistance à la compression par la relation.

Où : R_c : résistance à la compression (MPa).

F : la charge de rupture (N).

S : section de l'éprouvette (mm²).

$$R_c = \frac{F}{S}$$



Figure IV.17 : Machine d'essai de compression .

IV.5.3 Essai de la Traction par Flexion [NF P 18-407]

Les résultats des tests en flexion trois points indiquent le comportement mécanique des eprouvettes 7X7X28 cm³. La Figure III .10 représente le principe de sollicitation de l'éprouvette en flexion trois points Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes.

$$F_{tj} = \frac{1.8P}{a^2}$$



Figure IV.18 : Principe de l'essai traction par flexion.

IV.5.4 Mesure du taux d'absorption d'eau

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau des éprouvettes de bétons non saturées. L'essai a été réalisé sur des échantillons moulés de forme cubique $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ (trois échantillons par formulation). Les échéances de mesure sont les échantillons et conservation dans l'eau.

Mode d'essai :

- ✓ séchées les éprouvettes à la température de 105°C pendant 24 jusqu'à masse constante.
- ✓ Pesée de l'échantillonnage sec M 1
- ✓ Émersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24
- ✓ Pesée de l'échantillonnage l'air M 2

Calcul taux d'absorption

Calculer par la formule :

$$\text{Abs}(\%) = \frac{M2 - M1}{M1}$$

Abs(%) : taux d'absorption.

M1 : masse d'éprouvette après l'étuvage.

M 2 : masse d'éprouvette saturée d'eau.

IV.5.5 Porosité ASTM - C642

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la porosité du béton. Parmi cette méthode, la norme ASTM désignation C642. [27]

Le but de cette méthode est de déterminer le pourcentage en volume des pores contenus dans l'éprouvette, afin de connaître l'influence de la structure interne du béton sur l'interconnexion des pores. [27]

Mode d'essai : [27]

- ✓ Séchage la étuve a 105° C de l'échantillon, pendant au moins 24 heures, jusqu' a obtention d'une masse constante, afin de faire évaporé toute la quantité d'eau évaporable. Cette masse est note A.
- ✓ Émersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24
- ✓ Chauffage jusqu' a évolution pendant 5 heures, puis pesage de l'échantillonage l'air (soit C ce point) puis pesage a l'eau (pesée hydrostatique, soit D ce point).

✓ **Calcul de la porosité**

Calculer par la formule :

$$V_p(\%) = \frac{C - A}{C - D} * 100$$

V_p : volume des vides.

A : poids de l'échantillon après étuvage (g).

C : poids a l'air immersion et ébullition (g).

D : poids à l'eau immersion et ébullition (g).



Figure IV.19 : Essai de mesure dans l'eau



Figure IV.20 : Essai de Chauffage

IV.5.6 Essais non destructifs**IV.5.6.1 Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NF EN 12398]**

Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilisé de nos jours. Le scléromètre est un appareil simple qui mesure la " dureté au choc" du béton au voisinage de la surface (Indice sclérométrique).



Figure IV.21 : Principe de l'essai scléromètre.

IV.5.6.2 Les Ultrasons [NF EN 12504-4]

Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton (Figure IV.20).

En a effectuer les mesures sur les éprouvettes après les faire sortir du bac de conservation et les laisser sécher pendant 24h. Les éprouvettes cubiques sont préparées pour effectuer des essais d'auscultation dynamique. Cette réparation consiste à faire certaines opérations préliminaires à savoir la calibration de l'appareil et marquer les points d'essais sur les éprouvettes afin de centrer les ondes dans la structure béton. Sur chaque éprouvette cubiques nous avons effectué 3 mesures, La vitesse (V) du parcoure est lu directement sur un écran digital au moment de leur stabilisation.



Figure IV.22 : Appareil ultrason.

IV.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons identifié les différentes caractéristiques physiques et chimiques des matériaux et aux vues des résultats des essais de masse volumique, des analyses granulométriques, l'équivalent de sable, le mode de conservation et les propriétés à l'état frais ainsi qu'à l'état durci soit par l'ultrason, scléromètre ou bien l'écrasement ce qui est étudié en détail, nous avons pu aboutir à la formulation idéale du béton.

Chapitre V : Résultats et discussion

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse des essais mécaniques destructifs tels que (compression et flexion) et non destructifs tels que (scléromètre et l'ultrason) plus les essais physiques à l'état frais et durci pour voir l'influence de (E/L, la masse volumique), aussi (l'absorption et la porosité) pour avoir une idée sur la durabilité du béton additionné par trois types d'ajouts : (Fumée de silice, poudre de marbre et poudre de verre). Enfin, dans l'analyse de ces résultats on va baser sur l'étude statistique pour trouver une corrélation entre les deux types des essais qui sont indiquées au précédent. Aussi voir l'influence de la nature, et le pourcentage des additions sur les propriétés du béton.

V.2 Méthodologie adaptée pour les manipulations

Dans ce travail, nous avons opté, afin d'atteindre la formulation et la caractérisation de béton, pour les essais proposés la méthodologie suivante :

- ✓ Nous avons préparé différents mélanges de béton pour confectionner 144 éprouvettes cubiques (10×10×10) cm³, et 81 éprouvettes prismatiques (7×7×28) cm³.
- ✓ La formulation a été préparée par la méthode DREUX-GORISSE
- ✓ On a élaboré différents pourcentages d'additifs (entre 5% et 15%) et d'adjuvants (entre 0% et 1,5%)
- ✓ On a effectué des essais à différents âges : 7 j, 14 j et 28 jours.
- ✓ Grâce à ces essais effectués, conformes aux normes, nous allons déterminer les différentes caractéristiques suivantes : (La masse volumique, rapport (E/L), l'absorption d'eau, la porosité, l'indice sclérometrique (Is), la vitesse ultrasons (V) et la résistance à la compression (Rc), enfin la résistance à la flexion (Rf).

V.3 Présentation des résultats

Dans cette partie, nous avons discutée les résultats obtenu d'après les essais exécutés afin de caractériser les bétons hydrauliques confectionnés, en deux états essentiels : « frais et durci » à partir des mélanges obtenus suivante la formulation utilisée et choisi aussi.

V.4 A l'état frais (propriétés physiques)

Premièrement on présente les résultats à l'état frais, obtenu juste après le gâchage pour caractériser ce type de béton. Qui permet d'étude les propriétés du béton hydraulique à l'état frais pour voir l'effet des additions et l'adjuvant sur les deux paramètres essentiels qui sont (le rapport E/L et la masse volumique).

V.4.1 Rapport E/L

Dans l'ensemble des histogrammes, nous avons réalisés plusieurs types des formules gâcher de différents pourcentage d'additifs avec un affaissement fixe de 7cm, adjuvanté par une valeur fixé de 1.5% et sans adjuvant, pour voir la variation en parallèle du rapport E/L sur le comportement des bétons hydraulique à l'état frais.

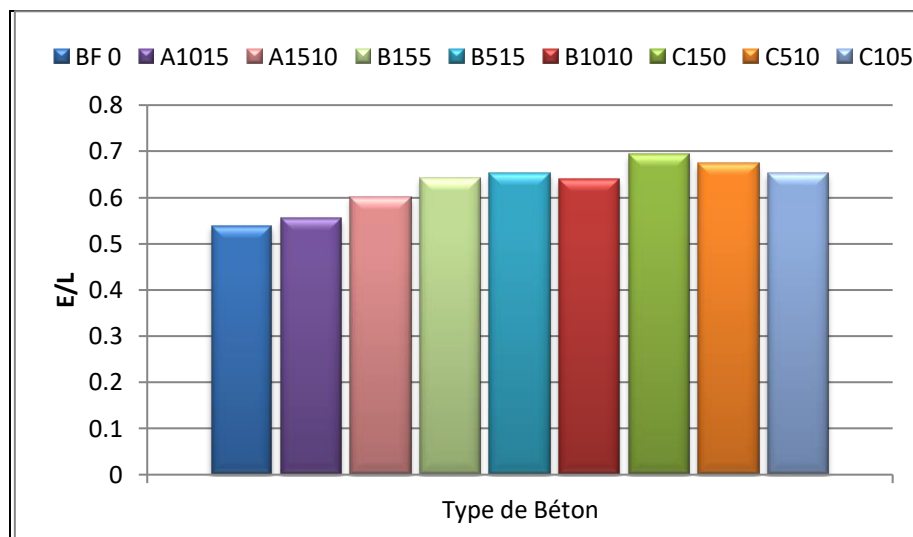


Figure V.1 : Variation de rapporte E/L en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 .

La (Fig. V.1) représente une variation d'E/L en fonction du pourcentage des additions minérales sans adjuvant pour chaque échantillon de béton. On a remarque que lorsqu'en ajout des différents pourcentages des additifs, le rapport E/L augment à certain niveau et aussi à certain pourcentage d'additifs qu'elle indique dans l'histogramme par 15% que cela à fait d'environ 0.7, avec une augmentation de 23% comme une valeur maximum par rapport le béton témoin (BF 0). Les autres bétons représentent une augmentation inférieure à la valeur précédente.

Cette discussion justifie le rôle essentiel de l'adjuvant dans le béton qui réduit la quantité de l'eau supplémentaire d'environ 30% selon la norme NF EN 934-2.

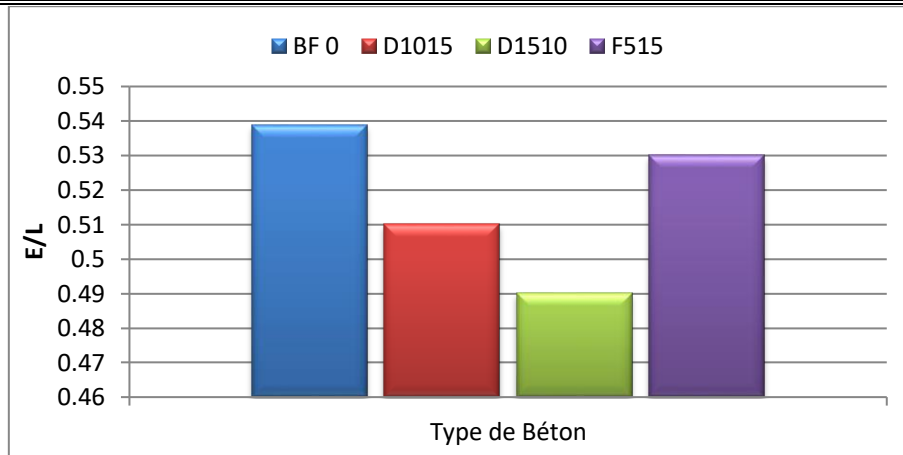


Figure V.2 : Variation de rapporte E/L en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF2 .

La (Fig. V.2) représente presque le même titre de la figure précédent juste on a ajout un certain pourcentage de « MEDAPLAST SP40 » par une valeur constant de 1.5%. En remarque que les résultats obtenus avec le superplastifiant « MEDAPLAST SP40 » sont meilleurs par rapport au béton témoin. Cette variation et due à la nature du superplastifiant, qui diminue la quantité d'eau jusqu'à 7.5% par rapport (BF0) donc c'est un réducteur d'eau, plus le type des additions qui sont mixtes entre actives et inertes.

La diminution du rapport E/L est due à l'effet de la dispersion du superplastifiant, qui sépare des grains de ciment les uns des autres et fluidifier le mélange sans la nécessité d'eau supplémentaire.

V.4.2 La masse volumique (frais)

Dans cette partie, on va voir l'effet de la variation des pourcentages des additions minérales sur le paramètre de la masse volumique à l'état frais, à partir des pesés des éprouvettes à l'état frais ont été effectués, plus l'ensemble des résultats obtenus sont présentés dans la (fig. V.3).

