



**Ministère de l'enseignement supérieur
Et de la recherche scientifique**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

**Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER**

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

**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**

Dirigé par :

Dr. BELAGRAA Larbi

Présenté par :

Yagoubi Messaoud Essaghir

Promotion : 2015/2016.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements



Avant tout, je remercie ﷻ le tout puissant,

Pour m'avoir assisté et armé de patience afin d'accomplir ce modeste travail.

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département génie civil

*De M'sila sous la direction de du **Mr BAALI**. Qu'il me soit permis de lui exprimer mes meilleurs sentiments de gratitude pour le soutien constant qu'il m'a apporté tout au long de mon travail et pour tous les principes qu'il n'a cessé de me transmettre, la rigueur scientifique, L'objectivité et sa confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ces années*

Ainsi que ses conseils précieux,

*Je remercie infiniment mon encadreur pour son attention, ces conseils et ça précieuse aide. **Dr. BELAGRAA Larbi***

*Je tiens à remercier **Mr. BELGUENDOUBE ANTAR** et **ABD ELATIF** pour leurs conseils et leurs orientations, pour leur intérêt, leur disponibilité et leur bienveillance.*

Mes sincères remerciements vont également aux membres de jury qui m'ont fait honneur de participer à l'examen de ce travail.

Je remercie mes enseignants de département sciences de technologie de M'sila pour leurs efforts voués à nous transmettre le savoir, en particulier ceux du département Génie civil et Matériaux,

Je tiens à exprimer ma très grande gratitude, et ma profonde affection à mes chers parents pour leurs encouragements, leur patience et leur grand soutien,

Durant toutes ces années d'études. Sans oublier mes frères

Et mes sœurs pour leurs encouragements, et leurs aides.

Je remercie également tous mes amis et camarades,

Pour leurs encouragements

Et leur précieux soutien.



Dédicaces



*A mon cher père, **Salah***

*A ma chère mère, **Habiba***

A mes grands-parents

A mes frères Islam , Mohamed

Et mes sœurs Meriem , Zineb , Israa

Et le mari de ma soeur Hamza,

Et Leurs enfants Nada, Maria

Ma femme future naouel

A mes amis, Hamad, Islam, Abdou, Abd malik, Mohamed, Abd razak,

Samire, Bilal, Oqba, djalol, Ghania , Rokia , Sara , Amel, Zina .



Table des matières

<u>Table des matieres</u>	I
<u>Liste des figures</u>	V
<u>Liste des tableaux</u>	VIII
<u>Notations</u>	XI
Introduction generale	1

CHAPITRE I

Béton à haute performance

I.1 Introduction	4
I.2 Généralités	4
I.3 Les constituants	5
I.3.1 Le ciment.....	5
I.3.2 Les granulats.....	6
I.3.2.1 Forme et état de surface.....	6
I.3.2.2 Porosité.....	6
I.3.2.3 Nature minéralogique.....	6
I.3.3 Granularité.....	7
I.4 Les superplastifiants	7
I.4.1 Intérêt de leur utilisation.....	7
I.4.2 Mécanisme de dispersion.....	7
I.5 Conséquences sur l'hydratation du ciment	9
I.6 Spécifications sur les constituants	9
I.7 Caractéristiques des BHP	10
I.7.1 Caractéristiques physiques.....	10
I.7.1.1 Ouvrabilité.....	10
I.7.1.2 Porosité.....	11
I.7.1.3 Perméabilité.....	12
I.7.2 Caractéristiques mécaniques.....	13
I.7.2.1 Résistance en compression.....	13
I.7.2.2 Résistance en traction.....	14
I.7.3 Caractéristiques élastiques.....	15
I.7.3.1 Module de d'élasticité ou module de young (e).....	15
I.8 Facteur influençant sur le comportement mécanique du BHP	16
I.8.1 Influence du rapport E/C.....	16
I.9 Domaine d'utilisation de BHP	17
I.10 Avantages des BHP	17
I.11 Conclusion	18

CHAPITRE II

Les ajouts cimentaires et les adjuvants

II.1 Introduction.....	20
II.2 Les ajouts cimentaires	20
II.2.1 Rôle granulaire des ajouts cimentaires.....	20
II.2.2 Rôle mécanique des ajouts cimentaires.....	20
II.3 La fumée de silice	21
II.3.1 Principe de fabrication	23
II.3.2 les différents aspects d'une fumée de silice	24
II.3.3 Les avantages de la fumée de silice	25
II.3.3.1 Bétons à l'état frais [50].....	25
II.3.3.2 Bétons à l'état durci [50]	25
II.4 Le laitier	25
II.4.1 Différents types de laitiers	26
II.4.1.1 Le laitier vitrifié	26
II.4.1.2 Le laitier cristallisé	26
II.5 La pouzzolane.....	26
II.5.1 Différents types de pouzzolanes.....	26
II.5.1.1 Les pouzzolanes naturelles	26
II.5.1.2 Les pouzzolanes artificielles	26
II.6 Le calcaire.....	27
II.6.1 Différents types de calcaires	27
II.7 Les adjuvants.....	27
II.7.1 Définition	27
II.7.2 Classification des adjuvants selon leurs efficacités.....	28
II.7.2.1 Les adjuvants ouvrabilité	28
II.7.2.2 Les adjuvants entraîneurs d'air	30
II.7.2.3 Les adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement	31
II.7.2.4 Les adjuvants retardateurs de prise	32
II.8 Conclusion	33

CHAPITRE III

Essais non destructifs

III.1 Introduction	35
III.2 Essais non destructifs du béton	35
III.2.1 Définition.....	35
III.2.2 Domaines d'application [92]	35
III.2.3 But d'utilisation	36
III.3 Méthodes d'essais	36
III.3.1 Définition.....	36
III.3.2 Principales méthodes	36
III.4 Avantages et inconvénients des essais non destructifs.....	38
III.5 Essai d'auscultation dynamique.....	38
III.5.1 Définition.....	38

III.5.2 Principe.....	38
III.5.2 Principe de l'essai	40
III.6 La vitesse de propagation de l'ultrason	40
III.6.1 Les différentes manières de mesure	42
III.6.2 Les avantages	43
III.6.3 Les inconvénients	44
III.7 Essai au scléromètre	44
III.7.1 Définition	44
III.7.2 Principe.....	45
III.7.2.1 Indice de rebondissement	46
III.7.2.2 Appareillage	46
III.8 Méthodes pour la transformation des indices sclérométriques en résistance mécanique à la compression du béton. CNERIB (1998).....	49
III.8.1 Méthode de la courbe unique	49
III.8.2 Méthode de la courbe de calibrage	50
III.8.3 Méthode des coefficients d'influence non corrigés	51
III.9 Les avantages	54
III.10 Les inconvénients.....	55
III.11 Méthodes combinées.....	56
III.11.1 Définition.....	56
III.11.2 Principe.....	57
III.11.3 Les avantages.....	57
III.11.4 Les inconvénients	58
III.12 Conclusion.....	58

CHAPITRE IV

Matériaux, matériels et essais

IV. 1 Introduction	60
IV. 2 Matériaux Utilise	60
IV. 3 Caractéristique des matériaux.....	60
IV. 3. 1 Caractéristiques du gravier	60
IV. 3. 1. 1 Analyse granulométrique par tamisage : NF P 18-560.....	60
VI. 3. 1. 2 Masse volumique	62
VI. 3. 1. 2. 1 La masse volumique apparente (γ): NF P18-554.....	63
VI. 3. 1. 2. 2 La masse volumique absolue ou spécifique (ρ): NF P18-554.....	64
VI. 3. 1. 3 La porosité : NF P18-554	64
VI. 3. 1. 4 La compacité : NF P18-554.....	65
VI. 3. 1. 5 L'indice des vides : NF P18-554.....	65
VI. 3. 1. 6 La résistance à la fragmentation par chocs (Essai Los Angeles) : NF P 18-541	65
VI. 3. 1. 7 Degré d'absorption d'eau : NF P18-555	67
VI. 3. 2 Caractéristique du sable.....	68
VI. 3. 2. 1 Analyse granulométrique : NF18-560.....	68
VI. 3. 2. 2 Module de finesse : NF P 18-540.....	70
VI. 3. 2. 3 Propreté « équivalent de sable » : NF P18-590	71
VI. 3. 2.4 Caractéristiques physiques du sable	73
VI. 3. 2. 4. 1 Masse volumique apparent : NF P18-555.....	73
VI. 3. 3 Caractéristiques du ciment utilisé	76
VI. 3. 3. 1 Présentation du ciment GICA.....	76
VI. 3. 3. 2 Analyses et caractérisation	76
VI. 3. 3. 2 Domaines d'utilisation	77

VI. 3. 4 L'eau de gâchage : [NA EN 1008]	78
IV.4 Adjuvant.....	78
IV.4.1 MEDAFLUID40.....	78
IV.4.1. 1 DESCRIPTION.....	78
IV.4.1. 2 Domaine d'application	78
IV.4.1. 3 Propriétés	78
IV.4.1.4 Caractéristiques	79
IV.4.1.6 Dosage.....	79
IV.4.2 MEDAFLOW 30.....	79
IV.4.2.1 Description.....	79
IV.4.2.2 Domaine d'application	79
IV.4.2.3 Propriétés	79
IV.4.2.4 Caractéristiques	80
IV.4.2.5 Dosage.....	80
IV.5 L'ajout cimentaires : La fumée de silice	80
IV.6 Composition du béton.....	81
IV.6.1 Méthode de L'Université de Sherbrooke	81
IV.6.2 Rapport eau/liant	82
IV.6.3 Dosage en eau.....	83
IV.6.4 Dosage en superplastifiant.....	83
IV.6.4.1 Point de saturation.....	83
IV.6.5 Dosage en gros granulat	84
IV.6.6 Teneur en air.....	84
IV.6.7 Feuille de calcul.....	84
IV.6.8 Granulats à l'état saturé superficiellement sec (SSS).....	87
IV.6.8.1 Teneur en eau totale d'un granulat (Etot)	89
IV.6.8.2 Teneur en eau absorbée d'un granulat (Eabs).....	90
IV.6.8.3 Densité d'un granulat (SSS).....	90
IV.7 Teneur en superplastifiant	90
IV.7.1 Masse d'eau contenue dans un certain volume de super plastifiant	91
IV.7.2 Masse des particules solides et volume de super plastifiant nécessaire.....	91
IV.7.3 Volume des solides contenus dans V_{liq}	92
IV.8 Matériels et essais	94
IV.8.1 Les essais sur le béton à l'état frais	94
IV.8.2 Les essais sur le béton a l'état durci	95
IV.8.3 Essais non destructive : P18-418 EN 12504-4.....	97
IV.9 Module d'élasticité dynamique.....	98
IV.10 Mesure le taux d'absorption d'eau: EN 1097.....	98
IV.11 Porosité : ASTM - C642	99
IV.12 Conclusion	100

CHAPITRE V

Résultats et discussion

V.1 Introduction.....	102
V.2 Méthodologie adaptée pour les manipulations	102
V.3 Présentation des résultats	102

V.4 A l'état frais (propriétés physiques)	102
V.4.1 L'affaissement	102
V.4.2 La masse volumique (frais).....	104
V.5 État durci (Propriétés physiques)	105
V.5.1 La masse volumique apparente à l'état durci	105
V.5.2 La vitesse d'ultrason (V).....	107
V.5.4 Porosité et l'absorption	108
V.5.5 Résistance à la compression (Rc).....	110
V.5.6 Résistance à la flexion (Rf).....	112
V.6 Étude de corrélation.....	113
V.6.1 Étude de corrélation entre (ρ) et (V)	113
V.6.1.1 Corrélation entre (ρ) et (v) pour BHPI.....	113
V.6.1.2 Corrélation entre (ρ) en fonction de (v) pour BHPII	114
V.6.1.3 Corrélation entre (ρ) en fonction de (v) pour BHPI et BHPII	115
V.6.2 Étude de corrélation entre (ρ) et (Is)	115
V.6.2.1 la corrélation (ρ) en fonction de (Is) pour BHPI.....	115
V.6.2.2 la corrélation (ρ) en fonction de (Is) pour BHPII	116
V.6.2.3 la corrélation (ρ) en fonction de (Is) pour BHPI et BHPII.....	117
V.6.3 Étude de corrélation entre (Rc) et (V).....	117
V.6.3.1 la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour BHPI	117
V.6.3.2 la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour BHPII	118
V.6.3.3 la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour BHPI et BHPII	119
V.6.5 Étude de corrélation entre (Rc) et (Is).....	119
V.6.5.1 la corrélation (Rc) en fonction de (Is) pour BHPI	119
V.6.5.2 la corrélation (Rc) en fonction de (Is) pour BHPII	120
V.6.5.3 la corrélation (Rc) en fonction de (Is) pour BHPI et BHPII	121
V.6.6 Étude de corrélation entre (Ed) et (V).....	121
V.6.6.1 la corrélation (Ed) en fonction de (V) pour BHPI	121
V.6.6.2 la corrélation (Ed) en fonction de (V) pour BHPII	122
V.6.6.3 la corrélation (Ed) en fonction de (V) pour BHPI et BHPII	123
V.6.7 Étude de corrélation entre (Ed) et (Is).....	123
V.6.7.1 la corrélation (Ed) en fonction de (Is) pour BHPI	123
V.6.7.2 la corrélation (Ed) en fonction de (Is) pour BHPII	124
V.6.7.3 la corrélation (Ed) en fonction de (Is) pour BHPI et BHPII	125
V.6.8 la corrélation porosité (P) en fonction de (V)	125
V.7 les méthodes combinées	126
V.7.1 Corrélation (Rc) entre (V) et (Is) pour les bétons BHPI	126
V.7.2 Corrélation (Rc) entre (V) et (Is) pour les bétons BHPII	127
V.7.3 Corrélation (Rc) entre (V) et (Is) pour BHPI et BHPII.....	128
V.7.4 Corrélation (Ed) entre (V) et (Is) pour les bétons BHPI	128
V.7.5 Corrélation (Ed) entre (V) et (Is) pour les bétons BHPII	129
V.7.6 Corrélation (Ed) entre (V) et (Is) pour les bétons BHPI et BHPII	129
V.8 Synthèse de formules de corrélation proposées pour l'estimation des propriétés physiques et mécaniques d'un BHP	130
V.8.1 Comparaison entre les résultats de différentes approches.....	132
V.8.2 (Rc) en fonction de (V)	132
V.8.3 (Rc) en fonction de (Is)	133
V.8.4 (Rc) en fonction de (V, Is)	133
V.9 Conclusion.....	134
Conclusion Generale	136
References Bibliographiques.....	137

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I. 1 : Flocculat de ciment en l'absence de superplastifiant.	8
Figure I. 2: Mécanisme de floculation avec et sans superplastifiants.	8
Figure I. 3 : Porosité des bétons ordinaires et des BHP [24].	12
Figure I. 4 : Évolution de la courbe contrainte – déformation d'un BHP de résistance moyenne 117,5 et de module 57,5 GPa [36].	15
Figure I. 5 : Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C [39].	16
Figure I. 6 : Relation entre la porosité et le rapport E/C pour différents degrés d'hydratation [39].	17

CHAPITRE II

Figure II. 1 : La fumée de silice	22
Figure II. 2 : Image un microscope électronique de la fumée de silice [44].	22
Figure II. 3 : Flux dans une usine de fabrication de silicium et d'alliages de ferrosilicium et principe de production de la fumée de silice	23
Figure II. 4 : Extraction et filtration de la fumée de silice dans un filtre à manches	24
Figure II. 5: Morphologie et influence sur les propriétés.	25

CHAPITRE III

Tableau III. 1 : Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions selon Leslie et Cheesman (1949). [92] ..	40
Tableau III. 2: Expressions des autres auteurs pour la corrélation de f_c et V . [92]	41
Tableau III. 3 : Moyens de mesure selon Type de recul au scléromètre. [92]	45
Tableau III. 4 : Correction de la valeur de l'indice de rebondissement en fonction de l'angle d'inclinaison. [92]	46
Tableau III. 5 : Modèles des scléromètres existants. [92]	47
Tableau III. 6 : Valeurs du coefficient C_c . [92]	52
Tableau III. 7 : Valeurs du coefficient C_d . [92]	52
Tableau III. 8 : Valeurs du coefficient C_m . [92]	53
Tableau III. 9 : Valeurs du coefficient C_u . [92]	53
Tableau III. 10 : Expressions des autres auteurs pour la corrélation de f_c et R . [92]	54

CHAPITRE IV

Figure IV. 1 : La courbe granulométrique de différentes fractions granulaires	62
Figure IV. 2 : Appareille de Los Angeles.	66
Figure IV. 3 : Sac ciment CRS- CEM I /42.5 ES	76
Figure IV. 4: Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP [96]	81
Figure IV. 5: relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression [11].	82
Figure IV. 6: Détermination du dosage en eau [11]	83
Figure IV. 7: Temps d'écoulement en fonction du dosage en super plastifiant [96]	83
Figure IV. 8 : Dosage en gros granulat [96]	84
Figure IV. 9 : Représentation schématique d'un granulat à l'état SSS. [96].	88
Figure IV. 10 : Détermination de l'état SSS pour un sable. [96]	88
Figure IV. 11: Représentation schématique de la mesure de l'absorption et de la densité d'un gros granulat à l'état SSS. [96]	89
Figure IV. 12 : Représentation schématique d'un granulat mouillé. [96]	89
Figure IV. 13 : Représentation schématique d'un super plastifiant [96]	90
Figure IV. 14 : Mesure de l'affaissement.	94
Figure IV. 15 : Presse hydraulique	96
Figure IV. 16 : Appareil à ultrasons hautes performances et ses équipements.	97
Figure IV. 17 : Scléromètre.	97
Figure IV. 18: Exécution de l'essai sclérométrique.	98

Figure IV. 19 Pesé hydrostatique	99
--	----

CHAPITRE V

Figure V. 1 : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage d'adjuvant pour chaque béton.	103
Figure V. 2 : La variation de la masse volumique apparente à l'état frais en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons.	104
Figure V. 3 : L'évolution de la masse volumique apparente en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons à 7, 14 et 28 jours.....	105
Figure V. 4 : Variation de la masse volumique des bétons testés à 28 jours.....	106
Figure V. 5 :L'évolution de la vitesse ultrasonique en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types de béton à 7, 14 et 28 jours.	107
Figure V. 6 : Évolution de l'indice sclérométrique en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons à 7, 14 et 28 jours.	108
Figure V. 7 : La variation de la porosité fonction du pourcentage d'adjuvant.	109
Figure V. 8 : La variation de l'absorption en fonction du pourcentage d'adjuvant.	109
Figure V. 9 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons à 7, 14 et 28 jours.	111
Figure V. 10 : la variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons à 28 jours.....	111
Figure V. 11 : la variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons à 28 jours.....	113
Figure V. 12 : Corrélation entre (ρ) et (v) pour BHPI.....	113
Figure V. 13: Corrélation entre (ρ) et (v) pour BHPII	114
Figure V. 14 : Corrélation entre (ρ) et (v) pour BHPI et BHPII.....	115
Figure V. 15: La corrélation (ρ) en fonction de (I_s) pour BHPI.....	116
Figure V. 16: La corrélation (ρ) en fonction de (I_s) pour BHPII	116
Figure V. 17: la corrélation (ρ) en fonction de (I_s) pour BHPI et BHPII.....	117
Figure V. 18 : la corrélation (R_c) en fonction de (V) pour BHPI.....	118
Figure V. 19 : la corrélation (R_c) en fonction de (V) pour BHPII	118
Figure V. 20 : La corrélation (R_c) en fonction de (V) pour BHPI et BHPII	119
Figure V. 21: la corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BHPI.....	120
Figure V. 22 : la corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BHPII	120
Figure V. 23 : La corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BHPI et BHPII	121
Figure V. 24 : la corrélation (E_d) en fonction de (V) pour BHPI.....	122
Figure V. 25 : la corrélation (E_d) en fonction de (V) pour BHPII	122
Figure V. 26 la corrélation (E_d) en fonction de (V) pour BHPI et BHPII	123
Figure V. 27 : la corrélation (E_d) en fonction de (I_s) pour BHPI.....	124
Figure V. 28 : la corrélation (E_d) en fonction de (I_s) pour BHPII	124
Figure V. 29 : la corrélation (E_d) en fonction de (I_s) pour BHPI et BHPII	125
Figure V. 30 : la corrélation porosité (P) en fonction de (V)	126
Figure V. 31 : Corrélation entre la résistance à la compression, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique pour BHPI	126
Figure V. 32 : Corrélation entre la résistance à la compression, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique pour BHPII	127
Figure V. 33 : Corrélation entre la résistance à la compression, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique pour BHPI et BHPII	128
Figure V. 34 : Corrélation entre module élasticité dynamique, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique pour BHPI	128
Figure V. 35 : Corrélation entre module élasticité dynamique, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique pour BHPII	129
Figure V. 36 : Corrélation entre module élasticité dynamique, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique pour BHPI et BHPII	130
Figure V. 37 : Comparaison entre le résultat de l'écrasement et les valeurs estimées des différentes corrélations en fonction de la vitesse d'ultrason.....	132
Figure V. 38 : Comparaison entre le résultat de l'écrasement et les valeurs estimées des différentes corrélations fonction de l'indice sclérométrique.....	133
Figure V. 39 : Comparaison entre le résultat de l'écrasement et les valeurs estimées des différentes corrélations par la méthode combinée.	134

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I. 1 : Présente quelques résultats d'essais de compression.	14
--	----

CHAPITRE III

Tableau III. 1 : Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions selon Leslie et Cheesman (1949). [92] ..	40
Tableau III. 2: Expressions des autres auteurs pour la corrélation de f_c et V . [92]	41
Tableau III. 3 : Moyens de mesure selon Type de recul au scléromètre. [92]	45
Tableau III. 4 : Correction de la valeur de l'indice de rebondissement en fonction de l'angle d'inclinaison. [92]	46
Tableau III. 5 : Modèles des scléromètres existants. [92]	47
Tableau III. 6 : Valeurs du coefficient C_c . [92]	52
Tableau III. 7 : Valeurs du coefficient C_d . [92]	52
Tableau III. 8 : Valeurs du coefficient C_m . [92]	53
Tableau III. 9 : Valeurs du coefficient C_u . [92]	53
Tableau III. 10 : Expressions des autres auteurs pour la corrélation de f_c et R . [92]	54

CHAPITRE IV

Tableau IV. 1 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/16)	61
Tableau IV. 2: L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/16)	61
Tableau IV. 3 : La masse volumique apparente (γ) du gravier concassé [(3/8), (8/16)].	63
Tableau IV. 4: La masse volumique absolue (ρ) du gravier concassé [(3/8), (8/15)].	64
Tableau IV. 5 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.	65
Tableau IV. 6 : Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire choisie.	66
Tableau IV. 7 Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A	67
Tableau IV. 8: Résultats d'essai de Los Angeles du gravier [(3/8), (8/16)].	67
Tableau IV. 9: Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/16)	68
Tableau IV. 10: Analyse granulométrique du sable de dune OUAD SOUF.	69
Tableau IV. 11: Analyse granulométrique du sable concassé.	69
Tableau IV. 12 : Classification des sables en fonction du module de finesse.	70
Tableau IV. 13: Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E_{SV} et E_{Sp}	72
Tableau IV. 14: Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de OUAD SOUF.	72
Tableau IV. 15: Résultats d'essais d'équivalent de sable concassé testé.	73
Tableau IV. 16 : Caractéristiques physiques du sable d'OUED SOUF et sable concassé.	75
Tableau IV. 17: Composition minéralogique du clinker.	76
Tableau IV. 18: Analyse chimique du ciment GICA	77
Tableau IV. 19 : Propriétés physiques du ciment utilisé.	77
Tableau IV. 20: Temps de prise à 20°C.	77
Tableau IV. 21 : Résistance mécanique à la compression.	77
Tableau IV. 22 : Propriétés de MEDAFLUID40.	78
Tableau IV. 23 : Caractéristiques de MEDAFLUID40.	79
Tableau IV. 24: Propriétés MEDAFLOW30.	79
Tableau IV. 25: Caractéristique MEDAFLOW30.	80
Tableau IV. 26: Les propriétés d'un MEDAPLAST HP.	80
Tableau IV. 27: La composition chimique d'un MEDAPLAST HP.	81
Tableau IV. 28 : La caractéristique physique d'un MEDAPLAST HP.	81
Tableau IV. 29 : Composition d'un BHP.	86
Tableau IV. 30 : Composition d'un BHP 0%.	93
Tableau IV. 31 : Les quantités des matériaux à chaque pourcentage des adjuvants	94

CHAPITRE V

Tableau V. 1: L'affaissement des déférents bétons étudié.	103
Tableau V. 2 : La masse volumique des déférents bétons étudié.....	104
Tableau V. 3 : La masse volumique apparente à l'état durci des déférents bétons étudié à 7.14.28 jours.	105
Tableau V. 4 : La vitesse d'ultrason des déférents bétons étudié à 7.14.28 jours.	107
Tableau V. 5 : L'indice sclérométrique des déférents bétons étudié à 7.14.28 jours.	108
Tableau V. 6 : La porosité et à l'absorption des déférents bétons étudié.	109
Tableau V. 7: La résistance à la compression l'état durci des déférents bétons étudié à 7.14.28 jours.	110
Tableau V. 8: La Résistance à la flexion à l'état durci des déférents bétons étudié à 7.14 et 28 jours.	112
Tableau V. 9 : Formules de corrélation proposées pour l'estimation des propriétés physiques et mécaniques d'un BHP.....	131
Tableau V. 10: Formules de quelques corrélations existantes pour l'estimation de la résistance mécanique (Rc) ...	132

Notations

A (%) : Degré d'absorption.

A : Masse des granulats secs.

.B : Masse des granulats à l'état SSS.

BHPI_{0,5} : béton à haute performance, 8% fumée de silice avec 0.5% MEDAFLOW30.

BHPI_{1,5} : béton à haute performance, 8% fumée de silice avec 1.5% MEDAFLOW30.

BHPI₁ : béton à haute performance, 8% fumée de silice avec 1% MEDAFLOW30.

BHPII_{0,5} : béton à haute performance, 8% fumée de silice avec 0.5% MEDAFLUID40.

BHPII_{1,5} : béton à haute performance, 8% fumée de silice avec 1.5% MEDAFLUID40

BHPII₁ : béton à haute performance, 8% fumée de silice avec 1% MEDAFLUID40.

BHP_T : béton à haute performance, 8% fumée de silice sans adjuvants.

C : est la masse de liant.

C : Pesée hydrostatique des granulats.

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

C(%) : La compacité.

d : dosage du super plastifiant exprimée sous forme de pourcentage de la masse de solide par rapport à la masse de matériaux cimentaires.

d : est le dosage en super plastifiant (la masse de solides).

D : Diamètre maximal du gros granulats.

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

dc : densité du ciment ou des ajouts cimentaires.

ds_{SS} : densité des granulats à l'état saturé superficiellement sec.

ds_{sup} : densité du super plastifiant liquide .

E : masse d'eau en kg/m³ dans le béton.

e(%) : L'indice des vides .

E/C : Rapport eau/ciment.

E/L : rapport eau/liant.

E_{abs} : quantité d'eau absorbée dans les granulats (en pour cent) .

Ed : est le module d'élasticité dynamique du béton.

E_h : humidité des granulats (en pour cent) .

Et_{ot} : teneur en eau totale des granulats (en pour cent).

F : la charge de rupture (N).

g : la vitesse gravitationnelle.

H : Masse des granulats humides.

h₁ : hauteur du sable plus flocculat.

h₂ : hauteur du sable.

L : masse de liant par mètre cube de béton.

L_A : Le coefficient de Los Angeles.

M₁ : masse du récipient vide.

M₂ : masse du récipient et gravier.

MF : Module de finesse.

M_H : La masse du matériau saturé d'eau en .

M_{liq} : Masse de liquide de super plastifiant.

M_S : La masse du matériau sec en .

M_{sol} : masse de solides dans super plastifiant

P (%) : porosité .

R² : coefficient de corrélation

R_c : résistance a la compression

R_{st} ,R_{st}' : résistances du béton de référence standard

S : l'indice sclérométrique.

s : teneur en solides du super plastifiant (en pour cent)

S : section de l'éprouvette (mm²).

SC : est le sable concassé.

SD : est le sable de dune.

V : la vitesse de propagation.

VE : volume d'eau dans le super plastifiant.

V_{liq} : volume de super plastifiant liquide .

V_{liq} : volume de super plastifiant liquide.

V_r : Volume du récipient .

V_{sol} : volume de solides dans le super plastifiant.

v : est le coefficient de poisson.

ρ : est la masse volumique du béton.

ملخص

إن استخدام المميغات في صناعة الخرسانة تحسن بشكل كبير في الانسيابية و الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية، و تنتج عنها خرسانة جديدة تعرف بالخرسانة عالية الأداء .

في هذا العمل سوف ندرس نوع و نسبة المضافات على خصائص الانسيابية ، الفيزيائية و الميكانيكية للخرسانة عالية الأداء باستعمال مواد محلية و كذلك على الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية بالطرق غير التحطمية لإنشاء علاقات رياضية بين القيم المحصلة في التجارب ، و لهذا استخدمنا نوعين من الاضافات (MEDAFLOW 30) و (MEDAFLUID 40) بنسب (0% ، 0.5% ، 1% ، 1.5%) .

أظهرت الدراسة أن زيادة في نسب كميات (MEDAFUID 40) ، تنتج عنه زيادة الميوعة و المسامية و امتصاص الماء ، انخفاض المقاومة الميكانيكية بالنسبة لماء/رابط ثابت ، على العكس بالنسبة ل (MEDAFLOW 30) فقد أعطانا نتائج مرضية للغاية

العلاقات المحصل عليها في هذه الدراسة تساعد في تقييم الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للخرسانة عالية الأداء مع نسب أخطاء مقبولة .

كلمات مفتاحية: خرسانة عالية الأداء ، المميغات ، خصائص الفيزيائية و الميكانيكية ، الطرق الغير التحطمية ، العلاقات .

Résumé

L'utilisation des superplastifiants dans la confection des bétons améliore beaucoup les performances rhéologiques, physiques et mécaniques de ces derniers, et donne la naissance à de nouvelles gammes de béton tel que les bétons à haute performance (BHP).

Dans ce travail on va étudier l'effet du type et de pourcentage d'adjuvant sur les propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques des BHP fabriqués à base des matériaux locaux, ainsi que, leur caractérisation physico-mécanique aux moyens des essais non destructifs afin d'établir des corrélations mathématiques reliant les grandeurs mesurée à ceux estimées. Pour cela, on a utilisé deux types de superplastifiant (MEDAFLUID 40 et MEDAFLOW 30) avec des pourcentages variant de 0, 0.5, 1, et 1.5%.

L'étude nous a montré que l'augmentation du dosages de superplastifiants (MEDAFLUID40), conduit à l'augmentation de l'ouvrabilité, la porosité et l'absorption d'eau avec la diminution de la résistance mécanique pour un rapport E/L constant, contrairement au superplastifiant (MEDAFLOW30) qui donne des résultats très satisfaisantes ; les corrélations établie dans cette étude va permettre d'évaluer les caractéristiques physiques et mécaniques des BHP étudiée avec des erreurs acceptables.

Mots clés : Béton à haute performance, superplastifiant, propriétés physiques et mécaniques, essais non destructifs, corrélations.

Abstract

The use of superplasticizers in the concrete composition improves much rheological, physical and mechanical performances of the latter and gives the birth novel concrete ranges such as high-performance concrete (HPC). This work is aiming to study the effect of the type and the percentage of admixture on the properties such as the rheology, physical appearances and the mechanical response of the HPC made with the local materials. Also, their physico-mechanical characterization in the means of the non-destructive test methods. This in order to establish mathematical correlations relating the measured to those estimated. For this objective, we used two types of superplasticizers (MEDAFLUID 40 and MEDAFLOW 30) at percentages of 0, 0.5, 1, and 1.5 %.

The results obtained from the present study showed that the increase of dosages of superplasticizers (MEDAFLUID40), led to the increase of the workability, the porosity and the absorption of water with the decrease of the mechanical resistance for a constant ratio E/L , contrary to the superplasticizer (MEDAFLOW30) which gave results very satisfactory results; the correlations established in this study allow to estimate the physical and mechanical characteristics of the HPC studied with acceptable errors.

Keywords: high-performance Concrete HPC, superplasticizer, physical and mechanical properties, non-destructive tests, correlations.

Introduction Générale

Introduction générale

Les bétons à haute performance (BHP) depuis leurs inventions ont connus une large utilisation dans le domaine de construction. L'obtention de ces bétons est liée avec l'utilisation des ajouts et des adjuvants ; ces derniers offrent aux bétons des caractéristiques impressionnantes à l'état frais, d'où ils garantissent l'acquisition d'une grande fluidité et assure une mise en place très facile et sans risque de ségrégation avec un rapport E/L très faible.

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.

Les objectifs de notre travail sont :

- ✓ Confectionner un béton à haute performance de résistance de 60 MPa avec une ouvrabilité optimale à base des matériaux locaux et avec deux types différents d'adjuvant (MEDAFLUID 40 et MEDAFLOW 30).
- ✓ Voir l'influence de ce type et du pourcentage d'adjuvants sur ces corrélations.
- ✓ Établir des corrélations entre les différentes propriétés des BHP, afin d'arrêter des modèles mathématiques reliant les paramètres mesurés à ceux estimés.

La première partie de ce travail, consiste à l'étude bibliographique des caractéristiques du béton à haute performance, des adjuvants et ajouts, et leurs influences sur le comportement des BHP, et ainsi, on va considérer les essais non destructifs comme moyen d'évaluation.

La deuxième partie est consacrée à la caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude (ciment, gravier, sable, eau, adjuvant et ajouts) selon les normes en vigueur. On présente aussi les compositions du béton à étudier, et les essais sur béton avec lesquels on va répondre à la problématique posée.

La dernière partie du mémoire présente les résultats et leurs interprétations avec les conclusions tirées.

CHAPITRE I

Béton à Haute performance

I.1 Introduction

Dans ce chapitre on a effectué une recherche bibliographique sur les bétons à hautes performances. On a présenté quelques généralités sur les BHP, leur constituant et notamment le rôle des superplastifiants dans leur l'obtention. Les caractéristiques des BHP ont été abordées pour confirmer le large domaine d'utilisation de ce béton. Comme on va le voir dans ce chapitre les BHP sont utilisés dans plusieurs techniques de construction tel que les barrages et les ouvrages d'art grâce à ces multiples avantages.

I.2 Généralités

Pendant longtemps, les concepteurs et l'industrie du béton se sont contentés de prescrire et de mettre sur le marché un béton universel dont la résistance en compression varie entre 15 et 25 MPa.

La rhéologie de tels bétons est principalement contrôlée par quantité d'eau introduite dans le béton lors de son gâchage ou lors de sa mise en place sur le chantier. Cependant, dans plusieurs pays industriels, on a pu augmenter légèrement la résistance à la compression des bétons utilisés dans la construction (de 25 à 55 MPa) grâce à l'utilisation de réducteur d'eau. [1]

Durant les dernières décennies, les chercheurs ont élaboré plusieurs travaux scientifiques dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives du béton frais et durci. La vulnérabilité du béton à la pénétration des agents agressifs est en relation directe avec sa porosité, il est donc nécessaire d'explorer des voies visant à optimiser cette porosité afin d'offrir au béton une meilleure performance. D'une part, on vise à réduire l'eau aux quantités indispensables à l'hydratation du ciment par l'emploi d'un super plastifiant, et d'autre part, on remplace une certaine quantité de ciment par des matériaux cimentaires tels que la fumée de silice, les cendres volantes ou les laitiers des hauts fourneaux. L'ajout de tels matériaux permet d'accomplir deux fonctions : l'une physique et l'autre chimique. La première fonction assure le remplissage des micros vides, de l'empilement des grains de ciment tout en améliorant la compacité du mélange. La deuxième fonction (fonction chimique) est la fixation de la portlandite produite lors de l'hydratation du ciment, pour former un composant de silicate de calcium hydraté plus dense et plus résistant que celui des bétons Ordinaires. [2]

Durant les années 70, on a vu apparaître aux Etats-Unis des bétons ayant des résistances à la compression comprises entre 50 et 60 MPa utilisés pour construire les colonnes des gratte-ciels.

Ces bétons étaient fabriqués en sélectionnant avec soin les ingrédients entrant dans la composition du béton, en le réduisant d'eau utilisée et en remplaçant une certaine quantité de ciment portland par une cendre volante performante. [3]

La technologie des adjuvants a fait beaucoup de progrès lorsque toute l'efficacité des propriétés dispersantes des polynaphthalène et sulfonates a commencé à être utilisée, non seulement pour augmenter la fluidité du béton, mais aussi pour diminuer le rapport eau/ciment grâce à l'utilisation de ces polymères synthétiques. Il devint facile d'augmenter la résistance à la compression jusqu'à 100 MPa sans aucun effet négatif sur la rhéologie du béton. Les bétons à haute performance, qui sont simplement des bétons de faible rapport E/C ou E/L, sont aussi des

bétons économiques du point de vue coût initial, car il est possible de construire une structure équivalente avec moins coffrage et moins d'armatures. [1]

L'appellation béton à hautes performances s'applique aux bétons dont la résistance caractéristique à la compression à 28 jours (f_{c28}) est supérieure à 60 MPa. Néanmoins la résistance à la compression élevée n'est pas la seule et la principale propriété des bétons à hautes performances, car plusieurs autres propriétés se trouvent améliorées, telles que la très faible perméabilité donc une durabilité accrue.

I.3 Les constituants

I.3.1 Le ciment

La compatibilité entre le super plastifiant et le ciment est un facteur très important pour le choix du ciment. La finesse du ciment et sa composition chimique peuvent affecter le comportement du super plastifiant. Il est nécessaire de faire des essais sur coulis ou sur mortier pour le choix du super plastifiant. Les ciments à temps de prise très long sont à éviter, des dosages élevés en super plastifiant ne permettent pas le démoulage même après 24 heures [4].

L'obtention de bonnes résistances mécaniques dépend de la finesse de mouture du clinker. On augmente ainsi la proportion d'hydrates dans le ciment durci. La finesse du ciment confère au béton une résistance précoce. La surface spécifique Blaine doit être de l'ordre de 3 500 à 4 000 cm^2/g . Cependant, l'augmentation de cette surface conduit à l'obtention d'un ciment à très forte teneur en fines donc à forte chaleur d'hydratation et par suite il y a risque de prise instantanée.

Ce phénomène induit des contraintes d'origine thermique et donc des fissurations de peau dans des pièces massives. En outre, du point de vue de l'obtention d'une forte compacité dans les BHP, les particules les plus fines du ciment ont des interactions granulaires néfastes avec les grains d'ultrafines. En règle générale, il est recommandé de limiter la taille inférieure des grains de ciment à 1 μm [5].

Certaines études avaient préconisé l'utilisation des laitiers ultrafins [6] et des ciments au laitier [7] pour diminuer la chaleur d'hydratation, maintenir la maniabilité et améliorer la durabilité.

Les dosages préconisés pour les BHP sont compris entre 350 et 600 kg/m^3 suivant la résistance projetée et le coût comparé de l'ultrafine [5].

Le dosage en eau conduit à des rapports eau/(ciment + ultrafine) compris entre 0,2 et 0,3. Si on veut atteindre des résistances élevées, il est important de réduire au plus bas rapport tout en gardant une maniabilité convenable.

Un rapport E/C de 0,35 représente à peu près la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation du ciment. Ce qui signifie qu'un volume assez important de grains de ciment reste

anhydre dans un BHP et ceci même à long terme. Le ciment en plus de sa fonction liante joue aussi le rôle d'un granulat inerte de petite dimension [5].

I.3.2 Les granulats

Les granulats occupent environ 70 % du volume du matériau et, à ce titre interviennent directement sur les propriétés du béton à l'état frais comme à l'état durci. Ils semblent même plus sollicités dans les BHP que dans les bétons classiques [5]. D'une manière générale, les qualités demandées aux granulats pour l'obtention des BHP concernent essentiellement la forme et l'état de surface, la porosité, la granularité, les propriétés mécaniques et la nature minéralogique.

I.3.2.1 Forme et état de surface

La forme intervient directement sur la compacité propre du béton. La rugosité de la surface favorise l'imbrication de la pâte de ciment.

Les granulats concassés à coefficient de forme élevé sont préférés aux granulats roulés lisses (adhérence plus élevée). Le coefficient de forme est le rapport du volume effectif du granulat sur le volume de la sphère circonscrite. Plus il sera élevé, meilleure sera la compacité. En outre, les formes très anguleuses sont très néfastes quant à l'obtention des bonnes résistances, elles poinçonnent la matrice lors d'une sollicitation.

En effet, lorsque le béton est soumis à une sollicitation de compression, on peut assimiler les granulats à des plateaux de compression d'une presse et, la matrice se trouve donc poinçonnée [8].

Les granulats lisses favorisent la détérioration rapide de la liaison granulat – pâte très haute performance [9].

I.3.2.2 Porosité

Les granulats poreux (avec une porosité communicante) modifient la consistance du matériau par absorption d'eau dans le malaxeur. Il est recommandé d'utiliser des granulats de coefficient d'absorption inférieur à 1 % [10].

I.3.2.3 Nature minéralogique

Elle est caractérisée par la résistance mécanique des grains, la texture (la rugosité de surface) et la possibilité des réactions à l'interface granulat – pâte de ciment.

Les granulats présentant des risques de réactions alcali – granulat sont à proscrire car ces réactions détruisent l'étanchéité des enceintes et la stabilité à long terme des ouvrages [9].

La présence des poussières ou d'argile sur les granulats réduit l'adhérence et exige une augmentation de la teneur en eau entraînant une chute des résistances.

I.3.3 Granularité

C'est elle qui régit la compacité du mélange et sa maniabilité. Les dosages en ciment dans les BHP étant élevés, il n'y a pas intérêt à utiliser des sables fins, Alaejos Gutierrez et al. [5] recommandent le sable de rivière qui réduirait la demande en eau.

Dutruef [11] recommande de limiter la dimension maximale du gros granulat à 12 mm pour avoir des résistances élevées. Metha et al. [12] sans s'y opposer, recommandent les granulats de dimension maximale comprise entre 20 et 25 mm ; Addis et al. [13] avaient trouvé que la résistance du béton augmentait avec la dimension du gros granulat entre 13,5 et 26,5 mm, Alaejos Gutierrez et al. [10] ont affirmé qu'on obtient les meilleurs résultats avec des granulats de dimension maximale comprise entre 13 et 14 mm et un coefficient Los Angeles inférieur à 15.

De Larrard a recommandé un rapport gravier/sable (G/S) compris entre 1,5 et 2 [5].

I.4 Les superplastifiants

I.4.1 Intérêt de leur utilisation

La maniabilité des bétons classiques dépend essentiellement du dosage en eau. Malheureusement, l'augmentation de la teneur en eau conduit à la modification des propriétés du béton : à long terme, chute des résistances mécaniques, porosité accrue et donc durabilité réduite à court terme, ségrégation accrue et perte d'homogénéité du matériau [14].

Les BHP sont définis par trois critères : résistance, durabilité et ouvrabilité. Tanaka et al. ont pensé que les aspects les plus importants à développer sont la fluidité et la capacité de mise en œuvre. Ces suggestions nécessitent l'utilisation des superplastifiants qui peuvent procurer au béton d'excellentes fluidité et résistance à la ségrégation grâce à leur propriété dispersante. Ils permettent de défloculer les grains de ciment ayant tendance à se regrouper en grappes une fois introduits dans l'eau. Leur rôle est donc essentiellement de modifier l'équilibre des forces existant entre les particules de ciment [15].