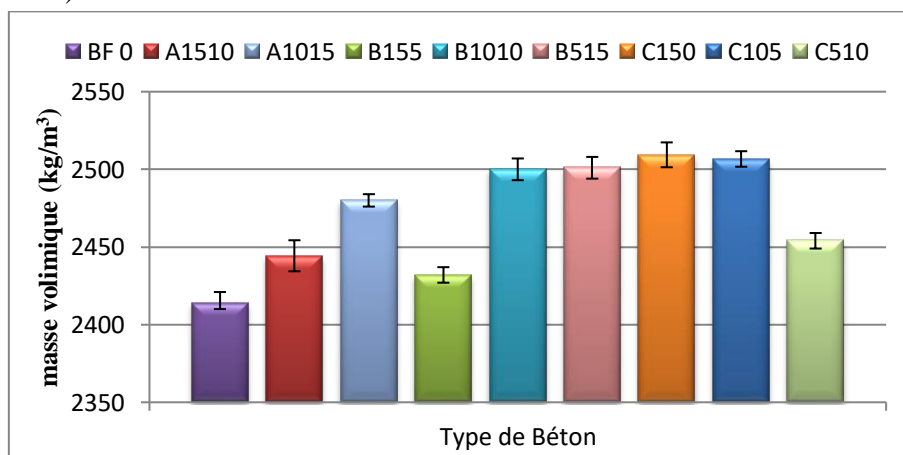


Figure V.3 : La variation de la masse volumique apparente à l'état frais en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 .

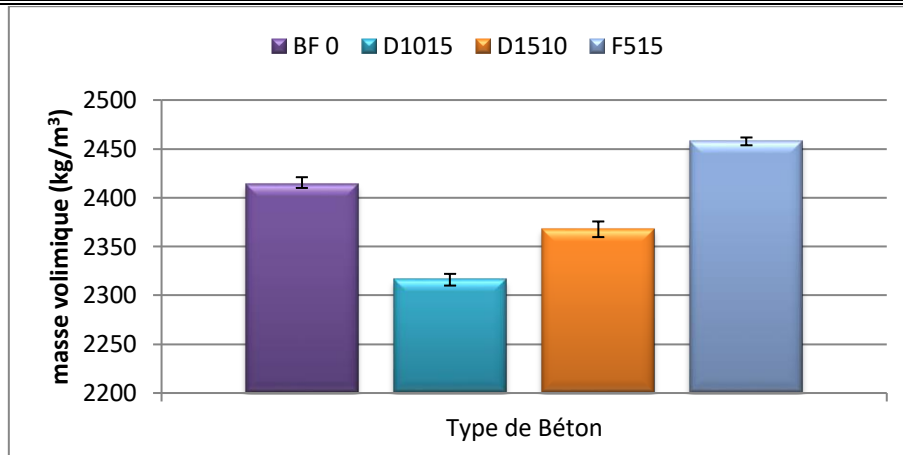


Figure V. 4: La variation de la masse volumique apparente à l'état frais en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF2 .

La (Fig. V.4) représente la variation de la masse volumique à l'état frais en fonction du pourcentage des additifs par une valeur fixé de l'adjuvant pour les différents types des bétons.

Lorsqu'on augmente le taux de la poudre de la fumée de silice et réduire le taux de la poudre de verre avec un dosage constant de la poudre de marbre la masse volumique augmente, même en présence de l'adjuvant par 1.5%, il n'a pas un avantage, la masse volumique augmente, mais par contre lorsqu'en a réduit la FS et augmenter la poudre de verre, la masse volumique sera réduite par rapport au béton témoin.

Cette augmentation et réduction due à l'effet du surface spécifique (SSB), de chaque additions minérales qui à été remarquée avant l'utilisation dans la formulation de béton. Aussi le rôle de l'adjuvant qui réduire la quantité de l'eau donc une chute de la masse volumique de chaque type de béton hydraulique.

V.5 État durci (Propriétés physiques)

V.5.1 La masse volumique apparente à l'état durci

Les résultats des tests obtenus sont indiqués dans les courbes suivantes des Figures (V.5 et V.6). Qui représentent la masse volumique à l'état durci en fonction de l'âge à 7, 14 et 28 jours de chaque type de béton.

D'après les résultats obtenus (Fig. V.5), on remarque une augmentation totale de la masse volumique dans le temps à l'état durci d'après la conservation des éprouvettes et aussi l'utilisation des additions minérales, sans adjuvant. Mais on a enregistré une diminution à 28j par une valeur maximale de 3% pour un béton additionné par rapport un béton témoin. Cette réduction traduit par l'effet granulaire des additifs qui sont absorbé l'eau et crée des vides par la suite à l'état durci plus l'absence total de l'adjuvant.

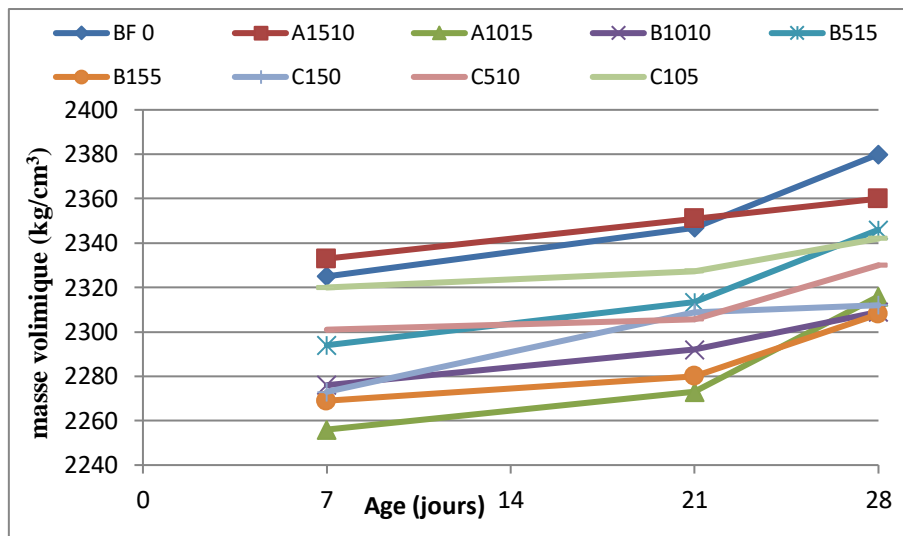


Figure V.5 : L'évolution de la masse volumique apparente en fonction du pourcentage additif pour l'ensemble de béton BF1 à 7, 21 et 28 jours.

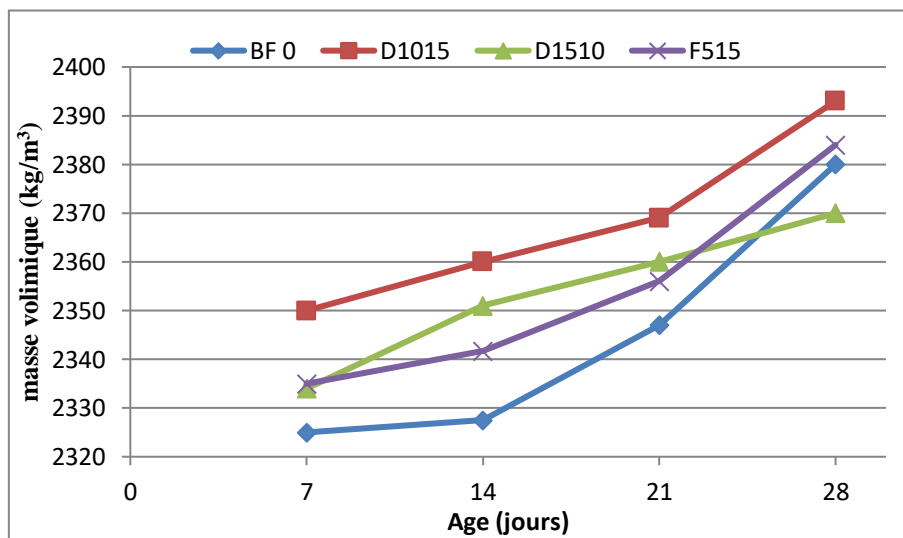


Figure V.6 : L'évolution de la masse volumique apparente en fonction du pourcentage additif pour l'ensemble de béton BF2 à 7, 21 et 21 jours.

Alors dans cette partie, on a posé la même remarque comme la figure précédente que la masse volumique augmente en fonction de temps à cause des propriétés physiques et chimiques de chaque type d'additions minéralogique et aussi l'effet essentiel de l'adjuvant par une valeur fixe de 1.5%.

D'après la (Fig. V.6) on peut dire que tous les bétons étudiés ont la même cinétique en ce qui concerne l'évolution de la masse volumique dans le temps. Par une augmentation légère d'environ 5% (pour D1015, D1510 et F515) par rapport au béton témoin. A cause de l'effet de l'adjuvant à certain dosage par rapport le ciment utilisé.

V.5.2 La vitesse d'ultrason (V)

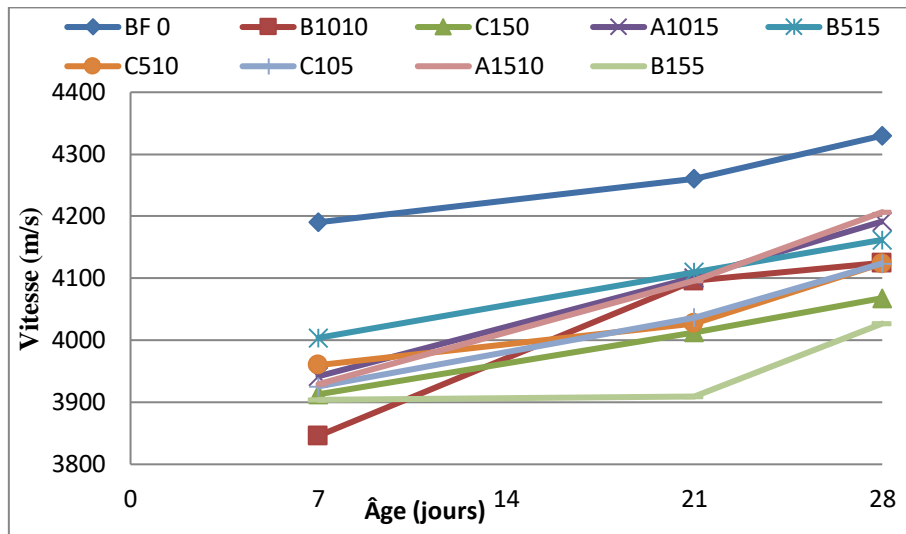


Figure V.7 :L'évolution de la vitesse ultrasonique en fonction du pourcentage additif pour l'ensemble de béton BF1 à 7, 14 et 28 jours.

Dans la (Fig. V.7), on a indiqué les valeurs obtenus de la vitesse de l'ultrason en fonction les pourcentages des additions minérales et l'adjuvant qui à été nul aussi, pour voir l'effet de l'introduction des différents types d'addition, sur le comportement mécanique de chaque type de béton. On a remarqué une diminution absolue de la vitesse de l'ultrason, dans 28j par 4% pour le matériau (C105) comme une valeur maximum par rapport le béton témoin et les autres matériaux reste entre eux.