Les trois propriétés des BHP citées ci-dessus sont encore améliorées lorsque les superplastifiants sont associés à d'autres produits tels que la fumée de silice, le métakaolin, les cendres volantes, le laitier... [16].

I.4.2 Mécanisme de dispersion

La floculation est un phénomène lié à la présence des charges électriques à la surface des grains et qui piège un certain volume d'eau, en l'empêchant de compléter l'hydratation du ciment (représentation schématique sur la Figure I.1).

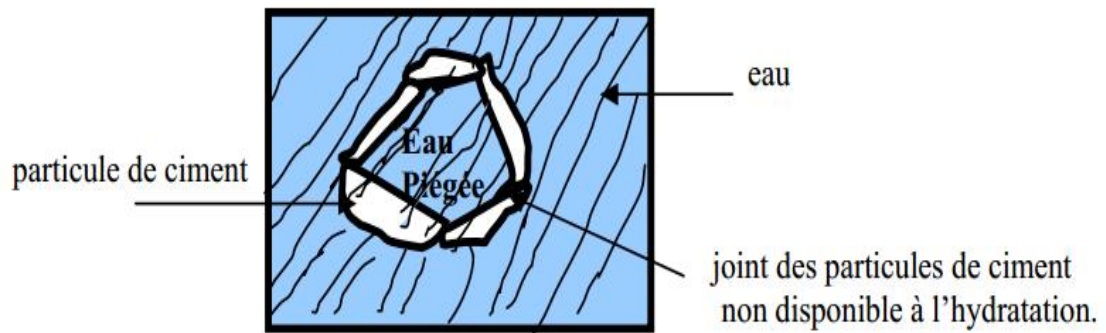


Figure I. 1 : Floculat de ciment en l'absence de superplastifiant.

La Figure I.2 montre l'influence d'un super plastifiant sur les amas de ciment. Suite à la défloculation, une dispersion des bulles d'air et en parallèle une lubrification par adsorption sur les parois des grains sont observées. Les super plastifiants de deuxième génération sont les plus efficaces. Ils améliorent la dispersabilité, permettent une stabilité de dispersion à long terme, une excellente ouvrabilité et une résistance à la ségrégation [14]. Leur action dispersive est essentiellement due à la répulsion électrique [15].

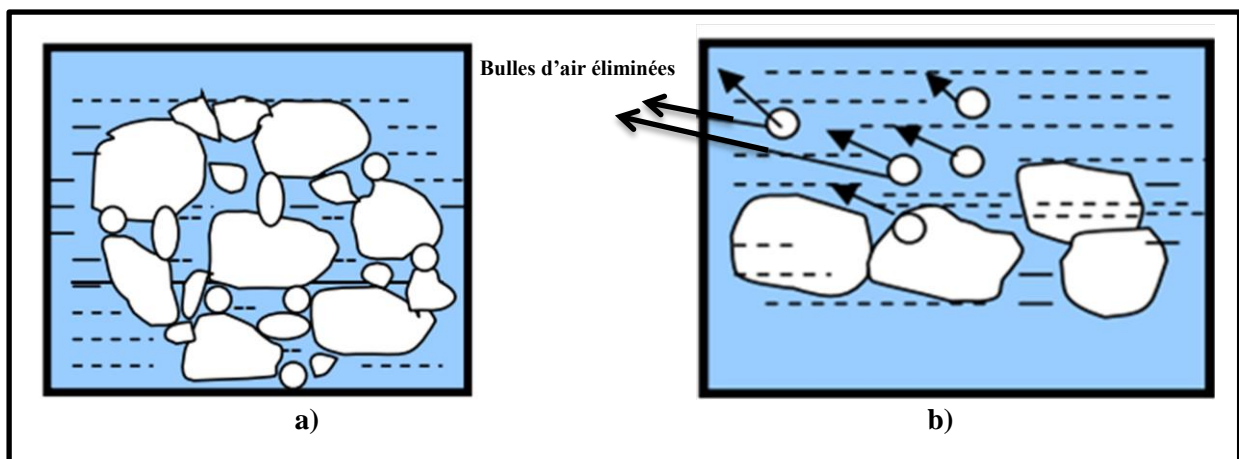


Figure I. 2: Mécanisme de floculation avec et sans superplastifiants.

a) Sans superplastifiant

Colonies de grains de ciment non défloculés, cohésion capillaire par rétention de bulles d'air.

b) avec superplastifiant

Les molécules, sont adsorbées par les grains de ciment basique, l'air s'élimine, d'où la défloculation capillaire, facilitée par abaissement de la tension aux interfaces.

I.5 Conséquences sur l'hydratation du ciment

En étudiant les polycarboxylates, Ohta et al. [16] ont montré que l'adsorption des agents dispersants dépend du type de fines liantes. Pour un matériau donné, l'adsorption par unité de masse croît avec la finesse mais demeure constante par unité de surface.

Les études récentes confirment le caractère (retardateur de prise) des superplastifiants, ils influencent le processus d'hydratation en interférant en général avec la germination et le développement des hydrates aluminates, ettringite et C-S-H [15-16 à 17].

Older et al. avaient déjà pensé que les superplastifiants pouvaient retarder l'hydratation des C3S. Ces interactions ont des conséquences pratiques parce qu'elles peuvent retarder la prise du ciment et ainsi réduire de façon significative les propriétés mécaniques des bétons au jeune âge [18- 19].

Uchikawa et al. [18], Jolicoeur et al. [20] ont montré que les superplastifiants à base de naphthalène pouvaient réagir avec les particules de ciment à forte réactivité, en particulier avec le C3A, et réduire la vitesse d'hydratation de la surface. D'après Uchikawa et al. [18], les superplastifiants à base de naphthalène sont plus adsorbés par les phases interstitielles et la chaux que par les silicates de calcium.

Simard et al. [19] ont montré que l'effet retardateur du superplastifiant est proportionnel à son dosage et généralement accentué par une faible concentration en C3A. Ils ont suggéré que des temps de prise prolongés et des faibles résistances initiales apparaissent pour de faibles concentrations en C3A, puisque de faibles quantités de superplastifiant peuvent réagir avec le C3A laissant ainsi une grande quantité de cet adjuvant être absorbée par d'autres phases minérales (C3S) et réduisant ainsi leurs vitesses de réaction de surface [19].

Pour les ciments contenant une concentration normale en C3A, un effet retardateur peut apparaître si de grandes quantités de superplastifiants sont utilisées [19]. On constate alors que pour un dosage de superplastifiant donné, les concentrations élevées en C3A réduisent le temps de prise, et sont préjudiciables pour la résistance des BHP face aux sulfates.

Baalbaki et al. [21] ont montré que le dosage optimal en superplastifiant dépend de (son) type, de la finesse du ciment, de la proportion de C3A, du type et de la proportion des sulfates et des caractéristiques du malaxeur (vitesse, effet tranchant des pales).

I.6 Spécifications sur les constituants

Les constituants du BHP font l'objet des principales spécifications suivantes.

- Ciments: conformes à la norme NF EN 197-1 de types CEM I ou CEM II ou CEM III et de classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 (N ou R).
- Granulats : conformes à la norme NF EN 12620 « Granulats pour bétons » et à la norme XP P 18-545 (article 10: « granulats pour bétons hydrauliques »).

➤ Additions : conformes aux diverses normes en vigueur – cendres volantes silico alumineuses, laitiers de haut fourneau, fillers calcaires, filler siliceux, éventuellement ultrafines (fumées de silice).

➤ Adjuvants : plastifiants réducteur d'eau et super plastifiants haut réducteur d'eau conformes à la norme NF EN 934-2.

I.7 Caractéristiques des BHP

I.7.1 Caractéristiques physiques

I.7.1.1 Ouvrabilité

Elle peut se définir par la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage du ferrailage.

Ce facteur primordial peut varier comme pour les bétons classiques et l'on obtient facilement des affaissements au cône d'Abrams appelés slumps de 15 à 18 cm, mais il faut impérativement étudier :

- ✓ les granulats (module de finesse du sable) ;
- ✓ le choix du ciment et du superplastifiant ;
- ✓ les dosages de ces différents matériaux, de la fumée de silice et de l'eau pour la plasticité désirée, en fonction des plus ou moins grandes difficultés de mise en œuvre dans les coffrages et l'embaras des armatures ;
- ✓ la plasticité désirée qui doit être garantie au moins une heure après le malaxage pour tenir compte des délais inévitables de transport et de mise en œuvre.

L'ouvrabilité du béton dépend de plusieurs facteurs :

- ✓ type et quantité de ciment.
- ✓ type et quantité de sable.
- ✓ teneur en eau.
- ✓ aspect et grosseur des agrégats.

La fluidité du mélange de béton croît avec l'augmentation de la quantité d'eau. Le mortier de ciment, non seulement remplit les vides et enrobe les grains des agrégats, mais les écarte également les uns des autres, en créant entre eux des couches abondantes qui diminuent le frottement entre les grains : ceci augmente la fluidité.

Si les agrégats sont plus gros, la surface spécifique est en général moindre, par conséquent, pour une même quantité de mortier de ciment, les couches intermédiaires entre les grains des agrégats se trouvent plus épaisses ce qui rend le mélange de béton plus fluide. L'augmentation de la quantité de sable au-dessus de la quantité optimale, diminue la fluidité de la pâte par suite de l'accroissement de la surface totale des agrégats. La forme des grains influe sur la fluidité, si la surface des grains est arrondie et lisse, la

surface de contact et le frottement entre eux seront plus petits donc le mélange plus fluide que le mélange formé avec des granulats concassés [22].

I.7.1.2 Porosité

Quand les silicates anhydres des grains de ciment entrent en contact avec l'eau, leur hydratation commence toujours par une mise en solution. En d'autres termes, la phase liquide se sature avec différents ions qui se combinent ensuite pour former les différents produits d'hydratation qui occupent progressivement une partie de l'espace initialement rempli d'eau.

Au fur et à mesure que l'hydratation se développe et que la taille des pores capillaires diminue, les mouvements de l'eau dans le système deviennent de plus en plus difficiles, si bien que l'hydratation des grosses particules de ciment se fait plutôt par diffusion.

Quel que soit l'instant durant la réaction d'hydratation, les espaces non remplis par des produits solides (hydrates et particules de ciment anhydre) pourront être considérés comme des vides ou des pores capillaires [23].

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 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.

L'ajout de laitier ou de cendres volantes ne modifie pas la porosité totale mais conduit à une diminution générale de la dimension des pores [24].

L'adjonction d'ultrafins et en particulier de fumée de silice se traduit par une réduction de la porosité et par une diminution caractéristique des pores.

On note que la porosité totale des BHP est inférieure à celle des bétons ordinaires. La distribution des dimensions des pores, observée sur la courbe porosimétrique des BHP se situe sous celle des bétons ordinaires Figure I.3.

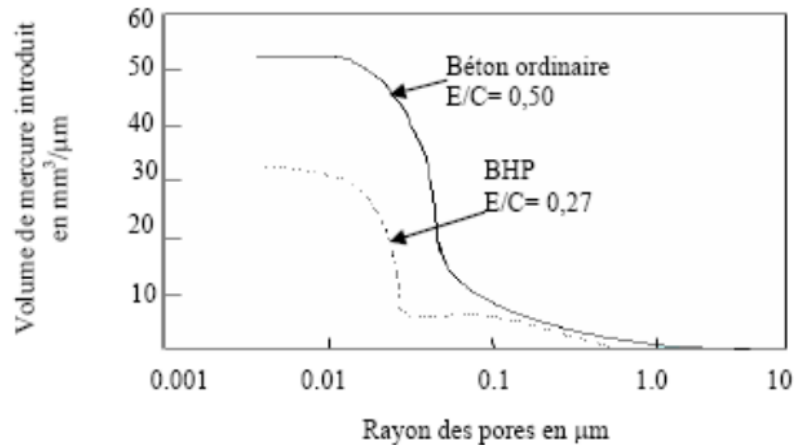


Figure I. 3 : Porosité des bétons ordinaires et des BHP [24].

Tant que les granulats et particulièrement les plus gros, sont suffisamment résistants, au fur et à mesure que la porosité de la pâte de ciment décroît, la résistance du béton augmente. Ainsi, la sélection et la composition des ingrédients d'un BHP sont beaucoup plus critiques que dans le cas des bétons usuels [24].

I.7.1.3 Perméabilité

La perméabilité est caractérisée par la valeur de débit de transport des fluides et des gaz (eau, chlorure, sulfates, oxygène...) à travers des pores capillaires et des fissures du béton. A cause de leur très grande compacité, les BHP ne sont que très peu perméables. On peut s'en rendre compte lorsqu'on brise des échantillons de béton conservés pendant un an dans l'eau, on constate que le cœur de l'éprouvette est absolument sec.

Cette imperméabilité peut s'expliquer aussi par la présence de très nombreuses particules de ciment non hydratées qui arrivent à stopper la progression de l'eau vers l'intérieur du béton tout en le rendant encore plus imperméable. Des mesures allemandes de perméabilité de mortier conduisent à des valeurs comprises entre 0,64 10-12 m/s pour $E/C = 0,40$ et à 440 10-12 m/s pour $E/C = 0,75$. Ces résultats confirment des essais américains anciens qui montraient que la perméabilité d'un béton était réduite d'un facteur égal à 1000 lorsque le rapport E/C passait de 0,80 à 0,40 [25].

La perméabilité d'un béton à faible rapport E/C est donc appréciée par la mesure du débit d'air ou d'autre gaz (oxygène, oxyde de carbone) et par celui des ions chlore transitant dans le béton sous l'effet d'un gradient de pression ou de courant.

La microstructure de la pâte de ciment hydraté du béton de 20 MPa est très ouverte et l'on peut y voir des pores, de grands cristaux d'ettringite et de portlandite $Ca(OH)_2$ avec de plus petites aiguilles de silicate de calcium hydraté.

Il est possible de voir que la zone de transition entre la pâte de ciment et les granulats est très poreuse dans le cas du béton usuel. A l'inverse, il est impossible de discerner les moindres

cristaux dans la microstructure du BHP qui a un rapport eau/liant de 0,25 ; la pâte de ciment hydraté a un aspect amorphe et est très compacte.

Cette différence de microstructure des BHP a deux conséquences très importantes du point de vue résistance à la compression et du point de vue perméabilité : la résistance à la compression d'un BHP augmente au fur et à mesure que le rapport eau/liant diminue et la perméabilité d'un BHP est considérablement plus faible, pratiquement impossible à mesurer selon Torrent et Jornet [26], sauf si l'on recourt à la mesure de la « perméabilité » dite aux ions chlore selon la norme ASTM C [27].

Un béton qui a un rapport eau/liant de 0,45 a une « perméabilité aux ions chlore » qui varie entre 3 000 et 5 000 coulombs, alors qu'elle n'est que de 100 à 500 coulombs pour un BHP qui contient de la fumée de silice et qui a un rapport eau/liant inférieur à 0,25. Cette très faible « perméabilité aux ions chlore » des BHP indique qu'il existe encore un réseau de capillaires très fins interconnectés, mais que ces capillaires sont suffisamment fins pour que l'eau ne s'y écoule pas d'elle-même.

I.7.2 Caractéristiques mécaniques

On sait très bien que la formation des silicates de calcium hydratés créés durant l'hydratation des silicates di et tricalciques soit essentiellement responsable des gains de résistance de béton.

Toutefois, il faut admettre que, à l'heure actuelle [28], la composition exacte et la structure des silicates de calcium ne sont pas très connues, ce qui explique d'ailleurs pourquoi, de façon très prudente, on représente le silicate de calcium hydraté par l'expression volontairement vague de C-H-S. Il est bon cependant de rappeler les efforts réalisés en France par les équipes du CNRS pour essayer de percer les mystères de l'hydratation et les progrès déjà obtenus par Nonat, Goudonnet et Van Damme [29].

Les phénomènes complexes liés à l'hydratation du ciment (mouvements thermiques ou retrait) provoquent la création des défauts. Dans le cas des bétons classiques, ces défauts sont particulièrement localisés dans l'auréole de transition.

Dans les BHP cette zone est inexistante [30] et, les défauts prennent naissance dans la matrice, siège des phénomènes d'hydratation. C'est à partir de ces défauts (microfissures, microcavités ...) que vont se développer les micros ruptures lors des sollicitations mécaniques.

I.7.2.1 Résistance en compression

C'est la propriété d'usage la plus importante, c'est aussi celle dont l'amélioration est plus spectaculaire : on a pu réaliser en laboratoire [31] des bétons dont la résistance à la compression dépassait 200 MPa. Cependant, si l'on cherche à fabriquer des bétons maniables avec des granulats ordinaires, on devra se limiter, dans l'état actuel de la technologie à des valeurs comprises entre 100 et 120 MPa en résistance moyenne à 28 jours.

Une explication de cette augmentation de la résistance est due au rôle accélérateur de la fumée de silice, selon la nouvelle loi de Féret [32] exprimée par :

$$f_{c28} = \frac{K_g}{1 + \frac{3.1 E/C}{1.4 - 0.4 \exp(-\frac{11.5}{C})}} \quad (I.1)$$

Où : - f_{c28} est la résistance moyenne en compression du béton à 28 jours.

- E, C et S sont le poids respectif d'eau, du ciment et de fumée de silice par mètre cube de béton.
- K_g est un paramètre qui dépend de la qualité des granulats (pour des granulats courants $K_g = 4,91$).

Résistances à la compression simple et module d'élasticité des bétons (Confectionnés avec différents types de granulats) et des mortiers, en fonction du rapport E/L [32].

Tableau I. 1 : Présente quelques résultats d'essais de compression.

Rapport E/L		Résistance à la compression (MPa)			Module d'élasticité (GPa)		
		0,50	0,27	0,22	0,50	0,27	0,22
Béton de calcaire	28j	56,2	92,1	117,2	33	42	48
	90j	69,4	111,2	126,5	36	44	52
Béton de granite	28j	59,5	100,3	127,4	32	42	45
	90j	64,1	118,3	134,5	34	43	47
Béton de quartz	28j	53,4	93,4	103,3	33	45	42
	90j	58,5	113,4	118,6	34	47	52
Béton de grès	28j	57,2	113,3	118,6	21	30	31
	90j	64,7	127,6	121,2	22	31	35
Mortier	28j	45,1	88,6	104,6	30	39	42

I.7.2.2 Résistance en traction

Comme dans le cas de la résistance à la compression, il a été établi et vérifié que la résistance en traction des BHP progressait linéairement en fonction de la compacité de la pâte de ciment durcie [31].

PE dèches [33] a montré que la résistance en traction par flexion à 28 jours avec un BHP à la fumée de silice varie entre 5 et 9 MPa. Il a montré dans la même étude que l'ensemble des points (R_c et R_t) se situait au-dessus de la courbe représentant la relation adoptée par les règlements de béton armé [34] et de béton précontraint [35] :

$$R_t = 0,6 + 0,06 R_c \quad (I.2)$$

Il a proposé la relation suivante pour des résistances en compression comprises entre 30 et 130 MPa :

$$R_t = 5,5 + 0,027 R_c \quad (I.3)$$

Ahmad et al. [42] avaient déjà proposé une relation pour des résistances en compression supérieures à 84 MPa :

$$R_t = 0,44 R_c^{2/3} \quad (I.4)$$

I.7.3 Caractéristiques élastiques

I.7.3.1 Module de d'élasticité ou module de young (e)

Il est très important de connaître avec précision le module d'élasticité des BHP si on veut étudier la déformabilité de la structure.

La Figure I.4 présente la contrainte en fonction de la déformation pour un BHP. Le module d'élasticité se définit de deux façons :

- soit en utilisant la tangente à l'origine de la courbe contrainte-déformation : c'est le module tangent. Sa détermination semble être relativement plus complexe, il correspond à une très petite déformation du matériau ;

- soit en utilisant la ligne sécante de la courbe contrainte-déformation : c'est le module sécant [36].

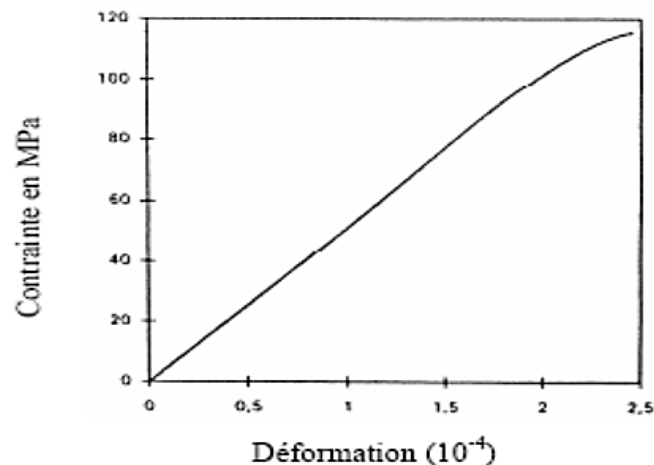


Figure I. 4 : Évolution de la courbe contrainte – déformation d'un BHP de résistance moyenne 117,5 et de module 57,5 GPa [36].

Toutefois, dans le cas des BHP, les deux modules semblent être confondus du fait de la linéarité de la courbe σ - ϵ depuis l'origine jusqu'à une certaine valeur σ_0 de σ proche de la contrainte de rupture σ_r comme le montre la Figure I.4.

Le module de Young E des BHP est, selon la raideur des granulats, de l'ordre de 45 GPa.

I.8 Facteur influençant sur le comportement mécanique du BHP

I.8.1 Influence du rapport E/C

Des années durant, la fabrication du béton n'a nécessité que des granulats, du ciment et de l'eau. Ce dernier composant remplit un double rôle :

- ✓ l'une physique qui confère au béton ses propriétés rhéologiques,
- ✓ et l'autre chimique qui contribue au développement des réactions dites d'hydratation.

En effet, pour un mélange granulaire sec, l'ajout d'eau agit tout d'abord comme un lubrifiant entre les particules qui ont le plus de facilité à glisser les unes sur les autres et à se placer de façon optimale. [37] Mais, les ciments ne le permettent pas d'une part, parce que les particules de ciment présentent de très nombreuses charges électriques superficielles non saturées et ont alors tendance à flocculer lorsqu'elles sont mises en contact avec un liquide aussi polaire que l'eau. D'autre part, la réaction d'hydratation se développe aussitôt que le ciment est mis en contact avec l'eau. Jouant une fonction rhéologique qui permet d'assurer la maniabilité du béton frais, l'idéal serait tout de même que la quantité d'eau nécessaire à la rhéologie du béton soit strictement celle nécessaire à l'hydratation du ciment. En effet, si la quantité d'eau nécessaire pour une hydratation complète est de 25 à 30 % de la masse de ciment (23% pour la stoechiométrie), près du double de cette quantité est nécessaire pour obtenir une maniabilité suffisante sans adjuvantation (47% en pratique). [38] De multiples recherches ont montré l'effet bénéfique d'une diminution du rapport E/C sur le développement des résistances mécaniques du béton.

La résistance du béton diminuera ou augmentera. Ce constat n'est pas neuf. Dès 1894, le Français René Féret avait postulé cette conclusion de manière empirique (figure I.5). L'augmentation de la résistance est cependant limitée. À partir d'un rapport eau-ciment trop faible, le béton ne peut plus être mis en œuvre. Les vides et les pores qui en résultent réduisent à nouveau la résistance, comme précisé dans l'illustration. [39]

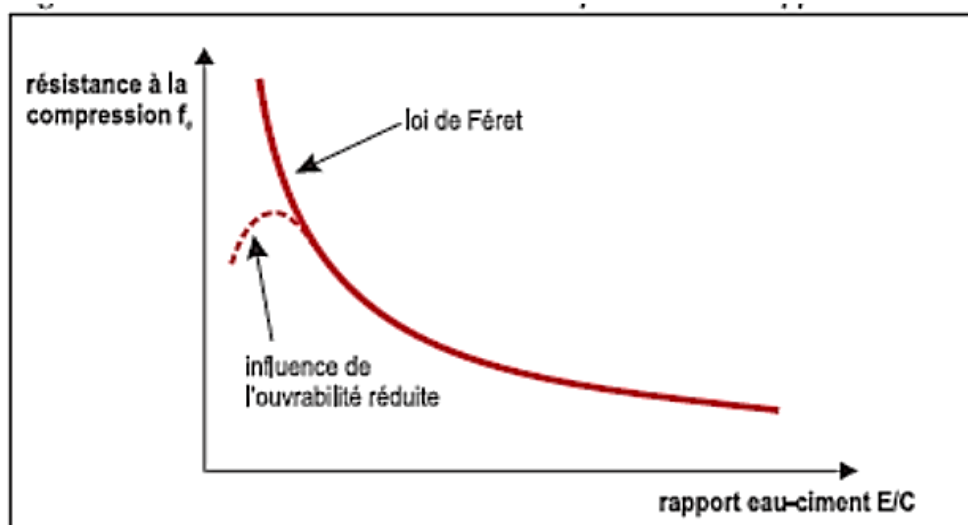


Figure I. 5 : Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C [39].

Progressivement, les chercheurs ont découvert qu'il existait également un lien entre le rapport eau ciment et la durabilité. Le volume de pores est réparti sur un réseau de vides infiniment nombreux et de formes très variables. La plupart de ces vides ou pores présentent un diamètre de 10^{-9} à 10^{-8} m – les pores de gel – et sont si petits que le transport de molécules (vapeur, gaz, etc.) en devient impossible. Ils observent cependant aussi des pores de plus grandes dimensions – les pores dit capillaires – dont le diamètre varie de 10^{-7} à 10^{-5} m. Leur quote-part dépend du rapport eau-ciment et de la façon dont le ciment est hydraté, exprimée par le taux d'hydratation. Plus le taux d'hydratation augmente, plus le ciment est hydraté, plus la quantité d'eau liée croît et, par conséquent, plus la quantité d'eau libre diminue. La (figure I.6) montre comment le volume de pores capillaires diminue en cas de baisse du rapport eau-ciment et de hausse du taux d'hydratation. L'humidité, la vapeur d'eau, les gaz et toutes sortes de substances nocives peuvent pénétrer assez facilement dans les pores capillaires, y migrer, voire détériorer le matériau de l'intérieur. La durabilité du béton augmente donc avec la réduction du volume des pores (porosité réduite, compacité accrue) et du rétrécissement des pores (réduction de la perméabilité). Il s'ensuit que le rapport eau-ciment doit être le plus faible possible. [39]

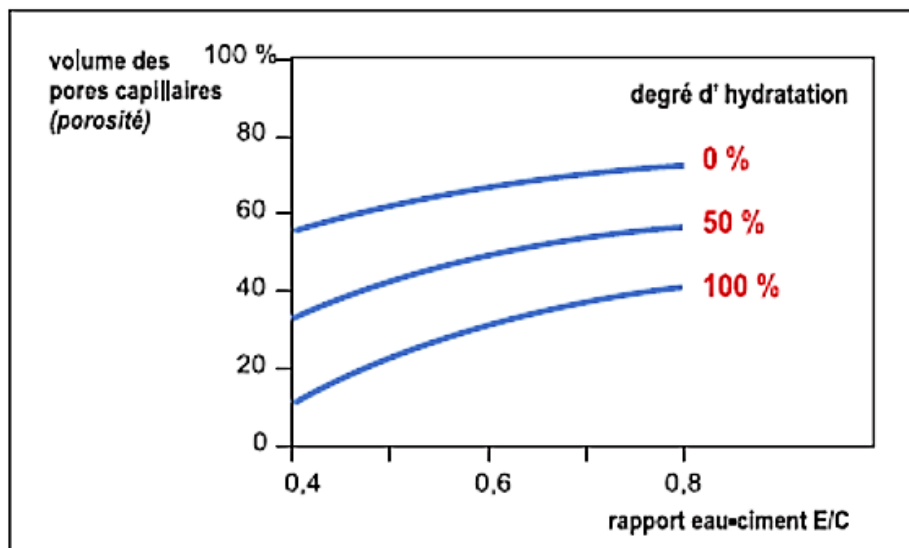


Figure I. 6 : Relation entre la porosité et le rapport E/C pour différents degrés d'hydratation [39].

I.9 Domaine d'utilisation de BHP

Le béton haute résistance (BHP), qui à une grande durabilité, assure un niveau élevé de performance structurale, par rapport au béton à résistance normale (BRN) utilisé traditionnellement. Auparavant employé pour les ponts, les constructions en mer et les infrastructures, il est de plus en plus utilisé dans les immeubles de grande hauteur, en particulier pour les poteaux. Sa plus grande résistance à la compression permet de réaliser des poteaux de diamètre réduit, ce qui diminue l'encombrement. [40]

I.10 Avantages des BHP

Le béton à hautes performances apporte en outre des avantages multiples par rapport au béton ordinaire. Parmi les avantages du BHP :

- ✓ La maniabilité est accrue sans risque de ségrégation lors de la mise en œuvre.
 - ✓ La durabilité des structures est améliorée par la forte compacité du béton avec une perméabilité à l'air et à l'eau réduite, une résistance aux agressions, et une meilleure résistance à l'alcali-réaction, une plus grande résistance à l'abrasion, une meilleure tenue aux cycles de gel/dégel.
 - ✓ la conception des structures plus minces grâce à l'augmentation des caractéristiques mécaniques (compression, traction, module d'élasticité) tant au jeune âge qu'à terme, Cependant les propriétés améliorées des bétons à hautes performances ne peuvent être obtenues que grâce à plusieurs dispositions simultanées comme :
 - ✓ les granulats qui doivent être de bonne qualité, la résistance du béton pouvant être limitée par celle des granulats eux-mêmes,
 - ✓ l'emploi d'adjuvants spécifiques, notamment des super plastifiants réducteurs d'eau ainsi que des ajouts minéraux tels que la cendre volante, le laitier du haut fourneau, la fumée de silice.... etc.,
 - ✓ l'emploi de ciments de classe élevée à des dosages compris entre 400 et 550 kg/m³.
- L'utilisation du béton à hautes performances progresse constamment dans le domaine de construction et le nombre d'édifices en béton à hautes performances ne cesse d'augmenter car les concepteurs et les maîtres d'œuvre réalisent la valeur et la durabilité de ce béton. [2]

I.11 Conclusion

Comme on peut le voir dans ce premier chapitre, une recherche bibliographique a été effectuée pour comprendre les caractéristiques physico-mécaniques le béton à haute performance le BHP possède plusieurs caractéristiques avantageuses telles que sa résistance et sa compacité. On a commencé par une généralité qui nous a permis de comprendre mieux cette nouvelle technologie, ensuite on a pu voir les différents constituants, leurs caractéristiques et les facteurs qui influent sur les performances des BHP ainsi que les avantages et les domaines d'utilisations des BHP.

CHAPITRE II

Les ajouts cimentaires et Les adjuvants

II.1 Introduction

On peut fabriquer des BHP en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant, la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts cimentaires lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance [41].

Les adjuvants fournissent au formulateur de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilité pour faciliter la mise en œuvre des bétons adapter leur fabrication au temps froid ou au temps chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés de béton durci, voire même lui conférer des propriétés nouvelles. Quel que soit l'adjuvant, les spécifications normatives visent d'abord à définir et à quantifier sa fonction, c'est-à-dire la façon dont il modifie, dans le sens sur les autres propriétés du béton.

D'autre part, on remplace une certaine quantité de ciment par des matériaux cimentaires tels que la fumée de silice, les cendres volantes ou les laitiers des hauts fourneaux. L'ajout de tels matériaux permet d'accomplir deux fonctions : l'une physique et l'autre chimique. La première fonction assure le remplissage des micros vides, de l'empilement des grains de ciment tout en améliorant la compacité du mélange. La deuxième fonction (fonction chimique) est la fixation de la portlandite produite lors de l'hydratation du ciment, pour former un composant de silicate de calcium hydraté plus dense et plus résistant que celui des bétons Ordinaires. [42]

II.2 Les ajouts cimentaires

II.2.1 Rôle granulaire des ajouts cimentaires

(Lié à leur finesse) Les ajouts cimentaires combler les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide en permettant la diminution de la quantité d'eau.

II.2.2 Rôle mécanique des ajouts cimentaires

La réflexion s'oriente vers une ou plusieurs activités d'origine physique d'une poudre chimiquement inerte. Il a été montré par calorimétrie que l'hydratation du silicate tricalcique (C3S) est plus rapide en présence de fines calcaires [43].

Dans un tel cas, le calcaire n'entre dans aucune réaction chimique, l'accélération de l'hydratation du silicate tricalcique est due à un effet physique dit de «nucléation hétérogène » : les germinations du silicate de calcium hydraté se produisent plus facilement au contact des cristaux de calcite.

Cette germination entraîne une précipitation des C-S-H et donc, une précipitation plus rapide de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Une explication semblable a été avancée pour l'accélération de l'activité des cendres volantes avant vingt-huit jours en présence de fines calcaires.

Les réactions entre le ciment et l'eau sont plus rapides en présence de poudre calcaire et donc à chaque instant, il y a davantage d'hydrates formés. Cet effet ne peut expliquer directement une «activité» significative de l'addition.

Néanmoins, il est possible, de l'expliquer d'une façon indirecte. Il faut, en effet, distinguer entre l'avancement des réactions d'hydratation du ciment (phénomène d'ordre chimique), et le développement de résistances (phénomène d'ordre physique). Ce dernier dépend évidemment de la qualité d'hydrates fournis par l'hydratation, mais aussi de la façon dont ces hydrates s'assemblent, de leur arrangement dans l'espace et de leurs liaisons.

En conséquence, la germination au contact de la surface des additions a deux conséquences :

- ✓ l'accélération de l'hydratation présentée ci-dessus.
- ✓ et la modification de l'assemblage des hydrates favorables à la résistance.

Ce deuxième effet expliquerait l'activité des additions même si, par ailleurs, elles peuvent être considérées comme chimiquement inertes.

Contrairement à ce qui se passe avec les silicates tricalciques (C3S), les additions calcaires peuvent, ne pas être chimiquement inertes quand elles sont en présence du ciment. Il peut y avoir en effet, une réaction chimique entre le carbonate de calcium et l'aluminate tricalcique, donnant un carbo-aluminate de calcium, cette réaction est facile à reproduire au laboratoire où l'on peut synthétiser le carbo-aluminate à partir de ses composants.

Une analyse détaillée, par diffraction des rayons X, de ciment hydraté en présence d'une poudre calcaire, permet souvent d'observer ce produit parmi les hydrates formés. Toutefois, on peut penser que cette réaction contribue peu, en général, à l'activité des additions calcaires.

En effet, quand elle se produit dans les ciments Portland, elle est toujours en concurrence avec une autre réaction très rapide, entre le gypse et le C3A qui a toujours lieu pour former de l'ettringite. Or le dosage en gypse est soigneusement optimisé pour réguler la prise tout en conservant la résistance normale du ciment. [43]

II.3 La fumée de silice

Également appelées « fumées de silice » ou « poussières de silice » ou encore « microsilice », les fumées de silice sont un sous-produit de l'électrometallurgie du silicium et de ses alliages. On charge un four avec du quartz, de la houille et parfois des copeaux de métal. L'ensemble est porté à une très haute température (1500-2000°C) par des arcs électriques. On obtient d'une part le silicium liquide et d'autre part des gaz chargés de poussières dont certains s'oxydent à l'air libre pour donner des fumées de silice. En tant que sous-produits industriels, leur nature ne fait l'objet d'aucun contrôle lors de sa fabrication. Leurs caractéristiques physico-chimiques peuvent être assez dispersées, non seulement d'une usine à l'autre mais encore à l'intérieur même d'une unité de fabrication : la fumée de silice est un matériau très variable [32].



Figure II. 1 : La fumée de silice

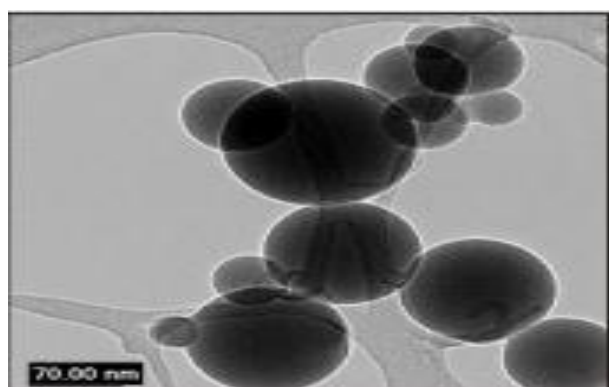


Figure II. 2 : Image au microscope électronique de la fumée de silice [44].

Images prises avec un microscope électronique en transmission (MET) de marque JEOL 2010F – Haute résolution [44]

Le mécanisme de réaction pouzzolanique de la fumée de silice peut être brièvement décrit comme la réaction de la silice avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment, en présence de l'eau. Il en résulte des C-S-H à faible rapport Ca/Si. Bien que cette réaction soit prompte et précoce, elle est limitée par la quantité d'eau dans les BHP.

A 7 jours, les performances atteintes sont très significatives par rapport à 28 jours. Il a été montré que 10% de fumée de silice par rapport à la masse de ciment permettent d'obtenir un béton à haute résistance mécanique et une bonne durabilité aux agressions chimiques lorsque des dosages en superplastifiant sont optimisés [45].

Wild et al. [46] précisent que les résistances encore beaucoup plus élevées sont atteintes à partir de 28% de fumée de silice (par rapport à la masse de ciment). Cependant, ce dosage conduit à des dépenses excessives et ce genre de béton est difficile à mettre en œuvre.

Les performances offertes par la fumée [47- 48-49] constituent un atout pour son utilisation dans les BHP avec pour but l'obtention d'un matériau de bonne ouvrabilité, de résistance mécanique élevée et une bonne durabilité grâce à une réduction du dosage en eau.

Cependant, l'aspect négatif de la fumée de silice dans les BHP est que la réduction de la chaux réduit le pH dans les pores et par conséquent peut réduire la faculté de dépoissivation des armatures.

II.3.1 Principe de fabrication

La fumée de silice est obtenue pendant la production du silicium et des alliages de Ferro silicium. Ces produits sont fabriqués dans un four à arc, en réduisant le quartz par un apport approprié de carbone, à une température d'environ 2 000 °C. La fumée de silice est extraite en surface du four de réduction par des ventilateurs principaux et résulte de la condensation du gaz SiO , intermédiaire réactionnel du procédé de carbo réduction. Elle est ensuite récupérée et filtrée dans un filtre à manches, avant d'être densifiée pour en faciliter la manipulation. Certaines impuretés contenues dans les matières premières (alcalins par exemple) sont également réduites, volatilisées et oxydées dans le four. [44]

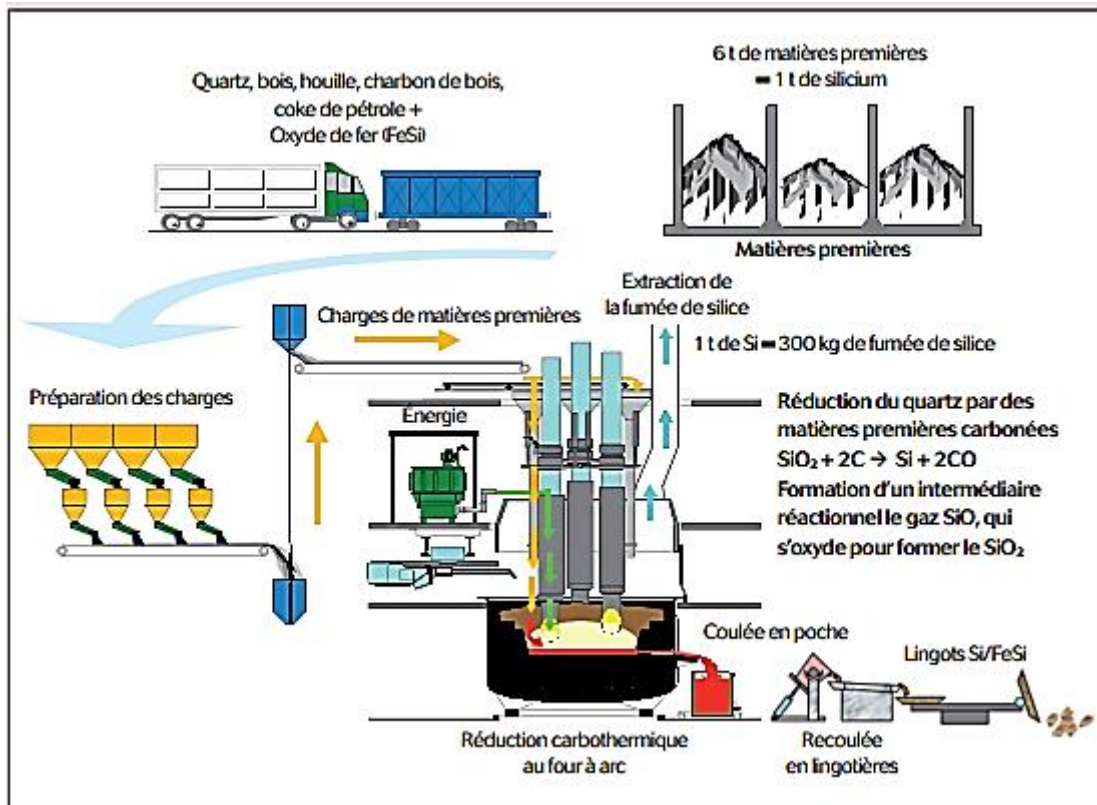


Figure II. 3 : Flux dans une usine de fabrication de silicium et d'alliages de ferrosilicium et principe de production de la fumée de silice

Les caractéristiques de la fumée de silice dépendent de plusieurs facteurs. Le type de production en four à arc (Si ou FeSi) peut par exemple influencer sur la teneur en SiO_2 et les différentes impuretés de la fumée de silice. Le mélange de réducteurs utilisé dans le four peut, quant à lui, conduire à des colorations différentes du produit (de gris clair à gris foncé), sans pour autant en changer les performances. Enfin, la dernière étape de densification permet d'ajuster la densité apparente du produit. [44]

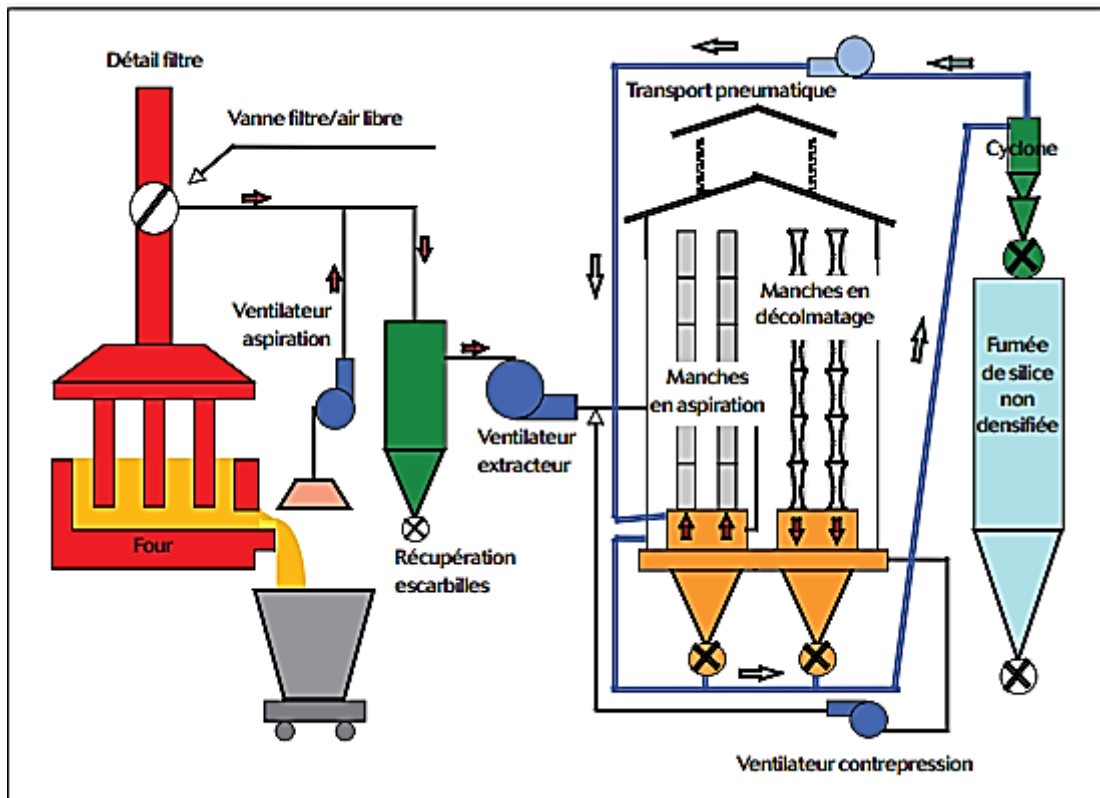


Figure II. 4 : Extraction et filtration de la fumée de silice dans un filtre à manches

II.3.2 les différents aspects d'une fumée de silice

La fumée de silice non densifiée (ND) a une densité apparente faible, ce qui rend sa manipulation difficile. Par un traitement de densification, il est possible d'augmenter sa densité apparente et ainsi faciliter son transport, son stockage et sa manipulation. La densité apparente dépend du mode de densification qui peut être mécanique (DM) ou pneumatique (DP). Elle est généralement comprise entre 400 et 650 kg/m³. En augmentant la densité du produit, on améliore la coulabilité et la manipulation du produit, mais on diminue sa capacité à se disperser dans l'eau. L'utilisateur doit donc trouver un compromis entre la manipulation et la dispersion potentielle du produit. La densification ne change pas les propriétés physico-chimiques du produit. La fumée de silice est aussi disponible sous une forme prête à l'emploi : le slurry, suspension aqueuse avec environ 50 % en masse de fumée de silice. Le slurry est un produit stable dans le temps, avec une basse viscosité et donc facile à pomper et à utiliser. Son procédé de fabrication conduit à un produit très finement dispersé dans l'eau et donc dans le béton lors du malaxage. [44]

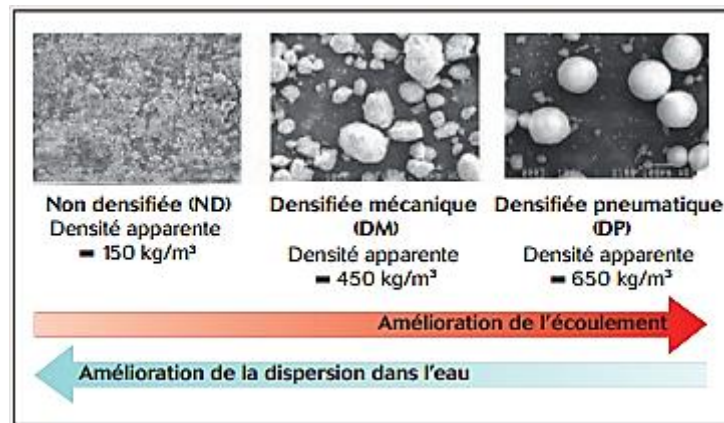


Figure II. 5: Morphologie et influence sur les propriétés.