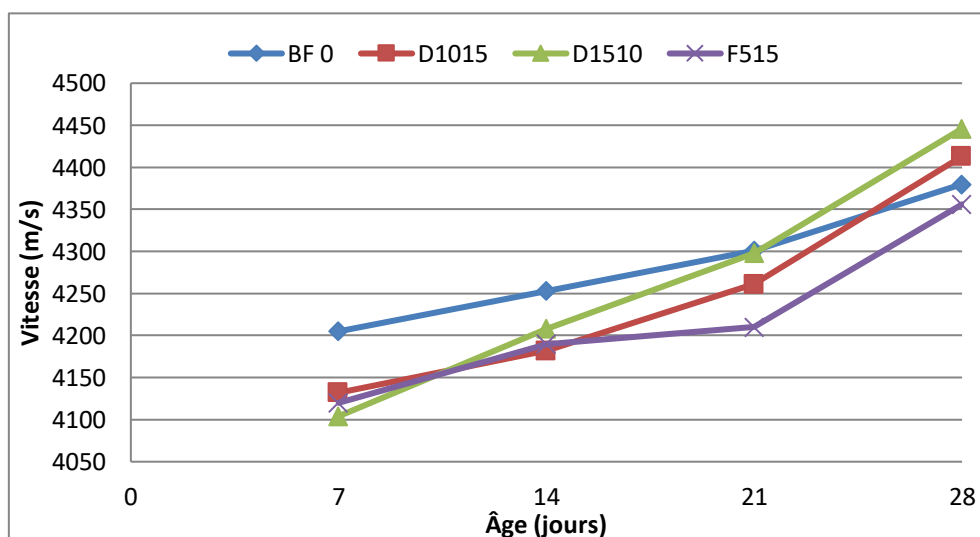


Figure V.8 :L'évolution de la vitesse ultrasonique en fonction du pourcentage pour l'ensemble de béton BF2 7, 14 et 21 jours.

La figure V.8 représente l'évolution de la vitesse de propagation des ondes ultrason des différents bétons étudié dans le temps. On remarque que tous les bétons ont une cinétique analogique en ce qui concerne l'évolution de la vitesse d'ultrason dans le temps, mais avec des valeurs différentes, ces valeurs 16 % dépendent essentiellement à la composition du béton, le type d'adjuvant et son pourcentage ; la vitesse d'ultrason nous donne des informations sur la compacité et l'homogénéité du béton et par conséquent une bonne indication sur le comportement mécanique de ces bétons.

Ces résultats sont en coordination avec ceux obtenue à partir des essais d'écrasement (figure V.8), d'où les bétons qui ont des vitesses élevées ont logiquement des résistances élevées. Les meilleurs résultats sont obtenus avec (D1015 et D1510).

V.5.3 L'indice sclérométrique (Is)

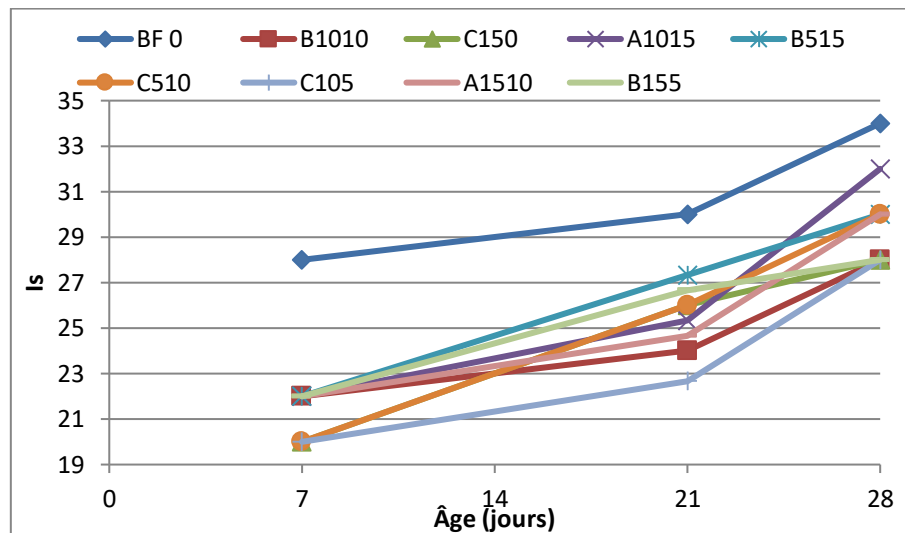


Figure V.9 : Évolution de l'indice sclérométrique en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 à 7, 21 et 28 jours.

À titre de comparaison par rapport aux essais destructifs, La (Fig. V.9) représente la courbe des valeurs de l'indice sclérométrique des différents bétons hydraulique additionné en fonction de l'âge (7j, 21j et 28j). Qu'inferieur à 35% et on a enregistré une valeur maximum à 28j jusqu' 34% pour un béton témoin et sans adjuvant, les autres reste inférieure à cette valeur d'environ 6%, 11%, 18% pour (A1015, B515 et B1010) respectivement, à cause d'un manque d'adjuvant et la nature, le choix des additions.

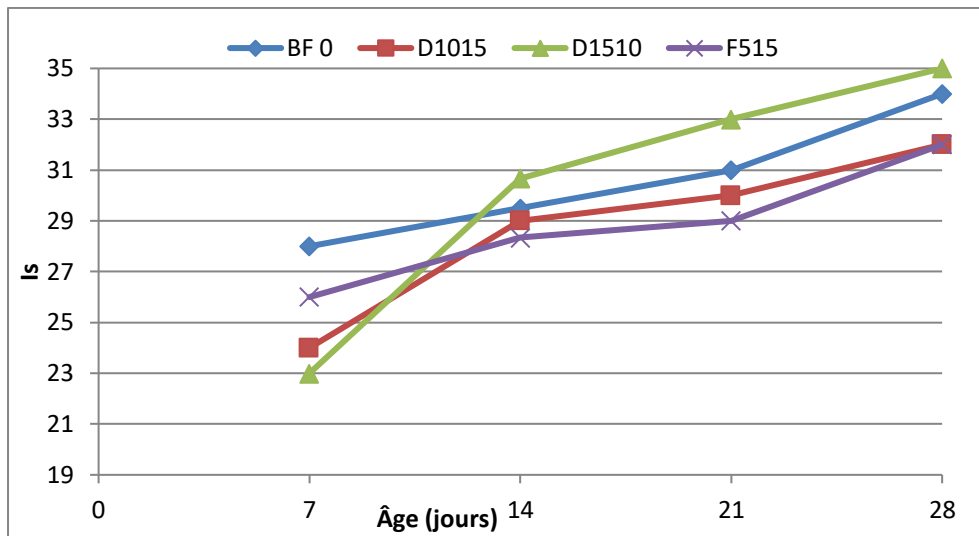


Figure V. 10: Évolution de l'indice sclérométrique en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF2 à 7, 14 et 21 jours.

Comme pour le cas de la vitesse d'ultrason, les mêmes constatations sont tirées de la figure V.10. L'indice sclérométrique évolue dans le temps avec le durcissement du béton, l'indice le plus grand c'est obtenu avec le béton les plus âgés. Les meilleurs résultats sont obtenus avec (D1510) par rapport BF0 d'environ 3% et les autres inférieurs au béton témoin tels que (D1015 et D515) par 8% respectivement.

V.5.4 Résistance à la compression (Rc)

La figure V.11 représente l'évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'additifs et sans adjuvant pour les différents types des bétons à 7, 14 et 28 jours.

En remarque que la résistance augmente dans le temps d'une façon analogue et uniforme pour tous les bétons. Cette augmentation est due au développement de l'hydratation du ciment dans le temps ce qui accélère le durcissement des bétons.

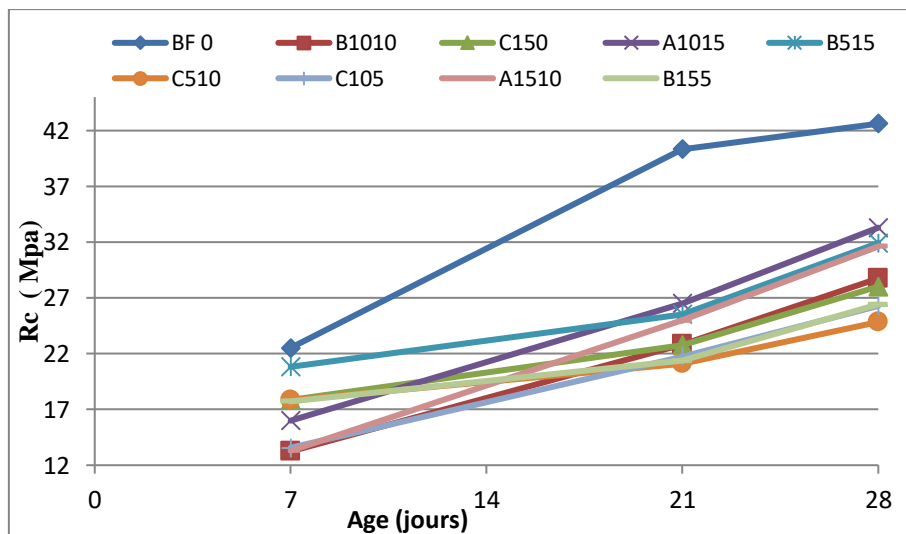


Figure V.11 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 à 7, 14 et 28 jours.

Cependant, le développement des résistances des bétons préparés avec les additions minérales à 28j représenté une chute brusque de la résistance mécanique à la compression à cause de l'absence de l'adjuvant « MEDAPLAST SP40 » qui est utilisé pour équilibrer la quantité de l'eau et hydrater les grains de chaque composant minéralogique. Cette diminution d'environ 42% comme une valeur maximum par rapport béton témoin sans additions et adjuvant aussi, les autres types de bétons représentent une valeur de diminution inférieure à 42% en fonction de pourcentage des additions tels que (fumée de silice, poudre de verre et poudre de marbre).

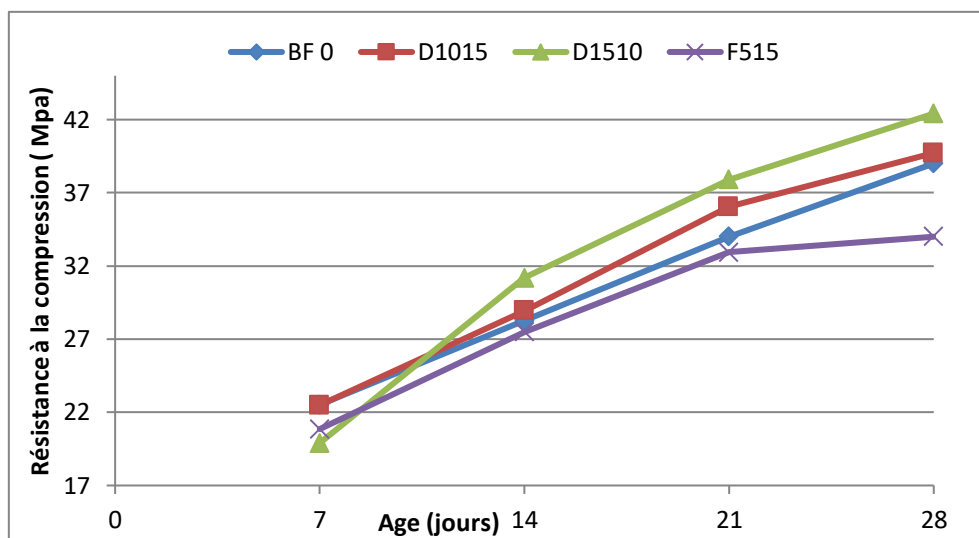


Figure V.12 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF2 à 7, 14 et 21 jours.

La figure V.12 montre la variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'adjuvant fixé et additions aussi pour les différents types des bétons à 28 jours.

Pour les bétons à base de (MEDAPLAST SP40) on peut remarquer que l'amélioration de la résistance à la compression est obtenue d'environ 6%, 2% pour (D1510, D1510) respectivement ; ceci peut être expliqué par la bonne compatibilité du liant avec ce superplastifiant, car il offre une bonne dispersion des gris de ciment ce qui assure une bonne hydratation et meilleur comportement mécanique.

V.5.5 Résistance à la flexion (Rf)

La figure V.13 montre la variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons à 7, 14 et 28 jours.