II.3.3 Les avantages de la fumée de silice

II.3.3.1 Bétons à l'état frais [50]

- Réduction de :
 - ✓ La ségrégation
 - ✓ La chaleur d'hydratation
 - ✓ L'exsudation
- Amélioration de:
 - ✓ L'adhésion
 - ✓ La cohésion

II.3.3.2 Bétons à l'état durci [50]

- Amélioration des résistances mécaniques
- Amélioration significative de:
 - ✓ La résistance aux attaques chimiques, aux sulfates, aux chlorures
 - ✓ La corrosion des armatures
 - ✓ La résistance aux cycles de gel/dégel
- Réduction significative de:
 - ✓ Porosité et perméabilité
 - ✓ Carbonatation
 - ✓ Résistance à l'abrasion
- Prévention du risque:
 - ✓ D'alcali-réaction
- Homogénéisation de la teinte des parements. [50]

II.4 Le laitier

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans le haut fourneau à partir de minerai de fer (les oxydes FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄ en proportions variables), de coke et éventuellement d'un fondant. On le recueille liquide vers 1550°C au-dessus de la fonte (gravitation de la fonte en fusion).

II.4.1 Différents types de laitiers

II.4.1.1 Le laitier vitrifié

- ✓ Obtenu par refroidissement brutal (trempe). le refroidissement brutal par l'eau sous pression (granulation) donne *le* laitier granulé, qui est un sable de granulométrie 0/5 mm.
- ✓ le refroidissement brutal à l'eau et dans l'air (bouletage) donne *le* laitier bouleté, de granulométrie 0/20 mm environ.

Le laitier vitrifié, granulé ou bouleté est un produit hydraulique, c'est à dire susceptible de donner par activation basique, des produits d'hydratation stables. Il a des propriétés hydrauliques dites latentes. Le laitier expansé éventuellement obtenu par refroidissement dans l'eau ou la vapeur d'eau sous pression, peut être utilisé comme granulat léger. Il présente un aspect alvéolaire rappelant la ponce. Par refroidissement rapide à l'air comprimé, on peut effiler le laitier sous forme de fibres très fines. *La laine de laitier* ainsi obtenue est utilisée comme isolant thermique. [51- 52]

II.4.1.2 Le laitier cristallisé

Obtenu par refroidissement lent à l'air. C'est une roche dure anguleuse et frottante qui, après concassage et criblage, est utilisé comme granulat dans le béton, les matériaux d'assises de chaussées, les enrobés bitumineux, les remblais... etc. [51- 52]

II.5 La pouzzolane

Les pouzzolanes peuvent être définies comme des matériaux ayant une aptitude à réagir avec la chaux en présence d'eau et à former des composés possédant des propriétés liantes. Elles sont formées d'éléments surtout vitreux (peu d'éléments cristallisés comme la zéolite). Mais elles peuvent contenir des constituants nocifs tels que : les substances organiques et les argiles gonflantes [53 - 54].

II.5.1 Différents types de pouzzolanes

Selon leur origine, les pouzzolanes sont classées en deux catégories :

II.5.1.1 Les pouzzolanes naturelles

Produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer et ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. - soit d'origine volcanique : verre volcanique, pierre ponce, trasse, tuf, vitrophyres. - soit d'origine sédimentaire : diatomite, tripolis, gaize.

II.5.1.2 Les pouzzolanes artificielles

Toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer [51- 54] :

- roches traitées thermiquement : argile et schiste expansés. - cendres volantes, laitier métallurgique.

II.6 Le calcaire

Dreux G. [53] a défini les fillers comme étant des produits obtenus par *broyage fin* ou par *pulvérisation* de certaines roches (calcaire, basalte...) naturelles, agissant principalement, grâce à une granularité appropriée, par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment (accroissement de maniabilité, diminution de perméabilité et de capillarité, réduction de la fissurabilité...). Les fillers sont dits inertes, s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau. Les normes s'accordent pour définir comme « *fines* » les éléments passant à travers un tamis de 80 μ m. On adopte aussi le terme « *filler* » pour désigner les éléments bruts de concassage inférieurs à 80 μ m. Il s'agit donc de produits fins obtenus par fragmentation pouvant d'ailleurs contenir des éléments de pollution [54- 56].

II.6.1 Différents types de calcaires

- Les fillers calcaires sont [57] :
- ✓ Soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et contiennent alors des résidus argileux et des matières organiques.
- ✓ Soit obtenus par broyage du matériau cru.
- Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes :
- ✓ origine métamorphique, il s'agit des marbres.
- ✓ origine sédimentaire.

Le calcaire se compose principalement de carbonate de calcium CaCO₃ (56,03 % de CaO et 43,97 % de CO₂). Le carbonate de calcium existe sous plusieurs formes polymorphiques : calcite, aragonite et vaterite, [50]. Le calcaire peut contenir aussi SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ou le minéral accessoire qui est la dolomite CaMg (CO₃)₂ [54,27% CaCO₃ et 45,73% MgCO₃ ou 30,41% MgO et 47,72% CaO]. Le calcaire dolomitique contient un mélange de dolomite et de calcite, tandis que la dolomie ne contient que de la dolomite.

II.7 Les adjuvants

Dès les origines de la fabrication du béton de ciment portland, on a commencé les recherches sur l'incorporation de produit susceptible d'améliorer certaines propriétés. À partir de 1930 [58], les entraîneurs d'air sont fréquemment utilisés, ils seront suivis par les antigels et les produits de cure. Depuis 1960 [59], avec le développement du béton manufacturé et du béton prêt à l'emploi.

Le développement des normes d'adjuvants, à partir 1984 [60] à la mise en place d'une certification par la marque NF adjuvants, véritable label de qualité. Il faut enfin préciser que les adjuvants ont permis des progrès considérables en matière de bétons

II.7.1 Définition

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités afin d'en améliorer certaines propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition

dans la matrice du béton. La quantité d'adjuvant utilisée pour n'importe quel mélange doit être soigneusement contrôlée **Melle D. boucherit**.

II.7.2 Classification des adjuvants selon leurs efficacités

II.7.2.1 Les adjuvants ouvrabilité

a Adjuvants plastifiants

a.1 Définition

Ces adjuvants ont pour fonction principale, à teneur en eau, d'augmenter l'ouvrabilité du béton, du mortier ou du coulis, sans en diminuer les résistances mécaniques. Les plastifiants jouent sur la viscosité de la pâte de ciment en défoulent les grains, diminuent les frottements inters granulaires, et modifient les charges électriques de surface. L'amélioration de la plastification des bétons et de leur stabilité (diminution du risque de ségrégation), facilite la mise en place, tout en n'alternant pas les résistances. [61]

a.2 Description des adjuvants plastifiants

Les plastifiants réducteurs d'eau sont des produits qui viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment et provoquent une défloculation des grains de ce dernier. Ce processus permet, soit une amélioration de la maniabilité sans augmenter le dosage en eau, soit une réduction du rapport eau/ciment conduisant à une augmentation des résistances mécaniques. À même dosage, leur effet dépend de la réactivité du ciment, des ions en solution dans l'eau interstitielle du béton, de la durée de malaxage et du moment plus ou moins tardif de leur introduction [62].

Les plastifiants réducteurs d'eau peuvent être classés d'après leur nature chimique et on trouve les réducteurs d'eau à base de lignosulfonates (**LS**). [62]

a.2.1 Lignosulfonates

Les lignosulfonates possèdent les groupes fonctionnels suivants : des hydroxyles primaires et secondaires, des phényl-hydroxyles, des groupes carbonyles et des groupes sulfonates. [63].

a.3 Mécanismes d'action des adjuvants plastifiants

Les grains de ciment en contact avec l'eau ont tendance à s'agglomérer sous forme d'amas ayant une structure en château de cartes, c'est la floculation. Ce phénomène est lié à la présence de charges électriques sur la surface des grains qui tend à piéger un certain volume d'eau à l'intérieur des floes et empêcher l'eau d'hydrater certaines parties des surfaces des grains de ciment [64]

Les adjuvants réducteurs d'eau augmentent la surface des grains de ciment qui engendre l'hydratation initiale, ainsi que la quantité d'eau disponible pour l'hydratation.

De plus, les charges électrostatiques sont à l'origine du développement autour de chaque grain, d'une gaine formée de molécules d'eau orientées qui empêchent le rapprochement des grains les uns vers les autres et qui ont alors une plus grande mobilité et l'eau libérée du système floculé devient disponible pour lubrifier le béton et fait croître sa maniabilité [65] [61]

a.4 Domaines d'utilisation les adjuvants plastifiants [66]

Les plastifiants sont utilisés dans les cas suivants :

- ✓ Béton pour dallages (béton pompé).
- ✓ Béton maigre (blocs manufacturés)
- ✓ Béton très ferrailé. Les plastifiants sont utilisés dans les cas suivants :

b. Adjuvants superplastifiants

b.1 Définition

Un adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau est un adjuvant qui, sans modifier la consistance, permet de réduire fortement la teneur en eau d'un béton donné, en augmente considérablement l'affaissement/l'étalement. [67]

b.2 Description des adjuvants superplastifiants

Les superplastifiants hauts réducteurs d'eau sont des polymères de synthèse fabriqués spécialement pour l'industrie du béton. Ils sont à base de sels de sodium ou de calcium de polynaphtalène sulfoné (**PNS**), polymère avec des fonctions polycarboxylate polyoxéthylène (**PCP**), de sel de sodium de poly-mélatamine sulfoné(**PMS**). [68]

b.2.1 Polynaphtalène sulfonâtes(PNS)

Le **PNS** est un polymère composé d'un aldéhyde et de naphtalène sulfoné, sont d'une efficacité dispersante très liée à la nature du ciment [68]

b.2.2 Polymélatamine sulfonâtes(PMS)

Le **PMS** est une polymélatamine sulfonate effectué à partir de la mélatamine, du forma aldéhyde [69]

b.2.3 Polycarboxylate polyoxéthylène (PCP)

Le **PCP** est un polymère dont le mécanisme de dispersion se fait par une répulsion combinée d'effets électrostatiques. Le groupement fonctionnel est formé d'acides métacryliques ou acryliques [70].

b.3 Mécanismes d'action des adjuvants superplastifiants

Lorsque les molécules organiques des superplastifiants sont introduites dans une suspension d'un matériau cimentaire, une grande partie d'entre elles vient se fixer à la surface des particules de ciment (adsorption).

Ces dernières réduisent les forces attractives d'interactions inters particulaires, qui existe entre les atomes des différentes particules [71]

Les adjuvants superplastifiants, par leur effet physique modifiant les forces inter particulaires, peuvent intervenir dans les processus chimiques de l'hydratation et notamment de la nucléation et la croissance cristalline [72]

b.4 Domaines d'utilisation les adjuvants superplastifiants [73]

Les superplastifiants sont utilisés dans les cas suivants :

- ✓ Bétons à compacité, et donc durabilité.
- ✓ Bétons à haute performance.
- ✓ Bétons autoplaçants.

II.7.2.2 Les adjuvants entraîneurs d'air

a. Définition

Ce produit entraîne et stabilise un nombre élevé de bulles d'air petites et séparées, réparties uniformément dans la masse. Il peut améliorer l'ouvrabilité et la cohésion des mélanges frais. [74]

b. Description des adjuvants entraîneurs d'air

De nombreuses molécules de surfactants pourraient être utilisées dans la formule des agents entraîneurs d'air. Dans la pratique, seules quelques molécules sont, en fil utilisé [75]

- ✓ Oléte de Sodium.
- ✓ Alkyl-Arylsulfonates de Sodium.
- ✓ Podécylsulfate de Sodium.

En l'absence d'agents entraîneurs d'air, un béton courant contient toujours un certain nombre de bulles d'air dont le diamètre est presque toujours supérieur à un millimètre.

c. Mécanismes d'action des adjuvants entraîneurs d'air

Les bulles d'air sont créées par cisaillement lors du malaxage des bétons mais, en l'absence d'adjuvant. Le rôle des entraîneurs d'air n'est donc pas de créer les bulles mais de les stabiliser [76]

Les molécules des produits entraîneurs d'air sont tensio-actives, elles portent, en général, un radical hydrophile et un radical hydrophobe de sorte que leur position d'équilibre est à l'interface de l'eau et de l'air [77]

Dans certains cas, les molécules réagissent avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, formant un précipité insoluble. La façon dont un réseau de bulles d'air assure la résistance d'un béton au gel [78]

d. Domaine d'utilisation les adjuvants entraîneurs d'air [79]

Les adjuvants entraîneurs d'air sont utilisés dans les cas suivants :

- ✓ Les routes.
- ✓ Les barrages.
- ✓ Les ponts.
- ✓ Les travaux maritimes.
- ✓ Les travaux en montagne.
- ✓ Les ouvrages exposés au gel et à l'action des eaux agressives.

II.7.2.3 Les adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement

a. Définition

Ce produit accélère le développement des résistances initiales des bétons. La durée de prise est fréquemment raccourcie à un délai compatible avec la mise en œuvre [80]

b. Description des adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement

Le chlorure de calcium (CaCl_2) demeure sans contestation, l'accélérateur de prise et de durcissement le plus puissant, le plus économique [81]

Cependant, en matière d'accélération du durcissement du béton, on oublie trop souvent que l'on peut obtenir des gains de résistance substantiels à très brève échéance, dix-huit à vingt – quatre heures, en diminuant le rapport (E/C) du béton .Il est en effet, tout à fait possible d'obtenir des résistances supérieures à 20 MPa en moins de dix-huit heures sans chauffer le béton [82]

c. Mécanismes d'action des adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement

Les accélérateurs de prise et de durcissement sont, en général, des sels minéraux le chlorure de calcium. On n'admet généralement que le chlorure de calcium favorise la croissance du silicate de calcium hydraté. Les ions sont susceptibles d'avoir un effet sur la vitesse de prise du ciment par précipitation d'une nouvelle phase ; ce sont des hydroxydes ou des sels basiques de magnésium, de zinc, de plomb ou des sels peu solubles de calcium, sulfate, carbonate [83]

Les sels de magnésium ont un effet accélérateur semblable à celui des sels de calcium. Les carbonates peuvent provoquer une prise très rapide ou bien la retarder suivant la concentration à laquelle ils sont ajoutés. Ces produits ne sont pas utilisés en pratique car leur action est difficile à maîtriser.

d. Domaine d'utilisation les adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement [84]

Les accélérateurs de prise trouvent leur utilisation dans :

- ✓ Décoffrage rapide (réduction du temps de prise).
- ✓ Bétonnage par temps froid.
- ✓ Mise du béton hors- gel.
- ✓ En préfabrication : augmentation de la rotation des coffrages.
- ✓ Travaux d'étanchement, travaux à la mer (entre deux marées).
- ✓ Réparations rapides, remises en circulation rapide des routes.

II.7.2.4 Les adjuvants retardateurs de prise

a. Définition

Ce produit accroît le temps de passage entre l'état plastique et l'état solide, sans influencer notablement le développement ultérieur des résistances, souvent supérieures aux résistances du témoin au-delà de 28 jours, et même dans un délai plus court. Le début de prise correspond au moment où l'on constate une brusque augmentation de la viscosité de la pâte puis son échauffement. La fin de prise correspond au moment où la pâte devient totalement rigide. [85]

b. Description des adjuvants retardateurs de prise

Même si l'on sait qu'un certain nombre de sels minéraux comme le métaborate ($\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_4$) et le tétraborate de sodium ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), le sulfate d'étain (SnSO_4), l'acétate de plomb $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$, le monophosphate de calcium ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$), retardent la prise et le durcissement du béton, on ne les utilise guère de nos jours dans la formulation des retardateurs. On préfère utiliser des molécules organiques appartenant à la famille des sucres [86]

Parmi les retardateurs les plus couramment utilisés, le gluconate de sodium. Ces produits entrent aussi couramment dans la formulation des réducteurs d'eau, et des superplastifiants commerciaux de façon à contrecarrer l'effet des réducteurs d'eau, sur la consistance des bétons [87].

c. Mécanismes d'action des adjuvants retardateurs de prise

Les retardateurs sont généralement des molécules organiques comme les sucres, les sels d'acides hydroxycarboxyliques et les lignosulfonates. Il semble que leur pouvoir retardateur soit lié à la propriété de complexation des ions Ca^{2+} . Il suppose que les molécules de l'adjuvant complexent les ions Ca^{2+} de la surface des germes d'hydrates (de sorte que leur croissance qui procède par la condensation des ions silicate sur ces ions Ca^{2+} [88]

d. Domaine d'utilisation les adjuvants retardateurs de prise [89]

Les retardateurs de prise sont utilisés pour :

- ✓ Les bétons mis en place sur de fortes épaisseurs (ouvrages d'art, barrages..).
- ✓ Tout bétonnage par temps chaud.
- ✓ Transports de béton sur de longues distances.
- ✓ Bétons injectés en continu.
- ✓ Parois moulées dans le sol.
- ✓ Reprises de bétonnage (pour coulages effectués par tranches décalées de plusieurs heures).
- ✓ Mortiers stabilisés utilisables plusieurs jours sur chantier.

II.8 Conclusion

Ce chapitre est consacré aux ajouts cimentaires et les adjuvants, en premier lieu on a cité et détaillé les différents ajouts cimentaires utilisés de nos jours dans la confection du béton, leurs différentes caractéristiques ont été exposées.

Dans notre cas on a utilisé pour la confection de notre béton la fumée de silice, de ce fait on a expliqué les étapes de fabrication, les différents types et les avantages de la fumée de silice. La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée aux adjuvants. On a commencé par exposer les différents adjuvants connus avec leurs définitions, ensuite on a donné une classification des adjuvants selon leur efficacité, finalement on a expliqué le mécanisme d'action des différents adjuvants.

CHAPITRE III

Essais

Non

Destructifs

III.1 Introduction

La méthode normalisée utilisée pour évaluer la qualité du béton dans les bâtiments ou les ouvrages comprend les essais de résistance à la compression, à la flexion et à la traction effectués sur des éprouvettes coulées au même moment. Les principaux désavantages de cette méthode sont que les résultats ne sont pas obtenus immédiatement; le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage car le cure ou le compactage peuvent être différents; ainsi que les propriétés de résistance d'une éprouvette de béton dépendent de sa grosseur et de sa forme. [90]

Afin de contourner les inconvénients des méthodes destructives, une gamme d'essais in-situ, appelés essais non destructifs, a été développée, étant entendu que la structure peut être contrôlée sans toutefois modifier, ni sa performance ni son apparence. [91]

Ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des méthodes non destructives. Ces propriétés physiques du béton comprennent la dureté, la résistance à la pénétration des projectiles, la capacité de rebondissement et la capacité de transmettre les impulsions ultrasoniques et les rayons X et gamma. [90]

Dans notre travail, en va essayer d'établir des corrélations entre la résistance à la compression et les résultats des essais d'ultrason et scléromètre, ainsi que la caractérisation de quelques propriétés mécaniques et physique du béton.