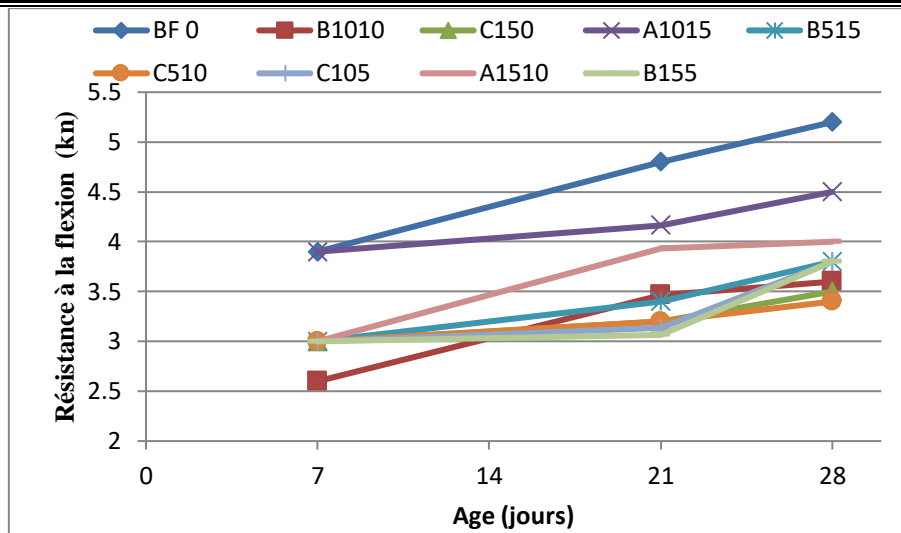


Tableau V. 13: La Résistance à la flexion à l'état durci en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 à 7, 14 et 28 jours.

On remarque que les bétons donnent de faibles résultats comparativement au béton témoin quel que soit le type, sauf pour le cas du béton A1015, on remarque une légère diminution de la résistance à la flexion comparativement aux autres bétons.

On peut expliquer ce phénomène par l'absence de l'adjuvant parce que les additifs absorbent beaucoup d'eau si le pourcentage des poudres augmente.

V.5.6 Porosité et absorption

Les paramètres essentiels de la durabilité dans le béton sont la porosité et l'absorption ces paramètres traduisent la capacité des substances agressives à endommager le béton, La figure suivante représente les différents résultats obtenus de la porosité et l'absorption des différents bétons.

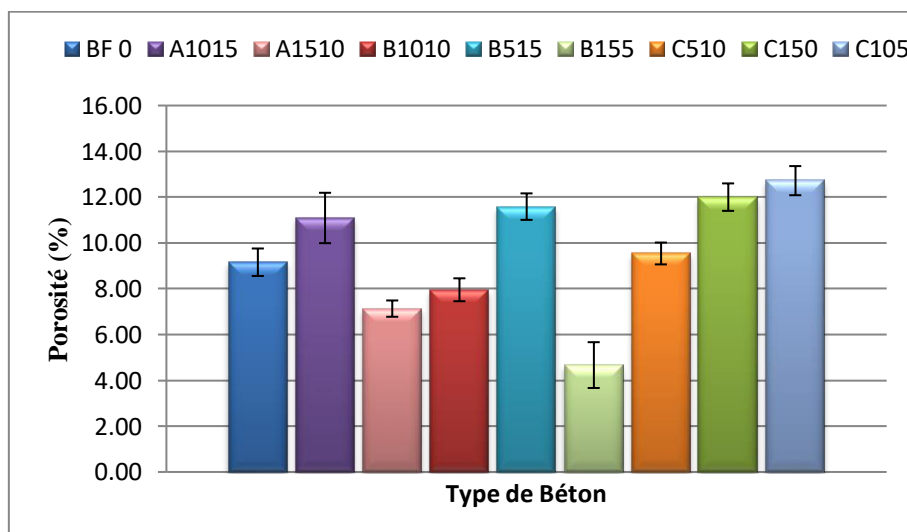


Figure V.14 : La variation de la l'absorption fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 .

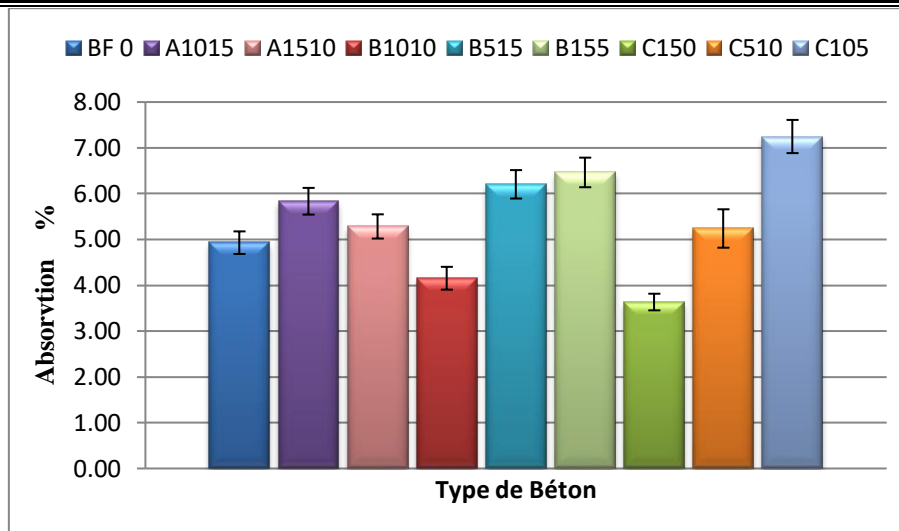


Figure V.15 : La variation de porosité en fonction du pourcentage additifs pour l'ensemble de béton BF1 .

D'après les figure précédentes (V.14) et (V.15) on remarque que les bétons contiennent des pourcentages plus élevés de poudre de marbre que le béton témoin cette absorption et porosité augmentent ,les meilleur résultats de la porosité sont de béton B155 et A1510 moins que le béton témoin par une diminution de 45% , et de l'absorption c'est le béton C150 qui obtient un bonne absorption moins qui le béton témoin par une diminution de 35%. On peut expliquer ce phénomène a cause de l'ajout de la poudre de marbre .

V.6 Étude de corrélation

V.6.1 Étude de corrélation entre (ρ) et (V)

V.6.1.1 Corrélation entre (ρ) et (v) pour BF1

A partir de la figure suivante, nous concluons à une corrélation entre les mesures de la masse volumique apparente (ρ) et les vitesses d'ultrason (V). Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (V.1) ayant un coefficient de corrélation R.

$$P = 0.252(V) + 1277 \quad (V.1)$$

$$R^2 = 0.902$$

Cette figure montre qu'il existe une bonne corrélation ($R = 0.902$) entre la masse volumique apparente et les vitesses d'ultrason correspondants à l'ensemble des bétons BF1.

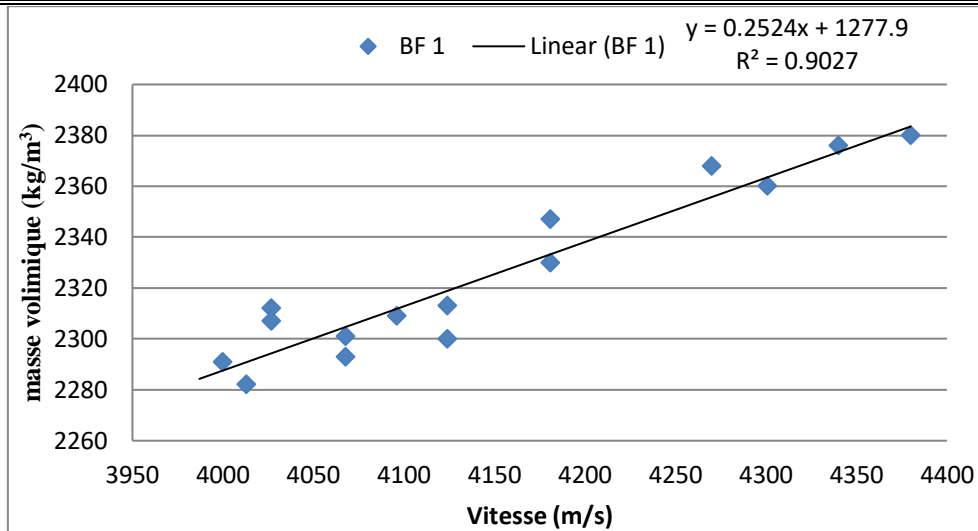


Figure V.16 : Corrélation entre (ρ) et (v) pour BF1 à 28 jours.

V.6.1.2 Corrélation entre (ρ) en fonction de (v) pour BF2

La figure (V.17) présente la corrélation établie entre les mesures de la masse volumique apparente (ρ) et les vitesses d'ultrason. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme linéaire présentée par l'équation (V.2) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 0.794$)

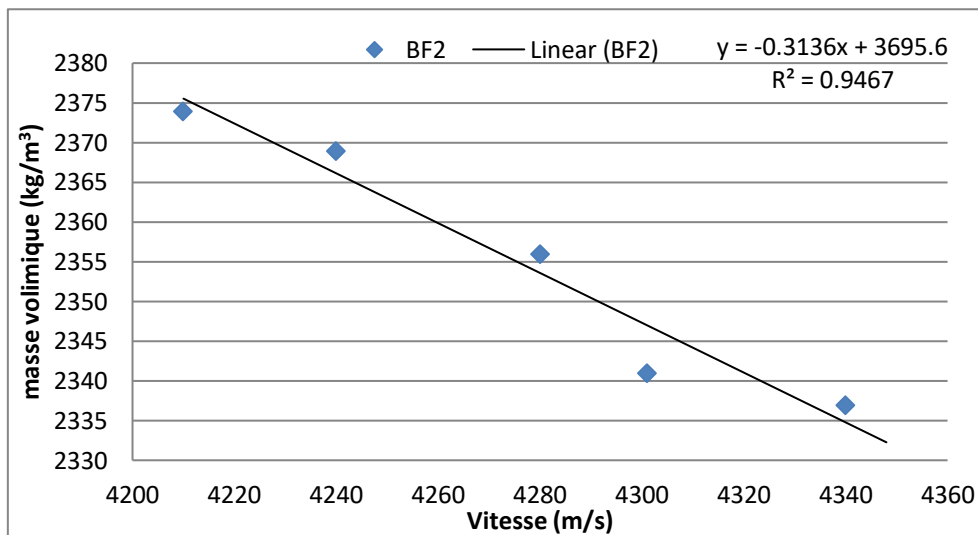


Figure V.17: Corrélation entre (ρ) et (v) pour BF2 à 28 jours.

$$p = 0.313(v) + 3695 \quad (V.2)$$

$$R^2 = 0.946$$

D'après cette figure, on peut conclure qu'il existe une très bonne corrélation ($R = 0.946$) entre les masses volumiques et la vitesse ultrason pour les bétons BF2.

V.6.1.3 Corrélation entre (ρ) en fonction de (v) pour BF3

A partir de cette figure (V. 18) , nous concluons à une corrélation entre les mesures de la masse volumique apparente (ρ) et les vitesses d'ultrason. Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (V.3) ayant un coefficient de corrélation.

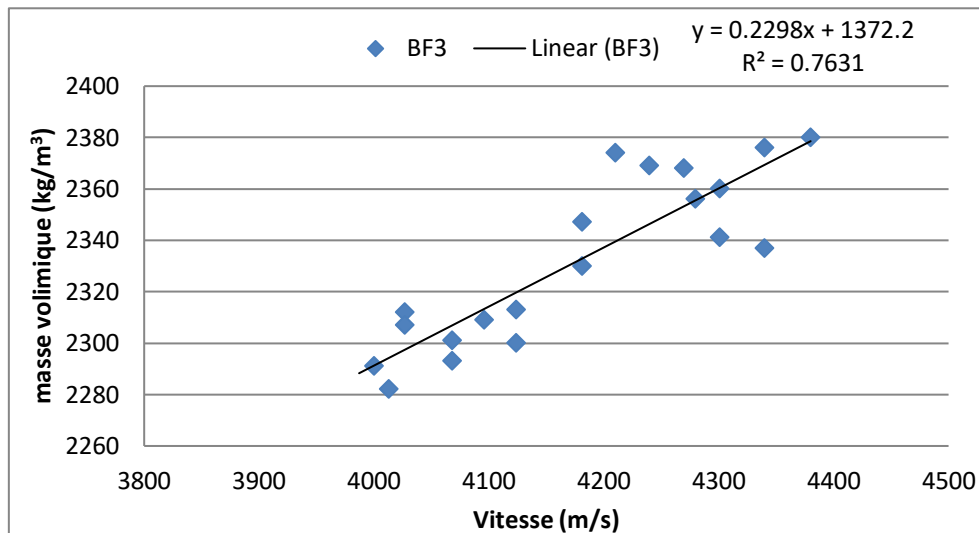


Figure V. 18: Corrélation entre (ρ) et (v) pour BF3 à 28 jours.

$$P = 0.229(V) + 1372 \quad (V.3)$$

$$R^2 = 0.763$$

Cette figure montre qu'il existe entre la masse volumique apparente et les vitesses d'ultrason une bonne corrélation ($R = 0.763$) correspondants à l'ensemble des bétons BF3.