III.2 Essais non destructifs du béton

III.2.1 Définition

Les essais non destructifs (END) représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées aux structures de bâtiments, ouvrage d'art ou de génie civil. Comme leur nom l'indique il s'agit de mesures n'endommageant pas les constructions. Etant entendu que quelques désordres mineurs peuvent être apportés à la structure sans toutefois modifier ni sa performance ni son apparence. Une importante caractéristique des essais non destructifs est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre les changements des propriétés du béton dans le temps. Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction. La signification de ces essais se développera considérablement à l'avenir, parce que sa technologie de mesure automatisée et la réduction de la taille de l'appareillage de mesure ouvriront des applications entièrement nouvelles. [92]

III.2.2 Domaines d'application [92]

- ✓ Détecter, Positionner, Identifier, Dimensionner les défauts dans les pièces, les structures ou les assemblages.
- ✓ Mesurer de façon indirecte des caractéristiques des matériaux :
- ✓ La résistance
- ✓ L'homogénéité

- ✓ La porosité
- ✓ La durabilité

III.2.3 But d'utilisation

Ces essais sont rapides et légers 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. [92]

III.3 Méthodes d'essais

III.3.1 Définition

Il existe deux genres 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, desquels, une estimation de la résistance peut être obtenue. Ces méthodes incluent les tests tel que :

- ✓ Méthode de dureté superficielle ou essai au scléromètre,
- ✓ Méthode de pénétration,
- ✓ Méthode ultra son,
- ✓ Méthode par carottage.

Les seconds types de tests sont ceux qui mesurent quelques propriétés de résistance, à partir desquels on peut faire une estimation de résistance du béton. Ces méthodes englobent des tests tels que l'essai d'arrachement. [92]

Pour la méthode combinée le plus utilisable c'est la combinaison entre l'essai ou scléromètre et ultrason alors on va donner on détaille ces deux méthodes.

III.3.2 Principales méthodes

L'utilisation de méthodes dites non destructives applicables in situ est primordiale dans les cas où il est impossible de prélever un échantillon sur la structure, ou si l'on souhaite suivre l'évolution d'une caractéristique au cours du temps. Les principales techniques d'auscultation du béton couramment utilisées en génie civil sont présentées ci-après. [93]

a. Mesures semi destructives

Une série de méthodes permet d'évaluer in situ la résistance mécanique en surface du béton. Leur utilisation est assez répandue et est normalisée (norme européenne EN 13791).

Des scléromètres permettent de mesurer la dureté de la surface de béton. La hauteur de rebond d'une masse projetée avec une certaine vitesse sur la surface du béton permet de remonter à la résistance en surface du béton. Cet appareil ne donne qu'une information locale sur les propriétés du béton. [94]

D'autres méthodes telles que les essais de résistance à la pénétration (sonde Windsor) ou des essais d'arrachements d'une tige métallique scellée dans le béton (pull-out) fournissent également des informations locales sur la résistance à la compression du béton en surface. Ces méthodes sont partiellement destructrices car elles laissent des impacts et des trous dans le parement que l'on peut reboucher facilement. [94]

Ces méthodes sont couramment utilisées sur les ouvrages et peuvent donner des informations très utiles aux maîtres d'œuvres. Cependant, la précision reste faible et l'information n'est que locale. [94]

b. Mesures non destructives « utilisant la propagation d'ondes »

Les méthodes utilisant la propagation d'ondes et l'interaction de ces ondes avec le béton sont parmi les méthodes ayant le plus grand potentiel pour l'évaluation non destructive du béton. En effet, les propriétés de la propagation des ondes sont directement liées aux propriétés du matériau dans lequel elles se propagent. Ces ondes peuvent être de type électromagnétique ou mécanique et sont sensibles à des propriétés différentes du béton. Elles peuvent être utilisées pour obtenir des informations à différentes échelles (millimétrique, centimétrique, ou de l'ordre de la dizaine de centimètres) en fonction de la longueur d'onde utilisée. [94]

Les méthodes utilisant la propagation d'ondes électromagnétiques sont les méthodes capacitatives, résistives, ou les méthodes GPR (Ground Penetration Radar). Les ondes électromagnétiques à basse fréquence peuvent être utilisées pour détecter des éléments métalliques, et permettre de localiser les armatures d'acier et d'en estimer le diamètre, ou la profondeur. Les gaines métalliques des câbles de précontraintes peuvent également être localisées, ou encore la présence des vides de grandes dimensions dans le béton (phénomène de « nid de cailloux ». Ces ondes sont sensibles aux constantes diélectriques du milieu, et peuvent être utilisées à plus hautes fréquences pour remonter, après étalonnage, à la teneur en eau. [94]

Les méthodes utilisant des ondes mécaniques se basent sur la propagation d'ultrasons dans le béton. Ces ondes sont sensibles aux propriétés mécaniques telles que les modules d'élasticité et le coefficient de Poisson, ou encore le taux de porosité. Les méthodes les plus couramment employées à ce jour sont l'impact écho, l'auscultation sonique « pulse velocity » et l'émission acoustique. On peut également citer les méthodes basées sur la tomographie sismique ou les ondes de surface mais qui sont moins utilisées. Les ondes acoustiques peuvent être employées pour détecter des fissures, des vides, ou mesurer des épaisseurs. Les caractéristiques mécaniques du béton peuvent également être évaluées après étalonnage.

Ces deux familles de méthodes fournissent des informations complémentaires mais néanmoins corrélées. La suite de ce travail porte uniquement sur la propagation des ondes mécaniques dans le béton. [93]

Dans notre étude, on s'intéresse que des essais d'ultrason et scléromètre afin de pouvoir caractériser notre béton et établir des corrélations entre les résultats obtenus par ces essais et la résistance à la compression.

III.4 Avantages et inconvénients des essais non destructifs

Les essais non destructifs nous apportent plusieurs bénéfices et satisfaction, d'un point de vue de rapidité d'où en peut obtention des résultats dans quelques instants sur l'état de santé, des performances mécaniques ou des propriétés physiques d'une structure déjà existante. Un autre avantage réside dans le fait que ces méthodes nous permettent d'effectuer un nombre d'essais pratiquement infinis sur un même échantillon et de ce fait, économisé du matériau testé, ce qui rend ces méthodes plus économique et moins coûteuse à celles destructives.

Le désavantage essentiel de ces essais non destructifs est que les résultats obtenues ne sont pas à 100% fiables, car plusieurs facteurs influent ces derniers tel que la composition du béton et ces constituants, l'état de la surface testée, la façon de la mesure, la présence ou non des armatures, l'humidité et autres. [91]

III.5 Essai d'auscultation dynamique

III.5.1 Définition

Connu depuis longtemps cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton. [92]

III.5.2 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.

Les principales caractéristiques de tous les appareils comprennent un générateur d'impulsions et un récepteur d'impulsions. Photo I.9 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.

Les normes ASTM C 97-83 (réapprouvée en 1991) et BS 1881 : partie 203 :1986 décrivent la méthode d'essai. En France, les normes P 18-414 de 1993 et P 18-418 de 1989 spécifient les méthodologies des différentes méthodes. La vitesse de propagation des ondes dans le béton est liée essentiellement à la masse volumique et le coefficient dynamique du béton comme l'indique l'équation suivante dans les normes en vigueur ;

$$V^2 = \frac{Ed.(1-\nu)}{\rho.(1+\nu).\nu} \quad (\text{III.1})$$

Où :

Ed : est le module d'élasticité dynamique du béton

ρ : est la masse volumique du béton

ν : est le coefficient de poisson

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonique et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variables tel que l'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 représente un désavantage majeurs des essais non destructifs dans lequel la propriété du béton que l'on mesure est affecté 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 utilisé comme une technique additionnelle, quand elle sera exécutée avec des essais de carottage.

À 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 Sturup, Vecchio et Caratin (1984).

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

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

2- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs. Les matériaux d'interposition sont la vaseline de commerce, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

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

4- La présence d'acier d'armature dans le béton en particulier l'armature qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de la vitesse Bungey (1989). Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion. [92]



Figure III. 1 : Appareil d'auscultation sonore 58-E48 avec oscilloscope. [92]

III.5.2 Principe de l'essai

On produit un train d'impulsion de vibration au moyen d'un émetteur appliqué sur l'une des faces de l'élément de béton à contrôler. Après avoir passé une longueur de parcours (L) dans le béton, l'impulsion de vibration est convertie en un signal électrique à l'aide d'un récepteur et la base de temps électronique permet de mesurer le temps de propagation des ondes ultrasonores (T). [91]

III.6 La vitesse de propagation de l'ultrason

Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité. Leslie et Cheesman (1949) ont donné une relation générale entre la qualité du béton et la vitesse de diffusion des impulsions cette relation est décrite au tableau III.1. [92]

La vitesse de propagation des ultrasons est donnée par la formule :

$$V = L/T \quad (III.2)$$

Tableau III. 1 : Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions selon Leslie et Cheesman (1949). [92]

Qualité	Qualité Vitesse de propagation des impulsions, pi/s
Excellente	Excellente supérieure à 15 000
Bonne	12 000-15 000
Douteuse	Douteuse 10 000-12 000
Mauvaise	7 000-10 000
Très mauvaise	Très mauvaise inférieure à 7 000

Beaucoup des interprétations des résultats de mesures aux ultrasons sont données dans la littérature. Par exemple Les résultats obtenus en appliquant la courbe de la RILEM sont donnés dans le cas où le béton testé est considéré comme homogène, isotrope et élastique et les

résistances ne correspondent pas toujours à la résistance réelle du béton in situ. Ces résistances ne sont utilisées par l'ingénieur que pour donner un avis qualitatif du béton in situ. Selon le chercheur allemand Wesche

- $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$ 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.

D'autres appréciations peuvent être apportées telles que celles tirée des recommandations canadiennes données ci-dessous :

- $V < 2134 \text{ m/s}$ très mauvaise qualité
- $2134 \text{ m/s} \leq V < 3048 \text{ m/s}$ mauvaise qualité
- $3048 \text{ m/s} \leq V < 3658 \text{ m/s}$ douteuse
- $3658 \text{ m/s} \leq V < 4572 \text{ m/s}$ bonne
- $V \geq 4572 \text{ m/s}$ excellente

Il est possible d'obtenir une assez bonne corrélation entre la résistance d'une éprouvette cubique à la compression et la vitesse de diffusion d'une impulsion. Plusieurs expressions de corrélation ont données par différents chercheurs présentés dans le tableau III.2.[92]

Tableau III. 2: Expressions des autres auteurs pour la corrélation de f_c et V . [92]

Auteur	Expression f_c (Mpa)	f_c (Mpa)	Moule	Type d'agrégats	Note
Ravindrajah et al (1988)	$f_c = 0,060 e^{1.44v}$	15.0 à 75.0	Cube 100mm	Granite ($D_{\max}=20\text{mm}$)	-
Almeida (1993)	$f_c = 0,0133v^{5543}$ $f_c = 0,011v^{5654}$	40.1 à 120.3	Cube 150mm	Granite ($D_{\max}=25\text{mm}$)	1 ^{er} et 2 ^{eme} groupe de teste
Gonçalves (1995)	$f_c = 0,02V - 65,4$	18.0 à 42.0	Carotte 70*70mm	-	28 jours à 3 mois
Qasrawi (2000)	$f_c = 36,72V - 129,077$	6.0 à 42.0	Cube 150mm	Variable	Conservation à l'air
Soshiroda et Voraputhaporn (1999)	$f_c = 44,52V - 126,83$ $f_c = 54,18V - 206,27$	20.0 à 65.0	Cube 150mm	Gravier	V1-1 jour V2-28jours
Phoon et al (1999)	$f_c = 124,4V - 587,0$	35.0, 55.0 et 75.0	Cube 150mm	Granite ($D_{\max}=20\text{mm}$)	28 jours
Pascale et al (2000)	$f_c = 10^{-28} v^{8.1272}$	30.0 à 150.0	Cube 150mm	Limestone ($D_{\max}=15\text{mm}$)	
Elvery et Ibrahim (1976)	$f_c = 0,012 e^{2.27v \pm 6.4}$	15.0 à 60.0	Cube 100mm	Gravier ($D_{\max}=19\text{mm}$)	
Teodoru (1988)	$f_c = 0,0259 e^{1.612v}$	2.0 à 24.0	/		28 jours
Yun et al (1988)	$f_c = 0,329V - 1065$	5.0 à 30.0	Cylindre 150*300mm	Gravier ($D_{\max}=25\text{mm}$) et ($D_{\max}=40\text{mm}$)	

III.6.1 Les différentes 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 :

a . Mesures en transparence (directe)

Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester Figure III.2.

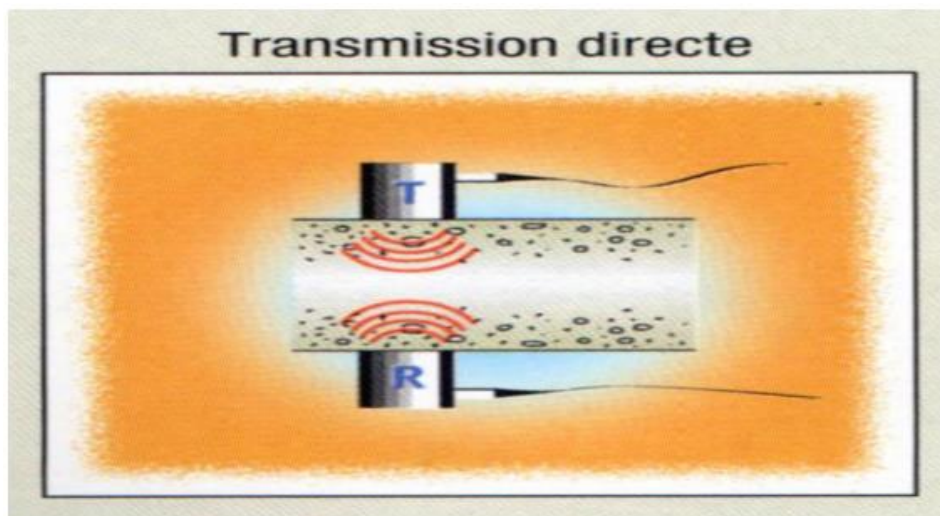


Figure III. 2 : Mesures en transparence (directe). [92]

b . 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.3.

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.

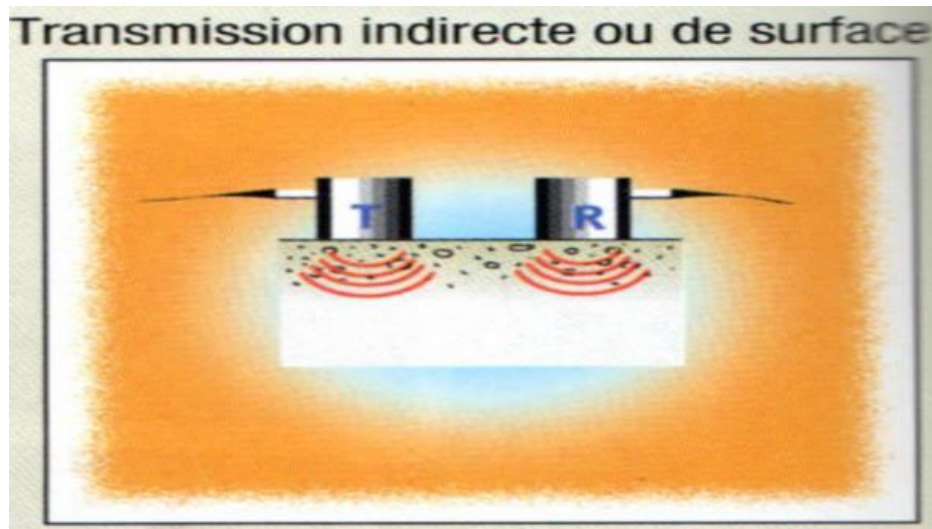


Figure III. 3 : Mesures en surface. [92].

c . 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.4. [92]

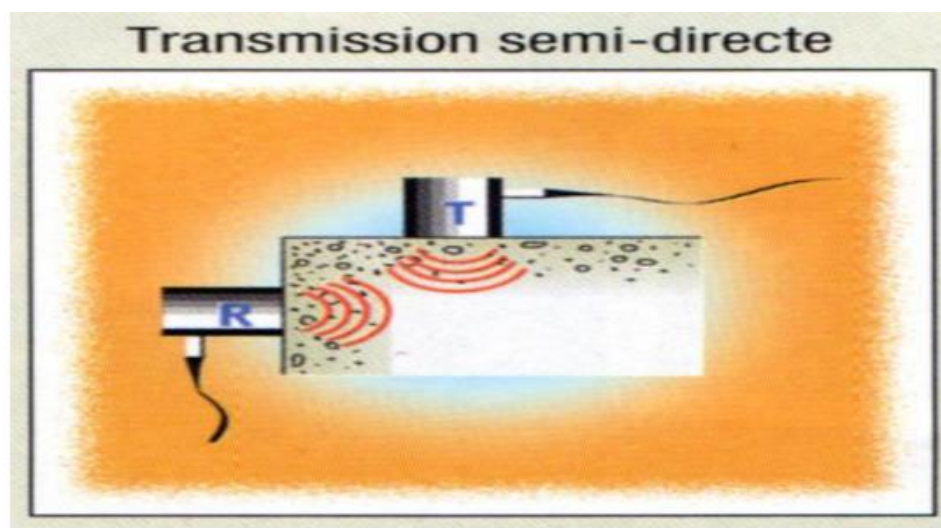


Figure III. 4 : Mesures semi directe. [92]

III.6.2 Les avantages

- ✓ C'est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton.
- ✓ L'essai peut être utilisé 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 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. [92]

III.6.3 Les inconvénients

✓ Ces essais ne sont toutefois pas aussi efficaces pour évaluer la résistance à cause du grand nombre de variables influençant la relation entre la résistance et la vitesse de propagation des impulsions.

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

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

L'utilisation de cette méthode, si elle a bénéficié de grandes simplifications n'est donc justifiée que pour les personnes compétentes en matière d'appareillage et de connaissance du matériau de béton et aussi au courant des précautions à prendre. [92]

III.7 Essai au scléromètre

III.7.1 Définition

Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilisé de nos jours il a été développé par Ernst Schmidt en (1948) et est connu sous le nom l'essai au marteau Schmidt ou essai au scléromètre. Le marteau de Schmidt (Photo I.1) est resté le seul instrument connu qui utilise le principe de rebondissement pour les essais sur le béton selon R.F Feldman (1977). En (1984) T.Akashi et S.Amasaki ont déclarés que malgré son apparente simplicité, l'essai au scléromètre soulève des problèmes complexes d'impact et de propagation de l'onde qui lui sont associés. [92]



Figure III. 5 : scléromètre

III.7.2 Principe

Le principe de base de l'essai au scléromètre est que le rebond d'une masse élastique dépend de dureté de la surface sur la quelle frappe la masse, Figure III.6.

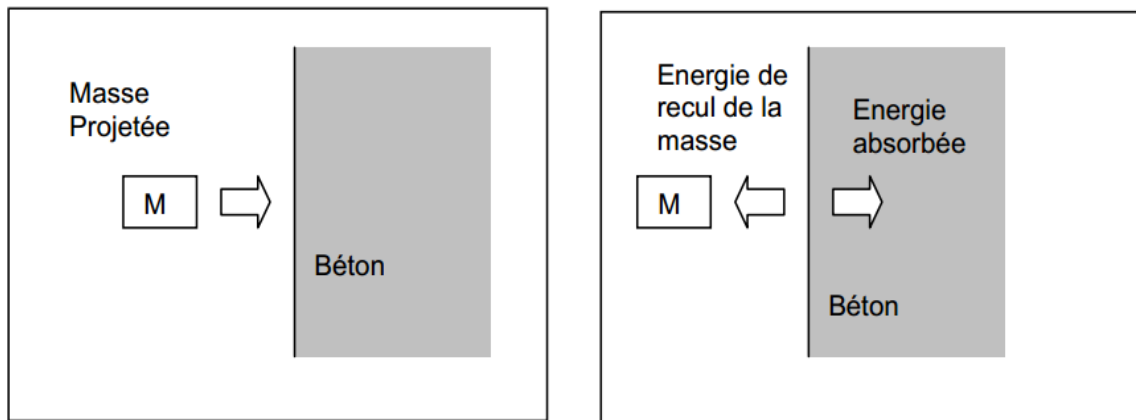


Figure III. 6 : Principe du Scléromètre.[92]

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 scléromètre 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.