V.6.2 Étude de corrélation entre (ρ) et (I_s)

V.6.2.1 la corrélation (ρ) en fonction de (I_s) pour BF1

A partir de cette figure (V.19) , nous concluons à une corrélation entre les mesures de la masse volumique apparente (ρ) et l'indice de rebondissement. Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (V.4) ayant un coefficient de corrélation.

Cette figure montre qu'il existe entre la masse volumique apparente et l'indice de rebondissement une bonne corrélation ($R = 0,894$) correspondant à l'ensemble des bétons BF1.

$$P = 11.82(I_s) + 1982 \quad (V.4)$$

$$R^2 = 0.894$$

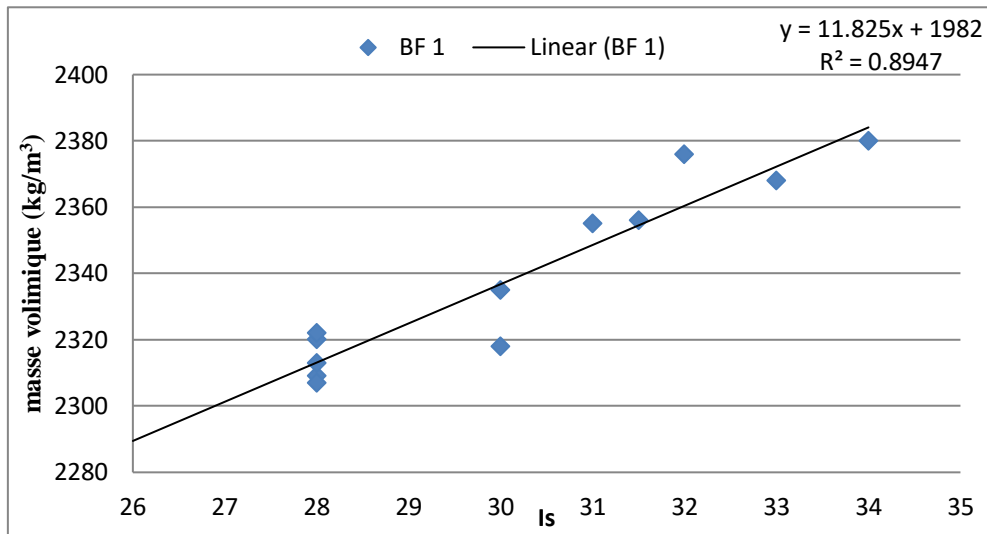


Figure V.19 : La corrélation (ρ) en fonction de (I_s) pour BF1 à 28 jours.

V.6.2.2 la corrélation (ρ) en fonction de (I_s) pour BF2

A partir de cette figure (V.20), nous concluons à une corrélation entre les mesures de la masse volumique apparente (ρ) et l'indice de rebondissement. Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (V.5) ayant un coefficient de corrélation.

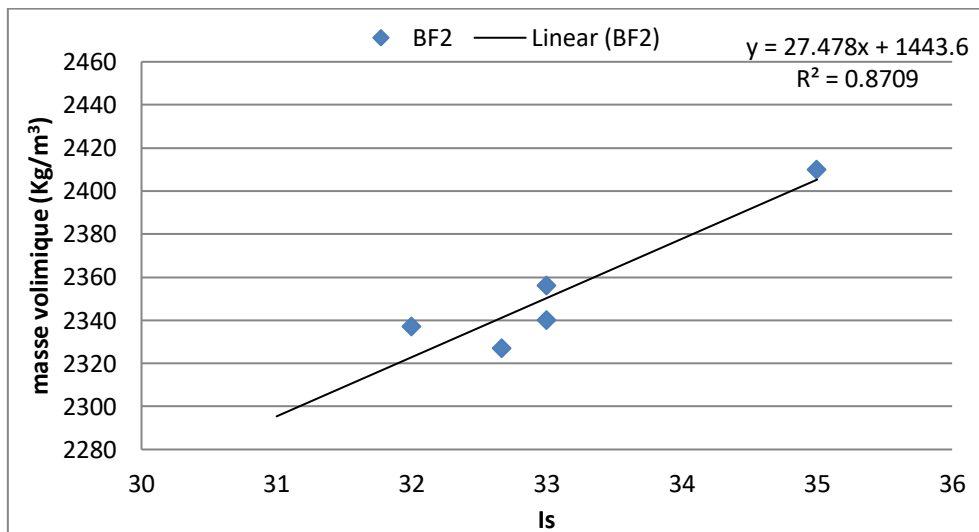


Figure V. 20: La corrélation (ρ) en fonction de (I_s) pour BF2 à 28 jours.

$$P = 27.47(I_s) + 1443 \quad (V.5)$$

$$R^2 = 0.870$$

Cette figure montre qu'il existe entre la masse volumique apparente et l'indice de rebondissement une bonne corrélation ($R = 0.870$) correspondant à l'ensemble des bétons BF2.

V.6.2.3 la corrélation (ρ) en fonction de (I_s) pour BF3

La figure (V.21) présente la corrélation établie entre les mesures de la masse volumique apparente (ρ) et les indices de rebondissement correspondants pour **BF3**. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme **linéaire** présentée par l'équation (V.6) avec un coefficient de corrélation.

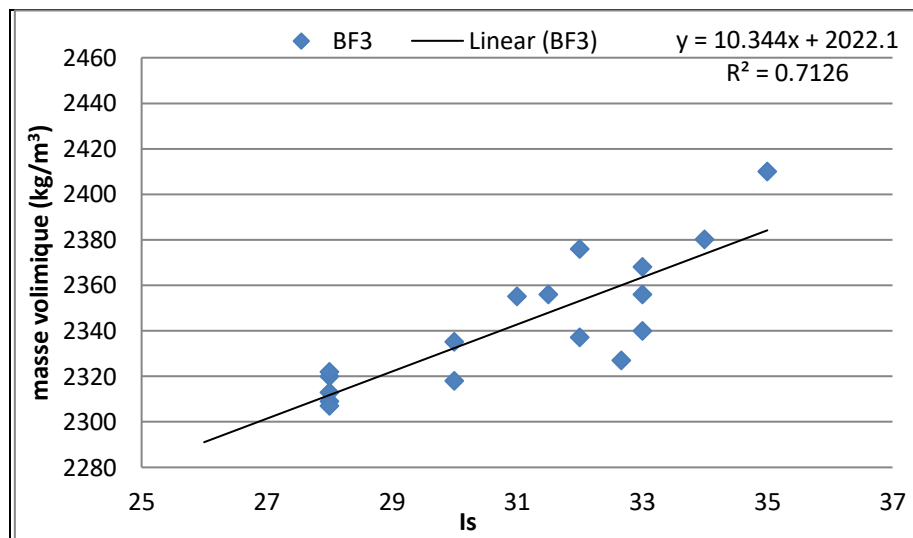


Figure V.21 : la corrélation (ρ) en fonction de (I_s) pour BF3 à 28 jours.

$$P = 10.34(I_s) + 2022 \quad (\text{V.6})$$

$$R^2 = 0.712$$

Cette figure montre qu'il existe entre la masse volumique apparente et l'indice de rebondissement une corrélation acceptable ($R=0.712$) correspondant à l'ensemble des bétons **BF3**.

V.6.3 Étude de corrélation entre (R_c) et (V)

V.6.3.1 la corrélation (R_c) en fonction de (V) pour BF1

A partir de cette figure, nous concluons à une corrélation entre les mesures de la vitesse ultrason et la Résistance à la compression. Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (V.22) ayant un coefficient de corrélation R .

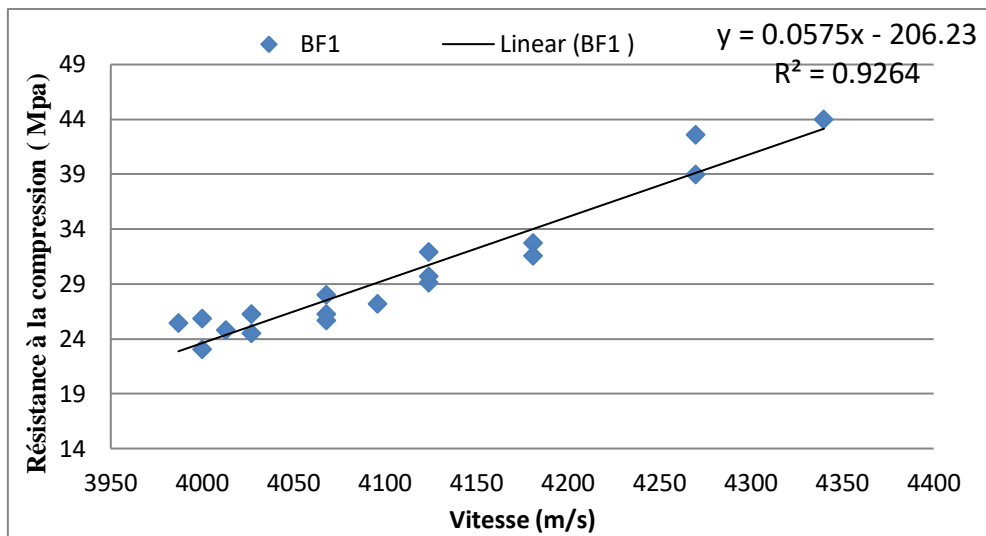


Figure V.22 : la corrélation (R_c) en fonction de (V) pour BF1 à 28 jours.

$$R_c = 0.057(V) - 206.2 \quad (V.7)$$

$$R^2 = 0.926$$

Aussi, de cette figure on conclue que si les mesures de la vitesse ultrason et la Résistance à la compression on obtient un très bonne coefficient de corrélation ($R= 0, 926$).

V.6.3.2 la corrélation (R_c) en fonction de (V) pour BF2

A partir de cette figure (V.23), nous concluons à une corrélation entre la vitesse ultrason et la Résistance à la compression. Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (V.8) ayant un coefficient de corrélation R .

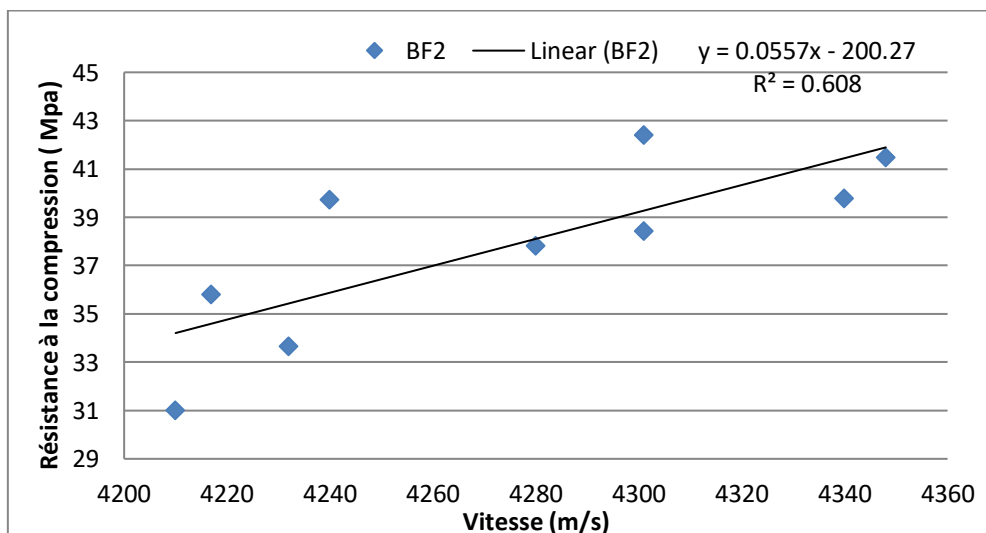


Figure V.23 : la corrélation (R_c) en fonction de (V) pour BF2 à 28 jours.

$$R_c = 0.055(V) - 200.2 \quad (V.8)$$

$$R^2 = 0.608$$

Une faible corrélation a été constaté entre la résistance à la compression et la vitesse ultrason ce qui justifier par le coefficient de corrélation ($R = 0.608$).

V.6.3.3 la corrélation (R_c) en fonction de (V) pour BF3

La figure (V.24), présente la courbe de corrélation établie entre les résistances à la compression par écrasement « R_c » et les vitesses d'ultrason « V » correspondants. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme linéaire présentée par l'équation (V.9) avec un coefficient de corrélation R .

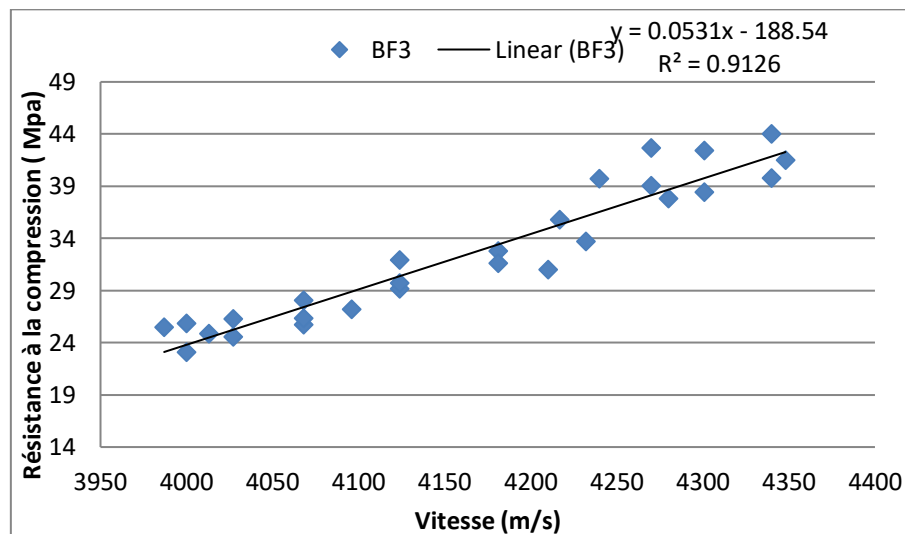


Figure V.24 : La corrélation (R_c) en fonction de (V) pour BF3 à 28 jours.

$$R_c = 0.053 (V) - 188.5 \quad (V.9)$$

$$R^2 = 0.912$$

Pour l'ensemble des bétons BF3 une très bonne corrélation ($R = 0.912$) a été constaté entre la vitesse ultrason et la Résistance à la compression ce qui justifier par le coefficient de corrélation.

V.6.4 Étude de corrélation entre (R_c) et (I_s)

V.6.4.1 la corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BF1

A partir de cette figure (V.25), nous concluons à une corrélation entre l'indice de rebondissement et la Résistance à la compression. Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (V.11) ayant un coefficient de corrélation R .

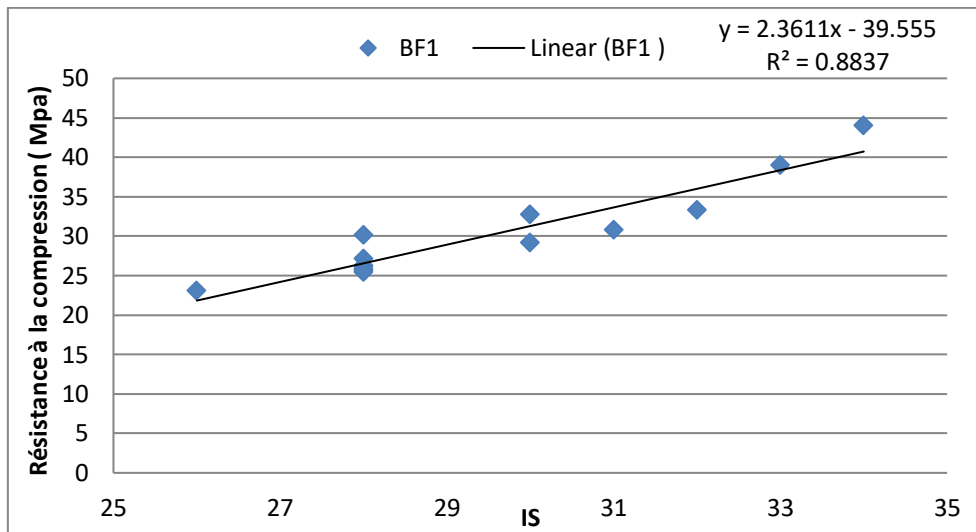


Figure V.25 la corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BF1 à 28 jours.

$$R_c = 2.361(I_s) - 39.55 \quad (V.11)$$

$$R^2 = 0.883$$

On remarque pour la corrélation obtenue à partir des bétons BF1, ou on constate une bonne corrélation de coefficient ($R = 0.883$).

V.6.4.2 la corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BF2

A partir de cette figure (V.26) , nous concluons à une corrélation entre l'indice de rebondissement et la Résistance à la compression. Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (V12) ayant un coefficient de corrélation R.

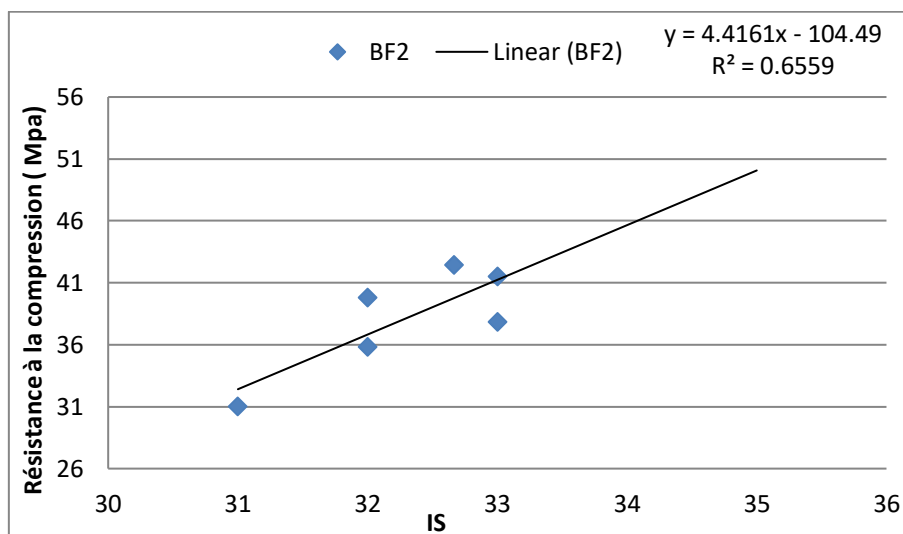


Figure V.26 : la corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BF2 à 28 jours.

$$Rc = 4.416 (Is) - 104.4 \quad (V12)$$

$$R^2 = 0.655$$

Cette figure montre qu'il existe une faible corrélation ($R = 0.655$) entre l'indice de rebondissement et la Résistance à la compression correspondants à l'ensemble des bétons.

V.6.4.3 la corrélation (Rc) en fonction de (Is) pour BF3

La figure V.27 présente la corrélation établie entre les mesures de la résistance à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants pour BF3. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme linéaire présentée par l'équation (V.13) avec un coefficient de corrélation R .

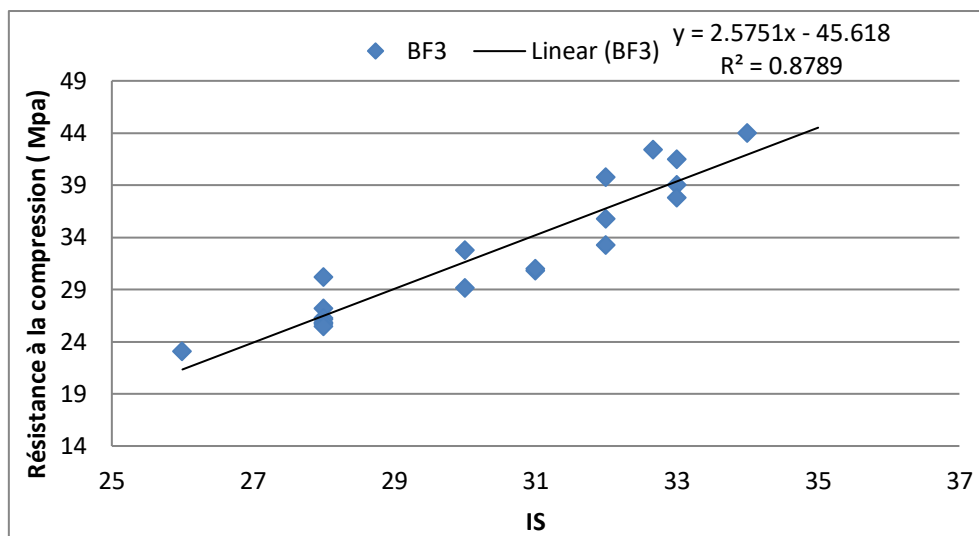


Figure V.27 : La corrélation (Rc) en fonction de (Is) pour BF3 à 28 jours.

$$Rc = 2.575(Is) - 45.61 \quad (V.13)$$

$$R^2 = 0.878$$

Pour l'ensemble des bétons BF3 une trée bonne corrélation ($R = 0.878$) a été constaté entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement correspondant ce qui justifier par le coefficient de corrélation.

V.6.5.1 la corrélation porosité (P) en fonction de (V) pour BF1

La figure (V.28) présente la corrélation établie entre les mesures de porosité (%) et la vitesse ultrason pour BF1. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme linéaire présentée par l'équation (V.14) avec un coefficient de corrélation R .