L'énergie d'impact est produite par un système de ressorts dont l'amplitude du mouvement de recul est fonction de :

- L'énergie de recul
- Caractéristiques des systèmes de ressorts. [92]

Tableau III. 3 : Moyens de mesure selon Type de recul au scléromètre.[92]

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

III.7.2.1 Indice de rebondissement

L'indice de rebondissement est la mesure enregistrée sur une échelle graduée fixe par rapport au bâti de l'appareil de scléromètre, après la projection d'une masselotte chargée par ressort sur une tige métallique en contact avec la surface du béton. Cette mesure est fonction de l'angle d'inclinaison de l'appareil par rapport à horizontal. [92]

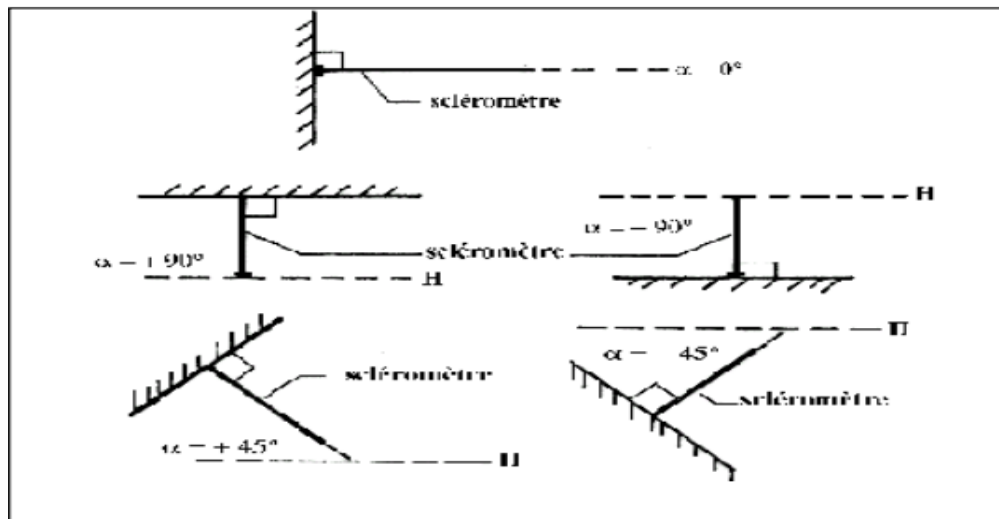


Figure III. 7 : Élément à tester par le scléromètre. [92]

Tableau III. 4 : Correction de la valeur de l'indice de rebondissement en fonction de l'angle d'inclinaison. [92]

Indice de rebondissement	Correction de la valeur de l'indice de rebondissement pour les différents angles d'inclinaison de l'appareil			
	Essais vers le haut		Essais vers le bas	
	+90°	+45°	-90°	-45°
20	Non valable	Non valable	+2,4	+3,2
>20	-5,4	-3,5	+2,4	+3,4
>30	-4,7	-3,3	+2,3	+3,1
>40	-3,9	-2,0	+2,0	+2,7
>50	-3,1	-2,1	+1,6	+2,2

III.7.2.2 Appareillage

a) Scléromètre Schmidt

Le modèle le plus utilisé pour la détermination non-destructive de la résistance du béton sur la base du recul est le scléromètre SCHMIDT (Suisse).

Il existe plusieurs modèles de scléromètres SCHMIDT selon le type de recul ainsi que l'énergie d'impact (tableau I.3). [92]

Tableau III. 5 : Modèles des scléromètres existants. [92]

Type de recul	Modèle	Energie d'impact (Kgf.m*)	Domaine d'utilisation
Linéaire	L	0.075	- Eléments minces en béton. - Bétons à base d'agréats légers.
	M	3000	-Eléments massifs.
	N	0.225	-Bétons usuels.
	NA	0.225	-Contrôle de la qualité du béton sous l'eau.
	NR	0.225	-Identique au modèle N mais avec un dispositif d'enregistrement des mesures.
	LB	0.075	-Contrôle de la qualité des produits en terre cuite (particulièrement des tuiles).
Angulaire	P	0.090	- Eléments ayant des dimensions transversales réduites. - Bétons et enduits de moindre résistance.
	PT	0.090	-Contrôle de la qualité des matériaux de très faible résistance ($R_c = 5$ à 80 kgf.m/cm^2).

$$1 \text{ kgf.m} = 9.81 \text{ J}$$

(III.3)

L'appareil est composé d'une masselotte chargée par un ressort qui se projette sur une tige métallique appelée tige de percussion.

b. Pierre à polir

La pierre à polir est une pierre abrasive de texture à grains moyens. Cette dernière est utilisée pour la préparation des surfaces de mesure.

c. Bloc d'étalonnage

Le bloc d'étalonnage, en néoprène armé, est de dimensions 25 cm x 25 cm x 6 cm.



Figure III. 8 : Le bloc d'étalonnage

d. Etalonnage 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 pour l'étalonnage du scléromètre :

- ✓ Sur bloc de néoprène armé.
- ✓ Sur éprouvettes de béton.

d.1 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 l de la 2ème série. La position de l'appareil doit être verticale. Deux cas peuvent se présenter :

- ✓ $28 \leq l \leq 32$ le fonctionnement de l'appareil est satisfaisant ;
- ✓ $l < 28$ ou $l > 32$ l'appareil est défectueux ; il sera procédé au nettoyage de l'appareil pour refaire une nouvelle fois la mesure de l . [92]

d.2 Sur éprouvettes de béton

Cette méthode consiste à déterminer la moyenne de l'indice sclérométrique l 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 l sont suivies d'un essai d'écrasement des éprouvettes. Les trois couples de valeurs sont reportés sur le graphique de la figure III.9. Dans le cas où les trois points représentatifs se retrouveraient à l'intérieur du fuseau, donc le fonctionnement de l'appareil est satisfaisant. Dans le cas contraire, le fonctionnement de l'appareil est défectueux. Une révision est nécessaire avec un certificat d'étalonnage. [92]

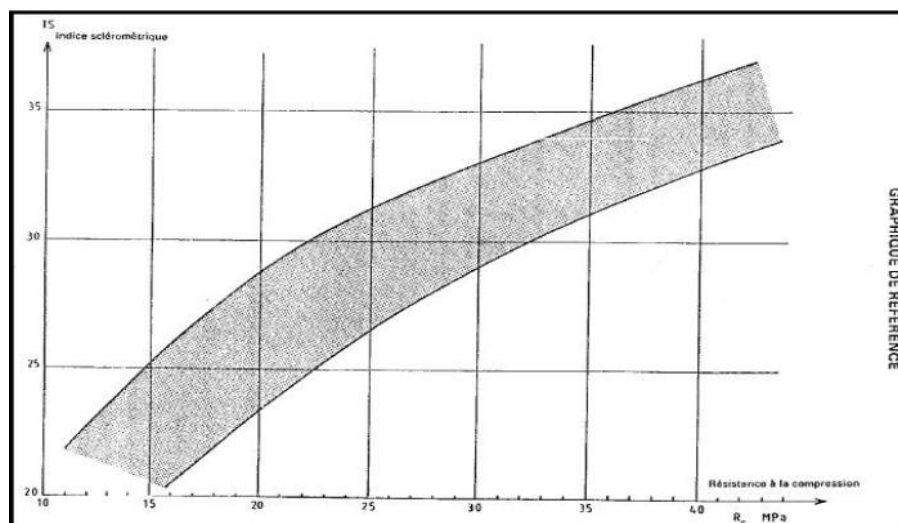


Figure III. 9: Graphe de contrôle du fonctionnement de l'appareil

On utilisant la méthode de dureté superficielle ou essai au scléromètre il faut tenir compte des éléments suivant :

✓ Dans le choix des zones d'essai, éviter la surface de coulée ou la face opposée, faire l'essai sur les surfaces parfaitement planes et lisses (sans rugosités) et préférablement une surface moulée. Un béton à texture ouverte ne peut donc pas être soumis à l'essai sclérométrique. Les surfaces lissées à la truelle doivent être poncées avec une pierre de carborundum (La pierre à polir).

✓ La zone choisie doit être représentative de l'élément soumis à l'essai et comprendre les régions fortement sollicitées et les régions soupçonnées d'être faibles dans l'élément. Si le béton soumis à l'essai ne fait pas parti intégrant d'un élément de grande dimension, il doit être supporté de façon rigide, car un déplacement en cours d'essai se traduit par un indice de rebondissement plus faible. - Dans le choix des points d'essai, éviter les régions proches des arrêtes de l'élément (à moins de 5 cm pour les coffrages en bois et à moins de 3cm pour les coffrages métalliques) la distance entre les points d'essai doit être d'au moins 2cm. Il ne faut pas faire l'essai dans les pores visibles, l'essai au scléromètre est sensible aux variations locales dans le béton. [92]

✓ La tête du marteau doit toujours être positionnée de façon perpendiculaire à la surface du béton, mais la position du marteau par rapport à la verticale aura effet sur l'indice de rebondissement en raison de la gravité qui agit sur le déplacement de la masse du marteau.

✓ L'indice de rebondissement doit être déterminé en plusieurs points rapprochés (en général de 6 à 12) pour une pièce bien déterminé en raison de la variabilité de la dureté du béton sur une petite surface.

Nota : Dans le cas de béton plus de trois moins d'âge il est obligatoire de décaper d'une couche de 2cm du béton avant de faire les essais. [92]

III.8 Méthodes pour la transformation des indices sclérométriques en résistance mécanique à la compression du béton. CNERIB (1998)

Il existe plusieurs méthodes pour la transformation des indices sclérométrique en résistance mécanique à la compression du béton.

III.8.1 Méthode de la courbe unique

Dans la plupart des cas, la composition du béton ainsi que les conditions de conservation influençant la corrélation « Indice sclérométrique – Résistance du béton » sont inconnues. On utilise alors une courbe de transformation unique figurant sur l'appareil.

La courbe unique de corrélation du scléromètre type N ne peut être utilisée dans les cas suivants:

- ✓ Agrégats artificiels
- ✓ Agrégats légers, concassés ou de faible dureté
- ✓ Gravillons polis
- ✓ Agrégats non lavés riches en argile adhérente
- ✓ Béton ayant un très faible dosage en ciment ou mélange très sec ou insuffisamment serré

- ✓ Bétons frais
- ✓ Bétons sous l'eau
- ✓ Bétons très vieux et secs
- ✓ Bétons de faible résistance < 200 kg/cm².

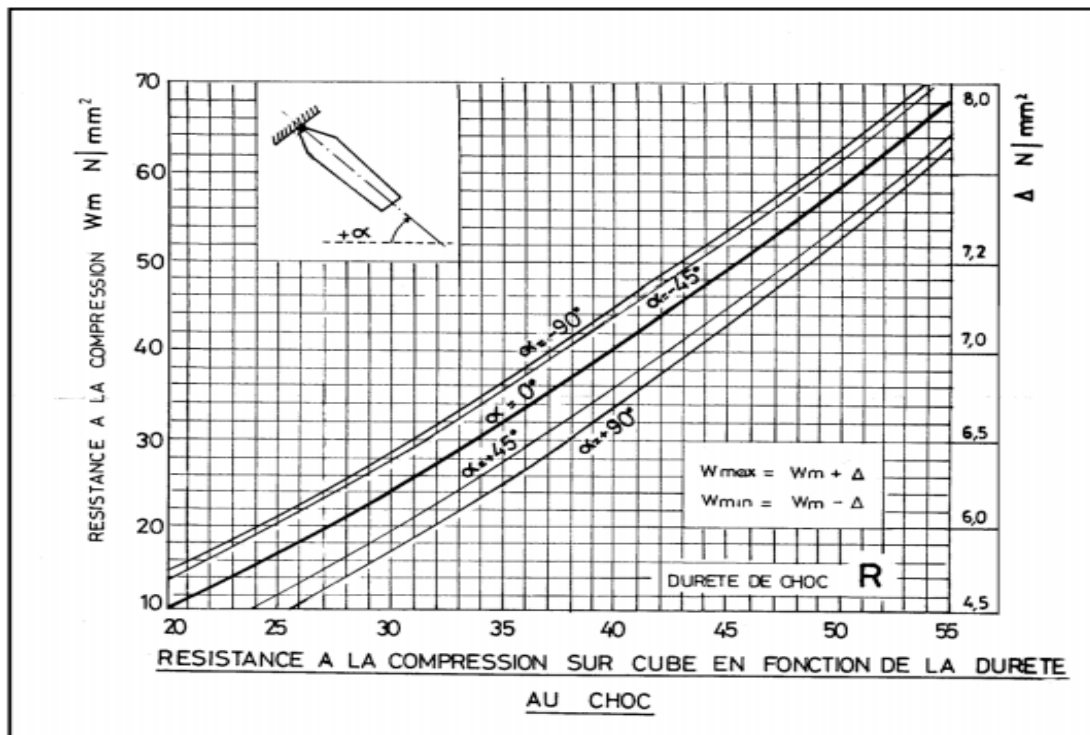


Figure III. 10 : Courbe de transformation unique. [92]

III.8.2 Méthode de la courbe de calibrage

Cette méthode est utilisée dans les usines de préfabrication où les matières premières sont relativement constantes.

La courbe de calibrage est déterminée en effectuant l'essai au scléromètre sur au minimum 30 éprouvettes. L'arrête de l'éprouvette ne devrait pas être inférieure à 15 cm.

Les éprouvettes doivent être soumises au même régime de durcissement que celui des éléments préfabriqués.

Dans le cas où les mesures sclérométriques sont effectuées sur la face de coulage du béton de l'élément préfabriqué, il est recommandé de faire pareil pour les éprouvettes.

Après les essais au scléromètre, les éprouvettes sont soumises à un essai de compression lent dont la durée est plus d'une minute.

Les résultats obtenus sont portés sur un graphique représentant la courbe d'étalonnage dont le tracé concorde mieux avec les résultats expérimentaux en appliquant la méthode des moindres carrés.

La 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 $\pm(20\% \div 25\%)$

III.8.3 Méthode des coefficients d'influence non corrigés

Dans le cas de la non-disponibilité des éprouvettes pour la détermination de la courbe de calibrage, et l'existence des données sur la composition du béton à tester, on considère que ces informations sont suffisantes pour déduire une courbe des valeurs corrigées.

Les valeurs corrigées n'offrent pas la même précision que la courbe de calibrage mais sont préférables aux valeurs données par la courbe unique illustrée sur l'appareil.

Pour cette méthode, on admet comme béton de référence un béton ayant la composition suivante:

- ✓ Ciment type CPA400 dosé à 300 kg/m³
- ✓ Agrégats roulés siliceux
- ✓ Indice de maturité 1000
- ✓ Humidité résultant d'une conservation durant 1 jour dans le moule, 6 jours dans l'eau et 21 jours à l'air, à 40-60% d'hygrométrie relative.

Pour ce béton la corrélation indice sclérométrique – résistance à la compression est égale à :

$$R_c = 0.09I^{2.27} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (\text{III.4})$$

La courbe d'étalonnage définie par la relation ci-dessus est reproduite pour un coefficient de transformation $C_t = 1.0$ (coefficient C_t pour béton sec).

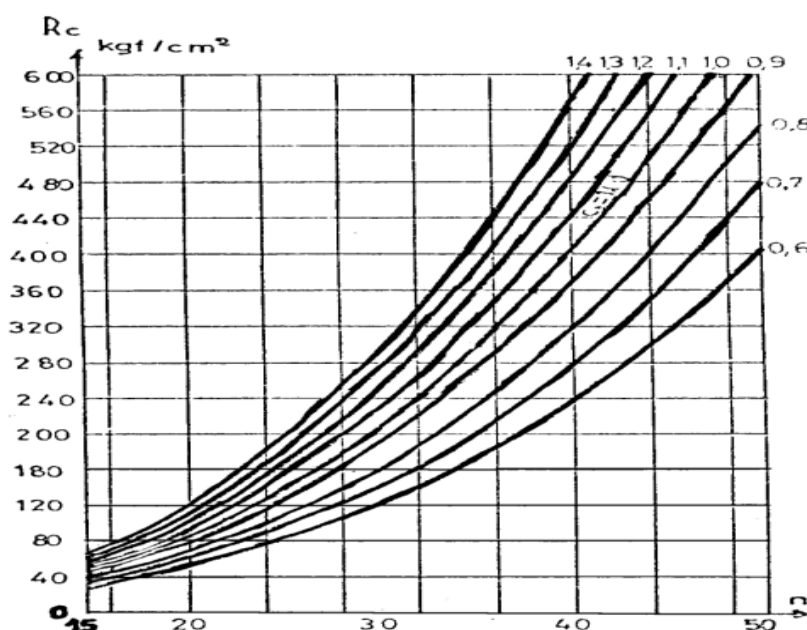


Figure III. 11: Courbes d'étalonnage pour bétons conservés à l'air. [92]

Si les bétons à tester diffèrent du béton de référence, la correction est faite à l'aide du coefficient total d'influence C_t pris égal à :

$$C_t = C_c \cdot C_d \cdot C_a \cdot C_m \cdot C_u \quad (\text{III.5})$$

Avec :

C_c : coefficient d'influence du type de ciment

C_d : coefficient d'influence du dosage en ciment

C_a : coefficient d'influence du type de granulas

C_m : coefficient d'influence de la maturité du béton

C_u : coefficient d'influence de l'humidité du béton

a. Coefficient d'influence du type de ciment C_c

Le coefficient d'influence du type du ciment C_c est le rapport entre la résistance des bétons préparés avec des ciments CPA et HRI et celle des bétons à base du ciment CLK250

Tableau III. 6 : Valeurs du coefficient C_c . [92]

Type de ciment	C_c
CPA, HRI, ... etc	1.00
CLK250	0.90

b. Coefficient d'influence du dosage en ciment C_d

Le rapport des résistances des bétons à différents dosages pour le même indice sclérométrique représente le coefficient d'influence du dosage.

Tableau III. 7 : Valeurs du coefficient C_d . [92]

Dosage (kg/m ³)	C_d
100	0.67
200	0.85
300	1.00
400	1.12
500	1.24

c. Coefficient d'influence du type de granulas Ca

Le coefficient d'influence du type de granulas est pris égal à $Ca = 1.00$ pour les bétons avec des agrégats siliceux roulés, pour les autres types, ce coefficient doit être déterminé par des essais.

d. Coefficient d'influence de la maturité du béton Cm

Lorsque la maturité du béton augmente la dureté et la résistance de la couche de surface devient plus grande ce qui diminue la valeur de l'indice sclérométrique.

Il n'est pas recommandé d'utiliser le scléromètre sur des bétons ayant un facteur de maturité supérieur à 40 000 (4 ans).

Tableau III. 8 : Valeurs du coefficient Cm. [92]

Maturité du béton C x jours	Cm
300	1.06
1000	1.00
6000	0.92
36000	0.80

e. Coefficient d'influence de l'humidité du béton

Si l'on prend comme référence la résistance du béton résultant d'une conservation durant 1 jour dans le moule, 6 jours dans l'eau et 21 jours à l'air, à 40-60% d'hygrométrie relative, alors la résistance du béton pour d'autres degrés d'humidité ainsi que pour d'autres indices sclérométriques peut être évaluée à l'aide du coefficient Cu .

Tableau III. 9 : Valeurs du coefficient Cu . [92]

Humidité	Cu	
	n = 20	n = 40
Saturé (sous l'eau)	1.52	1.12
Standard	1.00	1.00
A l'air sec	0.94	0.96

Pour les bétons humides (saturés d'eau), un coefficient noté Ct'' sera utilisé pour la détermination de la valeur de la résistance du béton testé.

$$Ct'' = Cc. Cd. Ca. Cm \quad (III.6)$$

f. Calcul de la résistance du béton : CNERIB (1998)

Dans le cas d'un béton sec :

$$\text{Ref} = \text{Rst} \cdot \text{Ct} \quad (\text{III.7})$$

Dans le cas d'un béton humide :

$$\text{Ref} = \text{Rst}' \cdot \text{Ct}' \quad (\text{III.8})$$

Rst, Rst' : résistances du béton de référence standard. Ct .

Ct' : coefficients d'influence totaux.

La méthode des coefficients d'influence non corrigés donne une précision variant entre $\pm 30\%$ et $\pm 40\%$. Cet écart est dû au manque de relation sûre entre la qualité du béton en surface et dans la masse empêchant ainsi d'obtenir une plus grande précision.

Tableau III. 10 : Expressions des autres auteurs pour la corrélation de f_c et R . [92]

Auteur	Expression	f_c (Mpa)	Moule	Type d'agrégats	Note
Ravindrajah et al (1988)	$f_c = 7,25e^{0.08R}$	15.0 à 75.0	Cube 100mm	Granite ($D_{\max}=20\text{mm}$)	-
Almeida (1993)	$f_c = 1.040R^{1.115}$ $f_c = 1.041R^{1.115}$	40.1 à 120.3	Cube 150mm	Granite ($D_{\max}=25\text{mm}$)	1 ^{er} et 2 ^{eme} groupe de teste
Gonçalves (1995)	$f_c = 1,73R - 34,3$	18.0 à 42.0	Carotte 70*70mm		28 jours à 3 mois
Qasrawi (2000)	$f_c = 1,353R - 17,393$	6.0 à 42.0	Cube 150mm	Variable	Conservation à l'air
Soshiroda et Voraputhaporn (1999)	$f_{c28} = 161R^{28} - 137$ $f_{c28} = 147R^{28} - 16,85$	20.0 à 65.0	Cube 150mm	Gravier	V1-1 jour V2-28jours
Proceq-DigiSchimdt	$f_{c7} = 1,4553R^7 - 22,817$ $f_{c14} = 1,398R^{14} - 20,17$	25,1 à 33,1	Cube 200mm	Gravier ($D_{\max}=32\text{mm}$)	7 jours 14 jours à 56 jours
Pascale et al** (2000)	$f_c = 0,000135R^{3,4424}$	30.0 à 150.0	Cube 150mm	Calcaire ($D_{\max}=15\text{mm}$)	-
Lima et Silva (2000)	$f_c = 0,0501R^{1,8428}$	25,1 à 33,1	Cylindre	-	-

III.9 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. [92]

III.10 Les inconvénients

✓ Une précision entre ± 15 et $\pm 20\%$ n'est possible qu'avec des éprouvettes qui ont été coulées et soumises à un traitement de cure et à des essais dans les conditions pour lesquelles les courbes d'étalonnage ont été établies. Feldman (1977).

✓ Les résultats sont influencés par des facteurs tels que l'égalité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette, le degré d'humidité du béton, le type de ciment et de gros granulats W.E.Grieb (1958) et le degré de carbonatation de la surface.

✓ La résistance obtenue n'est que celle de la peau de béton, elle ne renseigne pas sur le béton à l'intérieur de la masse de l'ouvrage. Selon la norme BS 1881 :partie202 :1986, l'épaisseur concernée par cet essai est d'environ 30mm.