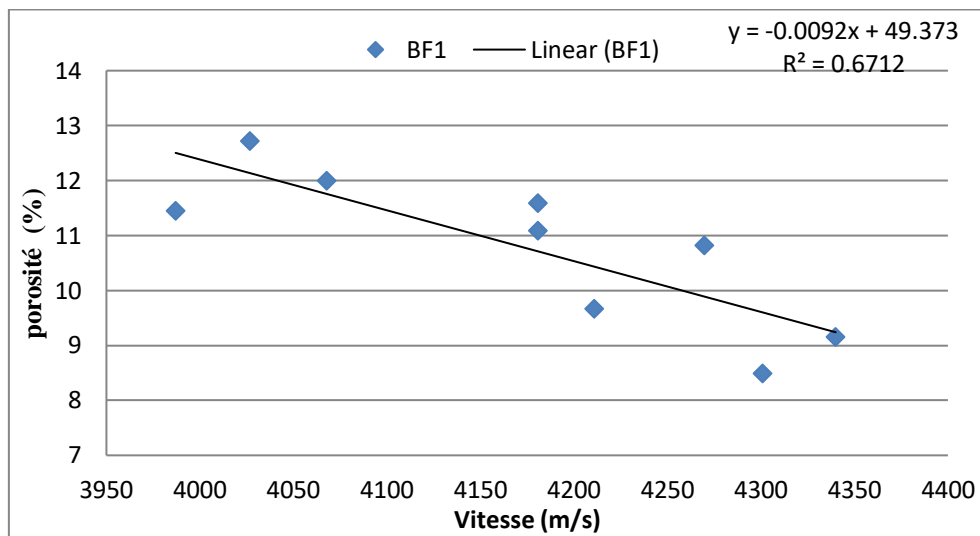


Figure V.28 : la corrélation porosité (P) en fonction de (V) BF1 à 28 jours.

$$P(\%) = -0.009(V) + 49.37 \quad (V.14)$$

$$R^2 = 0.671$$

On peut conclure qu'il existe une faible corrélation ($R = 0,671$) entre la porosité et la vitesse ultrason pour les bétons **BF1**,

V.7 les méthodes combinées

V.7.1 Corrélation (R_c) entre (V) et (Is) pour les bétons BF1

On procède à la combinaison des techniques de mesure pour minimiser ou bien éliminer les erreurs liées aux conditions de mesure dans le but de composer les insuffisances des méthodes non destructives (ultrason , scléromètre)

D'après cette figure V.29, on remarque une courbe de corrélation combinée établie entre la résistance à la compression (R_c) et les mesures d'indice de rebondissement (IS) correspondantes et vitesses ultrasoniques (V) pour BF1. On aboutit à l'expression analytique de cette corrélation, en utilisant la régression multiple de forme linéaire présentée par l'équation (V.15), la corrélation devient acceptable avec un coefficient de corrélation $R^2=0.76$.

$$RC = -118,8 + 0,03106 * V + 0,6878 * IS \quad (V.15)$$

$$R^2 = 0.76$$

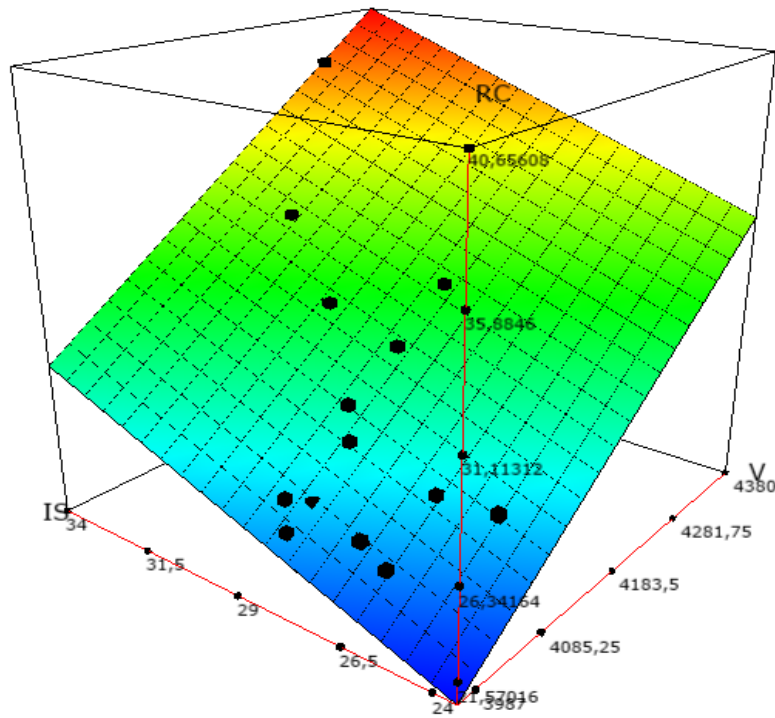


Figure V.29: Corrélation entre la résistance à la compression, la vitesse d’ultrason et l’indice sclérométrique pour BF1 à 28 jours.

V.7.2 Corrélation (Rc) entre (V) et (Is) pour les bétons BF2

On procède à la combinaison des techniques de mesure pour minimiser ou bien éliminer les erreurs liées aux conditions de mesure dans le but de composer les insuffisances des méthodes non destructives (ultrason , scléromètre)

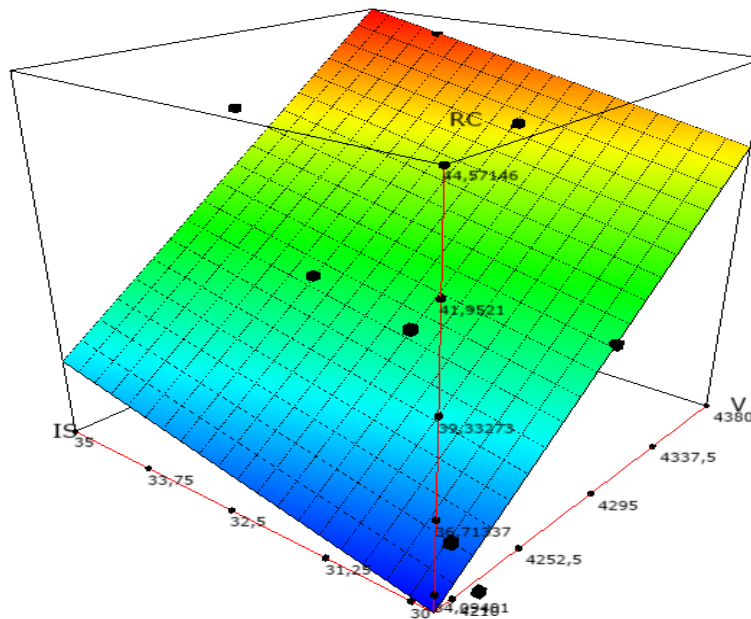


Figure V.30 : Corrélation entre la résistance à la compression, la vitesse d’ultrason et l’indice sclérométrique pour BF2 à 28 jours.

$$RC = -181,3 + 0,0478 * V + 0,4701 * IS \quad (V.16)$$

$$R^2 = 0.74$$

D'après cette figure (V.30), on remarque une courbe de corrélation combinée établie entre la résistance à la compression (Rc) et les mesures d'indice de rebondissement (IS) correspondantes et vitesses ultrasoniques (V) pour BF2. On aboutit à l'expression analytique de cette corrélation, en utilisant la régression multiple de forme linéaire présentée par l'équation (V.16), la corrélation devient acceptable corrélation avec un coefficient $R^2=0.74$.

V.7.3 Corrélation (Rc) entre (V) et (Is) pour BF3

La figure (V.31) consiste à définir la corrélation combinée effectuée entre les résistances à la compression par écrasement (Rc) et les mesures d'auscultations correspondantes indices de rebondissement (Is) et les vitesses ultrasoniques (V) pour BF3

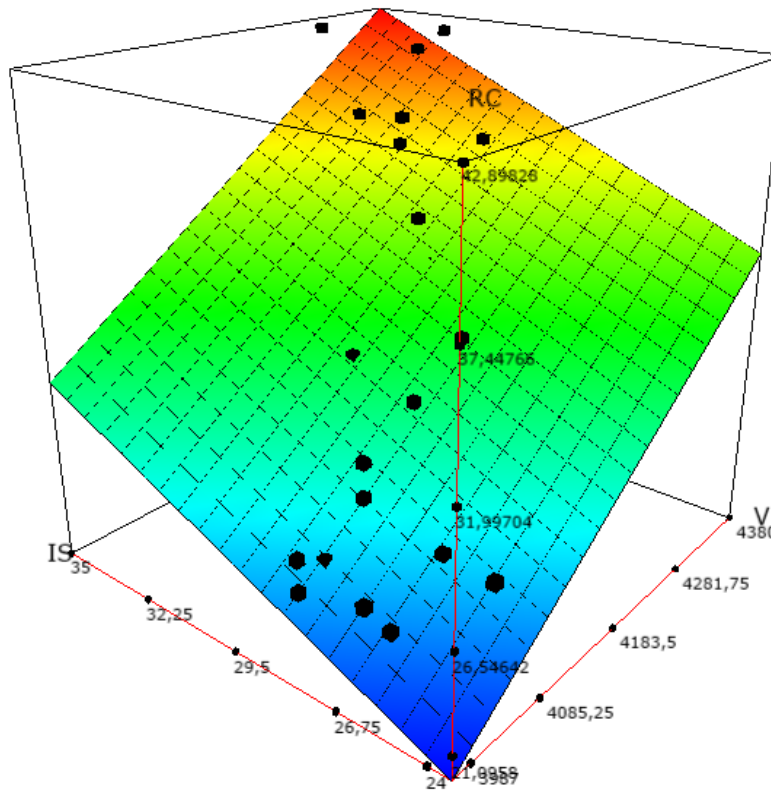


Figure V.31 : Corrélation entre la résistance à la compression, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique pour BF3 à 28 jours.

$$RC = -132,3 + 0,0338 * V + 0,7744 * IS \quad (V.17)$$

$$R^2 = 0.82$$

Nous avons extrait une expression analytique pour cette corrélation par la régression multiple de forme linéaire présentée par l'équation (V.17) avec un coefficient de corrélation $R = 0.932$. La corrélation susvisée est donc bonne.

Tableau V. 1: Formules de corrélation proposées pour l'estimation des propriétés physiques et mécaniques .

Caractéristiques	Méthode	BF1	BF2	BF3
Résistance mécanique (MPa)	Ultrason	$R_c = 0.057(V) - 206.2$ $R^2 = 0.926$	$R_c = 0.055(V) - 200.2$ $R^2 = 0.608$	$R_c = 0.053 (V) - 188.5$ $R^2 = 0.912$
	Scléromètre	$R_c = 2.361(Is) - 39.55$ $R^2 = 0.883$	$R_c = 4.416 (Is) - 104.4$ $R^2 = 0.655$	$R_c = 2.575(Is) - 45.61(V.13)$ $R^2 = 0.878$
	Combiné	$RC = -118,8 + 0,031*V$ $+ 0,68*IS$ $R^2=0.76$	$RC = -181,3 + 0,047*V$ $+ 0,47*IS$ $R^2=0.74$	$RC = -132,3 + 0,033*V$ $+ 0,77*IS$ $R^2=0.82$
La densité (Kg/m3)	Ultrason	$RC = -118,8 + 0,031*V$ $+ 0,68*IS$ $R^2=0.76$	$RC = -181,3 + 0,047*V$ $+ 0,47*IS$ $R^2=0.74$	$RC = -132,3 + 0,033*V$ $+ 0,77*IS$ $R^2=0.82$
	Scléromètre	$P = 11.82(Is) + 1982$ $R^2 = 0.894$	$P = 27.47(Is) + 1443$ $R^2 = 0.870$	$P = 10.34(Is) + 2022$ $R^2 = 0.712$
Porosité (%)	Ultrason	$P(\%) = -0.009(V) + 49.37$ $R^2 = 0.671$	-	

V.8 Conclusion

Par conséquent, on conclue dans ce chapitre que les bétons élaborés avec des additifs et des adjuvants de différents pourcentages développe des caractéristiques physiques et mécaniques encore plus élevées par rapport aux bétons préparés avec les additifs seulement

Cette amélioration des résistances est liée principalement à la réduction d'eau due à l'adjuvant, d'une part, la variation du pourcentage des additifs améliore le développement des caractéristiques à l'état frais ou bien durci du béton.

Ainsi, l'étude de corrélation effectuée permet de mettre en évidence les corrélations entre les propriétés mécaniques et physiques avec les résultats des essais non destructifs

Enfin, à partir des résultats des études effectuées, nous pouvons prouver que la corrélation entre la résistance à la compression et la mesure d'essai non destructif, pour les bétons confectionnés est correctement établie, illustrée précédemment dans les courbes, on obtient une évaluation fiable de la résistance.

Conclusion générale

L'objectif de notre travail concerne l'utilisation de la poudre de verre, poudre de marbre et fumée de silice finement broyée comme ajout cimentaire dans le but de formuler un béton ordinaire. L'étude s'est articulée autour des trois principaux axes suivants:

- La combinaison contenant de la (PM, FS, PV), sur les caractéristiques physico-mécaniques des bétons ordinaires
- L'étude corrélatrice afin de caractériser le béton physiquement et mécaniquement au moyen des essais non destructifs.
- Établir des corrélations entre les différentes propriétés des bétons

Les résultats obtenus dans cette étude nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

En maintenant un rapport C/E égale à 1,78 avec un affaissement constant de 7 cm, la méthode de Dreux-Gorisse conjuguée à celle de coulis nous ont conduit à des compositions de béton satisfaisantes, suite à l'optimisation des facteurs de formulation .

L'ajout de la poudre de verre et la poudre de marbre a donné des résultats acceptables par rapport à la composition témoin, essentiellement la composition de béton **D1510** amélioré la maniabilité et la résistance mécanique;

La masse volumiques des bétons adjuvantés est supérieure a celle des bétons sans adjuvant et par rapport au béton témoin .

L'utilisation des superplastifiants dans la fabrication des bétons améliore beaucoup les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du béton ; cette amélioration dépend du dosage et de la nature de superplastifiant utilisé .

les bétons contenant un pourcentage plus élève de poudre de marbre que le béton témoin son absorption et sa porosité augmentent ,les meilleurs résultats de porosité sont des formulations **B155** et **A1510** moins que le béton témoin par une diminution de 45% .

Nous avons constaté , d'après les résultats obtenus de cette étude , que l'amélioration de la résistance à la compression est obtenue d'environ 6%, 2% pour (**D1510**, **D1510**) respectivement par rapport au béton témoin; ceci peut être expliqué par la bonne compatibilité du liant avec ce superplastifiant et des additifs ,

Les corrélations constatées dans cette étude sont très satisfaisantes et très encourageants , il est possible de développer de bonnes corrélations entre la résistance à la compression par écrasement et les mesures non destructives correspondantes (indice de rebondissement et vitesse ultrasonique) pour l'ensemble des bétons examinés.

L'estimation de la résistance à partir des modèles établis par la méthode combinée donne une meilleure précision.

Perspectives

Afin de compléter cette étude et de cerner de près les lois qui régissent le comportement des bétons avec poudre de verre, nous recommandons pour les futurs travaux, d'aborder les points suivants :

- Etudier la durabilité des bétons à base de poudre de verre ,poudre de marbre et fumée de silice en milieu agressif ;
- Etudier le comportement des bétons à base de poudre de verre au feu .
- L'utilisation d'un adjuvant superplastifiant par des différent poucentage .
- Utilisé le verre comme un sable .

En perspectives, nous envisageons les améliorations de la qualité de béton par des matériaux locaux comme la poudre de marbre et poudre de verre qui lui donne de meilleures caractéristiques a certain dosage .

Références bibliographiques

- [1] **Boudchicha Abdelaziz.** « utilisation des additions minérales et adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologique et mécaniques des bétons », mémoire de master, université Mentouri Constantine, 2007
- [2] Effets des additions minérales et adjuvants fluidifiants sur le comportement rhéologique des mortiers et bétons frais et durcis à base de sables des carrières
- [3] **BELOUADAH MESSAOUDA** « Etude de l'influence de la nature des fillers sur les propriétés des bétons à base des matériaux locaux à l'état frais et à l'état durci et soumis aux hautes températures », Thèse de doctorat de l'Université M'sila, Algérie 2018.
- [4] **G. Chanvillard** Connaissances générale sur le matériau béton, Ed. Aléas, 1999.
- [5] **R. Dupain, R. Lanchon et J.C. Saint-AR romain** Granulats, sols, ciments et bétons, Editions Castilla, 2ème édition, 236 p., (2000).
- [6] **V. Baroghel-Bouny** caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, méthode, analyse, interprétation. LCPC, 1994.
- [7] **A. M. Neville** " Propriétés des bétons ", traduit par le Crib, Edition Eyrolles, 806p,(2000).
- [8] **A .Remadnia** Etude de l'influence de la qualité des granulats sur les propriétés des mélanges de béton dans les conditions des entreprises de préfabrication, Thèse de magister, Annaba, (1986).
- [9] **ZITOUNI Salim.** « Effet de la granulométrie (grosseur et fraction granulaire) des granulats concassés sur les caractéristiques du béton », Thèse de doctorat de l'Université M'sila, Algérie, 2016
- [10] **G. Dreux** " Nouveau guide du béton ", Eyroles, paris, (1979).
- [11] **K. Manai** Étude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons auto nivelant, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Sherbrooke, Canada, 1995.
- [12] **R. Chaid** Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts

- cimentaires locaux Thèse de doctorat d'état en génie civil ENP décembre 2006
- [13] **R. Chaid, R. Jauberthie et A. Boukhaled** Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons Lebanese Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2010
- [14] **N. Tebbal, Z. Rahmouni., M. Belouadah** Valorisation du filler de marbre dans la formulation d'un béton à haute performance. Colloque Nom Ad-19 et 20 novembre 2012. Toulouse.
- [15] **Rachida IDIR** Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali -silice et la réaction pouzzolanique, doctorat de l'université de Toulouse, 2009, 304 Page.
- [16] **P.C. Aitcin** Les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fonte thomas et leur utilisation dans les mortiers en béton. Revue des matériaux de construction. Mai 1968.
- [17] **P. Lawrence** Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux x cimentaires, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III, 2000.
- [18] **H. Scholze** Le verre, nature, structure et propriétés ; institut du verre, Paris 1980.
- [19] **Amouri Chahinez** Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité), mémoire doctorat en science, 2009
- [20] **Defossé. C,** Chimie du ciment valorisation des déchets en cimenterie Laboratoire de chimie industrielle, FDSA, Université Libre de Bruxelles, 2004.
- [21] **Mezghiche Bouzidi** « essais non-destructifs du béton », cours de 3ème année licence, université Mohamed **Khaidar, Biskra**, 2013
- [22] « Mesure de dureté de surface par rebondissement à l'aide d'un scléromètre », P18, 99
- [23] **Benamrane Toufik Amine** « caractérisation aux moyens des essais non destructifs (NDT) et essai direct (ED) d'un béton recyclé adjuvanté à base des matériaux locaux », mémoire master, Juin 2015.

- [24] **BOUDINA.R et LOURADIA** « Proposition d'un modèle de corrélation entre les essais non destructifs et les essais d'écrasement d'un béton fabriqué dans les conditions locales.» Mémoire Master, Centre Universitaire de B. B. Arreridj. Algérie, 2012
- [25] **BELGUENDOUBE** «Etude au moyen des essais non destructifs pour la caractérisation physique et mécanique d'un béton » Mémoire de Master, Centre Universitaire de B. B. Arreridj .Algérie, 2013
- [26] **Berra Manel** «Caractérisation au moyens des essais destructifs et NDT d'un BAP à base des granulats recyclés et fumée de silice » Mémoire Master, l'Université M'sila. Algérie, 2018
- [27] **Yagoubi Messaoud Essaghir** «Étude de caractérisation et corrélation aux moyens des essais non-destructifs (NDT) et essai direct d'un béton à haute performance (BHP) à base de matériaux locaux » Mémoire Master, l'Université M'sila. Algérie, 2016
- [28] **Gilles Chanvillard**. Concepts avancés de formulation des bétons basés sur la science des matériaux, Article de doctorat.

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442



FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT MT. v03

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

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO²) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al²O³) et le fer (Fe²O³). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de micro-cristaux de silicates de calcium hydratés.

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

Domaine d'utilisation :

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

Les principales applications de ce ciment sont :

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

Algerian Cement Company (SPA)

Hamam Dalaa, M'sila (ACC)
Tel: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98



MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442



FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT MT. v03

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%):	0,3 – 0,75

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C ₃ S (%):	58 - 64
Silicates bicalciques C ₂ S (%):	12 - 18
Aluminates tricalciques C ₃ A (%):	6,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C ₄ AF (%):	10,00 – 12,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

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

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5

Algerian Cement Company (SPA)

Hammam Dalaa, M'sila (ACC)
Tel: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98

LAFARGE
لافارج

MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2 Tab 1, 3.1
et 3.2 NA 774

Super plastifiant - haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST SP 40** est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons extrudés
- Bétons BCR

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST SP 40** permet :

Sur béton frais :

- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Marron
- pH 8,2
- Densité 1,20 ± 0,01
- Teneur en chlore < 1g/L
- Extrait sec 40%

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone Industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

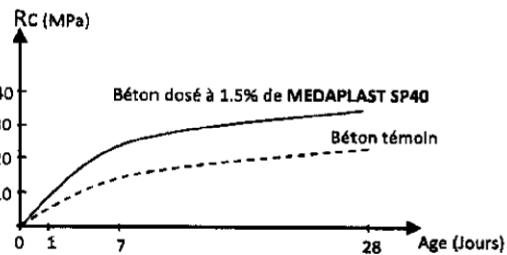
Tél: (213) 021 51 66 81 & 82

Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



93



Evolution des résistances en compression

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST SP 40** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L pour 100 kg de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg, fûts de 270 kg et cubitenaire de 1200 kg.

Délai de conservation :

Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en Janvier 2007.

GRANIPAN RFS

Conforme à la norme NF P 18-840.
Produit de réparation de surface, classe 2.

Mortier de réparation et de ragréage de béton en milieu agressif

DESCRIPTION

Le **GRANIPAN RFS** est un mortier pré dosé en 2 composants destiné à la réparation des bétons.

Le **GRANIPAN RFS** est composé de :

Elément A : Résine en émulsion

Elément B :

- Liant hydraulique
- Charges sélectionnées
- Fumée de silice
- Adjuvants

DOMAINES D'APPLICATION

- Réparation structurale des bétons exposés à des milieux agressifs.
- Reprofilage, réfection d'angles de poutres, nez de marches...
- Réparation de sols industriels
- Réparation d'ouvrages hydrauliques
- Ragréage de façades

PROPRIÉTÉS

- Bonne ouvrabilité
- Bonne adhérence sur béton, mortier, briques...
- Sans retrait
- Bonne imperméabilité

CARACTÉRISTIQUES

- Granulométrie : 0-3 mm
- Rapport pondéral (A / B) 1/6
- Densité du mortier frais 2,2
- Adhérence sur béton (NFP18-858) >2 MPa
- Rc₃ (NA 427) > 20 MPa
- Rf₃ (NA 431) > 2,5 MPa

MODE D'EMPLOI

Préparation du support (NF P74-203/ DTU 59-3) :
Le support doit être sain et propre. Il doit être débarrassé des parties non adhérentes ou friables. Les traces d'huile, de graisse, de laitance, etc., doivent être éliminées.

Les armatures doivent être dégagées de toute trace de rouille par sablage ou brossage puis recouverts par un inhibiteur de corrosion (**GRANIPROT ARMATURES**). Humidifier de nouveau le support juste avant l'application du **GRANIPAN RFS**.

Préparation du mélange :

Verser l'élément **A** (résine en émulsion) dans un récipient propre ouvert. Ajouter progressivement l'élément **B** tout en malaxant (agitateur mécanique à faible vitesse de rotation), jusqu'à obtenir un mortier de consistance et de couleur homogène.

Application :

Le mortier obtenu s'applique à la truelle, à la spatule ou à la taloche. L'épaisseur de la couche en une main de **GRANIPAN RFS** ne doit pas dépasser 5 cm. Pour les épaisseurs supérieures à 5 cm, il faut procéder par couches successives appliquées à 24 heures d'intervalle.

Cure :

Après mise en place, protéger le mortier contre une dessiccation rapide (arrosage, toile de jute humidifiée, produit de cure tel que le **MEDACURE**)

CONSOMMATION

A titre indicatif, la consommation moyenne sera d'environ 22 kg/ m² et par cm d'épaisseur.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

GRANIPAN RFS

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **GRANIPAN RFS** est livré en kits de 35 kg :

Élément A : bidon de 5 kg

Élément B : sac de 30 kg.

Stocker à l'abri de l'humidité.

Durée de conservation :

06 mois dans son emballage d'origine fermé.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex.dz

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com