Les changements qui n'affectent que la surface du béton, comme le degré de saturation en surface (qui abaisse l'indice de rebondissement) C.H.Willetts (1958) (figure III.12) ou la carbonatation (qui augmente cet indice) S.Amasaki (1991) ont peu d'influence sur les propriétés du béton en profondeur. [92]

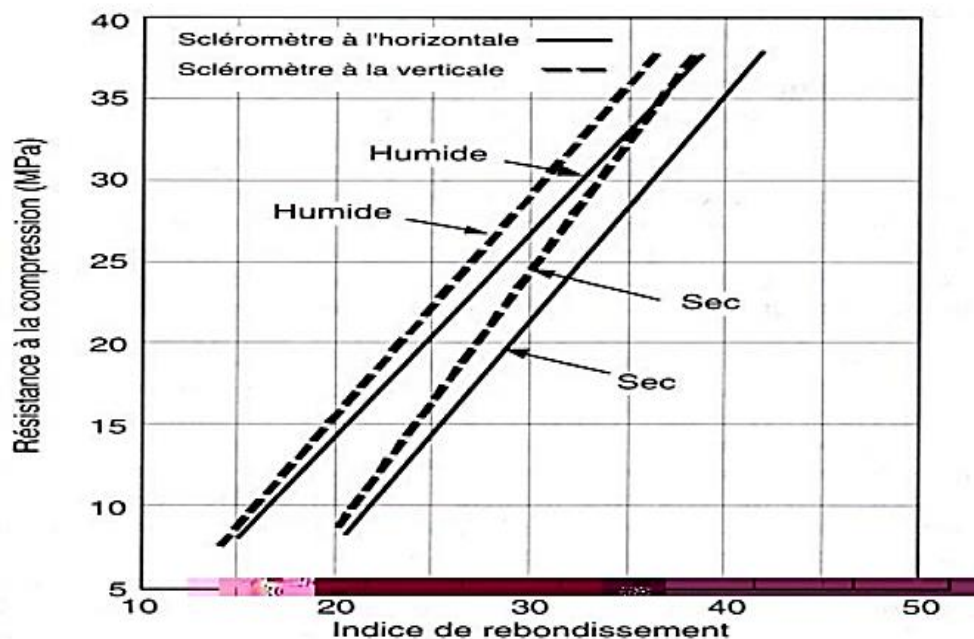


Figure III. 12: La relation entre la résistance à la compression mesurée sur cylindre et l'indice de rebondissement d'un scléromètre utilisé à l'horizontale et à la verticale sur des surfaces de béton sèches et humides. C.H.Willetts (1958). [92]

✓ On ne peut juger définitivement qu'une partie d'ouvrage à partir des indications du scléromètre.

✓ Bien que l'essai au scléromètre soit utile, il ne constitue en aucune façon une mesure de la résistance et l'on ne devrait pas accepter la revendication exagérée de son emploi en remplacement des résultats de l'essai de compression. [92]

III.11 Méthodes combinées

III.11.1 Définition

Il est possible de combiner deux ou plusieurs méthodes non destructives à la fois et dont les résultats, introduits dans un traitement unique garantissent au résultat final obtenu une précision supérieure. À 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.

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 III.13.

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

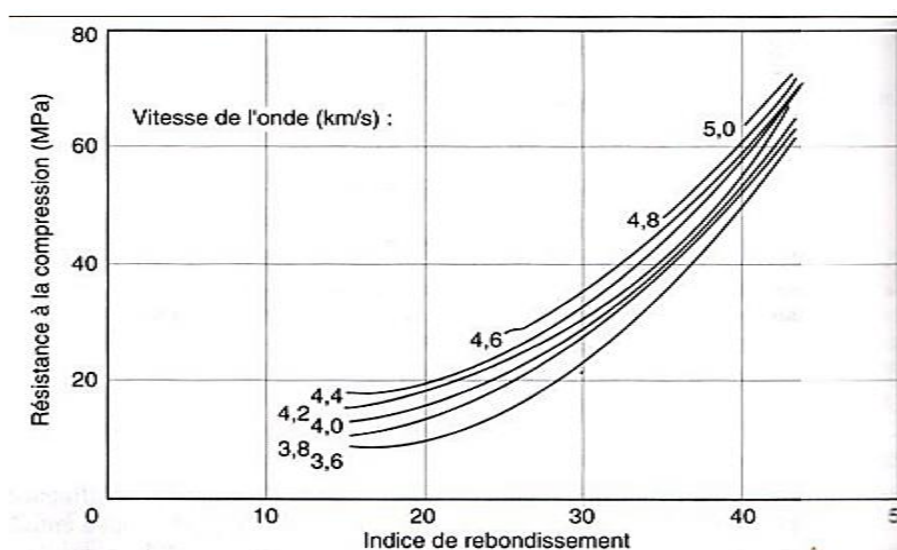


Figure III. 13: Courbe d'estimation la résistance à la compression in situ par utilisation conjointe de la mesure de la propagation d'ondes ultrasoniques et des résultats d'essai au scléromètre selon U. Bellander (1977). [92]

En a un exemple d'une formule combinée proposée par FERET qui associe le résultat de l'essai à l'ultrason et celui du scléromètre [3,14] :

$$R_c = \left(\frac{S}{3,64 + 0,0235 * S - 0,56 * v} \right)^2 \quad (\text{III.9})$$

Avec :

S : l'indice sclérométrique.

V : la vitesse de propagation (mm/μs).

R_C: la résistance à la compression du béton (bars).

III.11.2 Principe

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 vitesse de propagation de son et l'indice de rebondissement est la méthode combinée ; elle permet d'attendre une précision accrue. Le principe reste identique et on a recours à un béton standard qui possède une courbe d'étalonnage spécifique. La méthode a été développée pour essayer d'augmenter la fiabilité des essais non destructifs en détectant la résistance du béton.

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

- ✓ Vitesse des ondes ultrasonores longitudinales – dureté des empreintes.
- ✓ Vitesse des ondes ultrasonores longitudinales – dureté superficielle par indice de rebondissement.
- ✓ Vitesse des ondes ultrasonores- atténuation ou amortissement des ondes ultrasonores.
- ✓ Vitesse des ondes ultrasonores- atténuation de la fréquence propre.
- ✓ Vitesse des ondes ultrasonores- atténuation des rayons.
- ✓ Vitesse des ondes ultrasonores-vitesse des ondes ultrasonores transversales.
- ✓ Dureté au choc par rebondissement- dureté par empreinte. [92]

III.11.3 Les avantages

✓ 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.

✓ 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 examiné. [95]

III.11.4 Les inconvénients

✓ 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. 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. [95].

III.12 Conclusion

Comparée au développement des méthodes d'NDT dans le domaine des structures en acier, l'évolution de ces techniques pour les ouvrages en béton se fait plus lentement. Cela peut s'expliquer par la complexité du matériau béton, et notamment son hétérogénéité à l'échelle macroscopique, par rapport à l'acier. Quoique des travaux visant à améliorer les méthodes d'essais non destructifs se poursuivent, et que les essais comme tels ne sont pas difficiles à effectuer, les données fournies par ces essais ne sont pas très faciles à interpréter.

Cependant, Ils fournissent des données sur les ouvrages réels que des essais normaux ne sauraient fournir. Ces essais sont aussi excellents pour permettre d'estimer la résistance relative du béton dans les différentes parties d'un même ouvrage. Lorsqu'ils sont correctement effectués, ils constituent un élément très important parmi tous les moyens qui permettent de tester et d'évaluer le béton et les ouvrages en béton.

Par ailleurs, le choix de n'importe quelle méthode se limite à des critères bien définis. Notre choix de méthode est arrêté sur l'auscultation dynamique et des essais sclérométriques, suite à son intérêt absolument non destructif, et sa capacité de déterminer les propriétés dynamiques du béton.

CHAPITRE IV

Matériaux, Matériels et Essais

IV. 1 Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter les différents matériaux (gravier, sable et ciment) utilisés dans cette étude, afin de déterminer les caractéristiques nécessaires qui nous permettront de procéder aux formulations de béton (caractéristiques physiques et mécaniques) et on décrira les calculs de formulations des bétons étudiés, ensuite on va décrire aussi les différents essais destructifs et non destructifs avec leurs procédures et normes.

IV. 2 Matériaux Utilisés

Nous avons utilisé les matériaux locaux, leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire de génie civil à l'université de MOHAMED BOUDIAF M'SILA.

IV. 3 Caractéristique des matériaux

IV. 3. 1 Caractéristiques du gravier

Le gravier utilisé pour la confection du béton est gravier de disponible au niveau de notre laboratoire, obtenue après concassage de la roche. Les fractions utilisées sont : **(3/8), (8/16)**.

IV. 3. 1. 1 Analyse granulométrique par tamisage : NF P 18-560

➤ But de l'essai

L'analyse granulométrique a pour but la détermination de la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

➤ Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon. Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableau ou graphique.

➤ Critères que doit l'échantillon comblé

La quantité utilisée doit répondre aux différents impératifs qui sont opposés, d'où, il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif, au même temps, il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants. Pratiquement, la masse utilisée répond au critère suivant :

$$M \geq 0,2 D_{\max}. \quad (\text{IV.1})$$

D : Diamètre maximal du gros granulat en (mm). **M** : La masse de l'échantillon en (kg).

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage.

La vibration se fait 02 fois durant 07 minutes à chaque fois. Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau IV. 1 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/16).

Fraction et masse	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)	Moyen (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé	tamisa cumulé (%)
(3/8) 1600g	8	78	80.5	80.5	5.03	94.97
		83				
	6.3	594	562	642.5	40.15	59.85
		530				
	5	318	291.5	934	58.37	41.63
		265				
	4	402	404.5	1338.5	83.65	16.35
		407				
	3.15	167	194	1532.5	95.78	4.22
		221				
	2.5	62	34.5	1567	97.93	2.07
		9				
	Fond	33	32.5	1599.5	99.96	0.04
		32				

Tableau IV. 2: L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/16).

Fraction et masse	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)	Moyen (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé	tamisa cumulé (%)
(8/16) 3200g	16	235	195.5	195.5	6.1	93.9
		156				
	12.5	787	789	984.5	30.76	69.24
		791				
	10	1240	1220	2204.5	68.89	31.11
		1200				
	8	687	731.5	2936	91.75	8.25
		776				
	6.3	243	256	3192	99.75	0.25
		269				
	5	5	5.5	3197.5	99.92	0.08
		6				
	Fond	3	2.5	3200	100	00.0
		2				

Les courbes granulométrique de différentes fractions granulaires utilisées sont tracés ci – dessous.

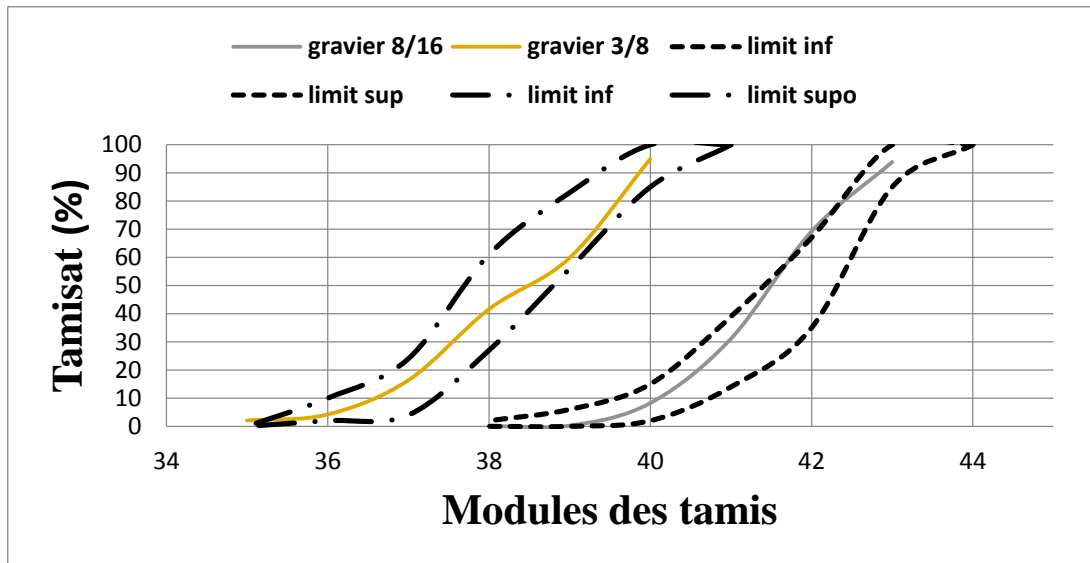


Figure IV. 1 : La courbe granulométrique de différentes fractions granulaires

VI. 3. 1. 2 Masse volumique

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Comme il existe le volume apparent et le volume absolu, on distinguera :

a. La masse volumique apparente (γ)

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume occupé par la matière solide du corps et les vides contenus dans les grains (volume apparent).

b. La masse volumique absolue ou spécifique (ρ)

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de sa matière (volume absolu, tous vides déduits ou volume réel).

Les masses volumiques s'expriment en fonction des unités courantes des masses et des volumes : t/m^3 , kg/dm^3 , g/cm^3 .

Il ne faut pas confondre entre la masse volumique et la densité : Une densité est le quotient entre la masse d'un certain volume d'un matériau et la masse du même volume d'eau à 4 °C, c'est - à - dire une grandeur sans unité.

VI. 3. 1. 2. 1 La masse volumique apparente (γ): NF P18-554

➤ Principe

Il s'agit de remplir une mesure de 1 litre ou plus (2 litres, 5 litres) avec le matériau et de déterminer la masse du contenu.

Le mode de remplissage de la mesure, a une influence très importante sur les résultats, il faudra réaliser les essais avec du matériel aussi simple que possible, et très soigneusement.

➤ Mode opératoire

- ✓ Peser le récipient à vide et noter M_1
- ✓ Prendre le matériau dans les 2 mains formant entonnoir,
- ✓ Placer les 2 mains à 10 cm environ au-dessus de la mesure et laisser tomber le matériau ni trop vite, ni trop lentement,
- ✓ Verser ainsi le matériau au centre de la mesure jusqu'à ce qu'il déborde autour en formant un cône,
- ✓ Araser à la règle,
- ✓ Peser le contenu et noter M_2 .
- ✓ L'opération se fait 03 fois et en prendre la moyenne.

Il résulte que :

$$\gamma = (M_2 - M_1)/V \quad (IV.2)$$

M_1 : masse du récipient vide.

M_2 : masse du récipient et gravier.

V : volume de récipient.

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau IV. 3 : La masse volumique apparente (γ) du gravier concassé [(3/8), (8/16)].

Gravier	M_2 (kg)	M_1 (kg)	V (l)	γ (kg/l)	γ_{mov} (kg/l)
(3/8)	12.934	2.921	7	1.430	1.4275
	12.900			1.425	
(8/16)	17.416	3.489	10	1.392	1.396
	17.500			1.401	

VI. 3. 1. 2. 2 La masse volumique absolue ou spécifique (ρ): NF P18-554

➤ Principe

Le volume absolu ou réel d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

Le liquide employé est, aussi souvent que possible, l'eau, sauf pour les corps réagissant avec l'eau qui conduisent à utiliser un autre liquide (Benzène en principe).

De nombreuses méthodes permettent de déterminer les masses et volumes des matériaux à étudier, dans notre étude en va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

➤ Mode opératoire

➤ Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V_1 (400 ml),

- ✓ Peser une masse M du corps (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette.
- ✓ Bien éliminer les bulles d'air,
- ✓ Lire le nouveau volume V_2 ,
- ✓ Le volume absolu ou réel est :

$$V = V_2 - V_1 \quad (\text{IV.3})$$

- ✓ La masse volumique réelle est :

$$\rho = M / (V_2 - V_1) \quad (\text{IV.4})$$

L'opération se fait 03 fois et en prendre la moyenne. Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau IV. 4: La masse volumique absolue (ρ) du gravier concassé [(3/8), (8/15)].

Gravier	M (g)	V_1 (ml)	V_2 (ml)	ρ (kg/l)	ρ_{moy} (kg/l)
(3/8)	300	400	520	2.5	2.52
			518	2.54	
(8/15)			520	2.5	2.51
			519	2.52	

VI. 3. 1. 3 La porosité : NF P18-554

C'est le rapport du volume des vides d'un matériau et son volume total, elle représente donc le degré de remplissage de son volume occupé par les vides.

La porosité est exprimée en pourcentage (%) et définie par la relation :

$$P (\%) = \frac{Vv}{Vt} \times 100 \quad (\text{IV.5})$$

En peut exploiter les résultats des masses volumiques pour déterminer la porosité de notre gravier d'où :

$$P (\%) = \left(1 - \frac{\gamma}{\rho}\right) \times 100 \quad (\text{IV.6})$$

VI. 3. 1. 4 La compacité : NF P18-554

C'est le quotient du volume des grains solides et le volume total du matériau, elle exprime en pourcentage (%) et donner par la relation suivante :

$$C(\%) = \frac{V_s}{V_t} \times 100 \quad (\text{IV.7})$$

Aussi :

$$C(\%) = 1 - P \quad (\text{IV.8})$$

VI. 3. 1. 5 L'indice des vides : NF P18-554

C'est le rapport entre le volume occupé par les vides et le volume de la partie solide des grains, V étant le volume total occupé par les granulats.

$$e(\%) = \frac{Vv}{V_s} \quad (\text{IV.9})$$

Aussi :

$$e(\%) = \frac{1-C}{C} \quad (\text{IV.10})$$

Les grandeurs de la porosité, la compacité et l'indice des vides des granulats sont rapportés sur le tableau suivant :

Tableau IV. 5 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.

Gravier	Porosité P (%)	Compacité C (%)	Indice des vides e (%)
(3/8)	43.4	56.6	0.7667
(8/16)	44.4	55.6	0.7985

VI. 3. 1. 6 La résistance à la fragmentation par chocs (Essai Los Angeles) : NF P 18-541

➤ But de l'essai

Estimer la résistance à la fragmentation par chocs ou bien la dureté des agrégats.

➤ **Principe de l'essai**

Faire rouler dans un tambour rotatif un échantillon de granulats mélangé à des boules d'acier. A la fin, on évalue la quantité de matériau retenu sur le tamis de 1.6 mm.

Il se pratique sur une des six classes granulaires qui sont : (4/6.3) ou (6.3/10) ou (10/14) ou (10/25) ou (16/31.5).



Figure IV. 2 : Appareille de Los Angeles.

On place un échantillon de 5 kg de granulat et 7 à 12 boulets d'aciers dans un tambour pouvant tourner de son axe, la charge des boules est fixée conformément aux indications du tableau ci-après :

Tableau IV. 6 : Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire choisie.

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)	
4 - 6.3	7	3080	+20
6.3 - 10	9	3960	à
10-14	11	4840	-150
10 - 25	11	4840	+20
16 - 31.5	12	5280	à
25 - 50	12	5280	-150

➤ **Mode opératoire :**

✓ Après introduire l'échantillon et les boules d'acier avec soin dans le tambour, on fait opérer la machine de Los Angeles.

✓ Faire effectuer à la machine 500 rotations avec une cadence régulière comprise entre 30 tr /min à 33 tr/min.

✓ Après l'achèvement de l'essai, en recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.

✓ Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm.

✓ Laver le refus au tamis de 1.6 mm. Égoutter et sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.

✓ Peser ce refus une fois sécher. Soit **P** le résultat de la pesée avec :

$$P = 5000 - \text{refus} \quad (\text{IV.11})$$

Le coefficient de Los Angeles L_A est donné par la relation suivante :

$$L_A = 100 (P/5000) \quad (\text{IV.12})$$

P : est le passant à 1.6mm.

Le tableau suivant donne l'estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A :

Tableau IV. 7 Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A .

Coefficient L_A (%)	Estimation de la dureté des agrégats
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre

Les résultats obtenus sont inscrire dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV. 8: Résultats d'essai de Los Angeles du gravier [(3/8), (8/16)].

Fraction granulaire	L_A (%)
(3/8)	21.4
(8/16)	17.8

Les valeurs de la résistance à la fragmentation montrent que le gravier testé est dure et reconnue apte pour la confection du béton.

VI. 3. 1. 7 Degré d'absorption d'eau : NF P18-555

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau. Elle est exprimée en (%) et définit par la formule :

$$A (\%) = [(M_H - M_S)/M_S].100 \quad (\text{IV.13})$$

M_H : La masse du matériau saturé d'eau en (g).

M_S : La masse du matériau sec en (g).

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 9: Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/16).

Fraction	M_H (g)	M_S (g)	A (%)	A (%) _{moy}
(3/8)	1007	1000	0.7	0.6
	1005	1000	0.5	
(8/16)	1003	1000	0.3	0.55
	1008	1000	0.8	

VI. 3. 2 Caractéristique du sable

Nous avons utilisé dans ce projet de fin d'étude un sable local de dune d'origine siliceux provient de OUAD SOUF exactement Jamàa et du gravie concassée utilisés pour la confection du béton. Les fractions utilisées sont d'où ses caractéristiques sont les suivant :

VI. 3. 2. 1 Analyse granulométrique : NF18-560

➤ But de l'essai

Permettre la détermination des grosseurs ainsi les pourcentages respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

➤ Principe de l'essai

Faire passer l'échantillon tester à travers une série des tamis décroissante de plus grand à plus petit, et faire peser le refus dans chaque tamis.

➤ Mode opératoire

Le mode opératoire est identique à celui cité précédemment dans la partie des graviers, la seule différence est la durée de l'essai qu'elle été 3minutes dans le cas des sables.

En prépare 03 échantillons de sable de dune de 2kg de masse, et en répète l'essai 03 fois et en prendre la moyenne.

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable de BOUSAADA sont regroupés dans le tableau (10) ci-dessous

Tableau IV. 10: Analyse granulométrique du sable de dune OUAD SOUF.

Diamètre des tamis (mm)	Refus élémentaire (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
5	1.5	1,5	0,15	99,85
2,50	10	11,5	1,15	98,85
1,25	67.5	79	7,9	92,1
0,63	278.5	357,5	35,75	64,25
0,315	479.5	837	83,7	16,3
0,16	137	974	97,4	2,6
0,08	23	997	99,7	0,3
Fond	0.5	997,5	99,75	0,25

Tableau IV. 11: Analyse granulométrique du sable concassée.

Diamètre des tamis (mm)	Refus élémentaire (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
5	0,2	0,2	0,02	99,98
2,50	73,8	74	7,4	92,6
1,25	310,1	384,1	38,41	61,59
0,63	230,4	614,5	61,45	38,55
0,32	191,7	806,2	80,62	19,38
0,16	136,6	942,8	94,28	5,72
0,08	50,3	993,1	99,31	0,69
Fond	6,5	999,6	99,96	0,04

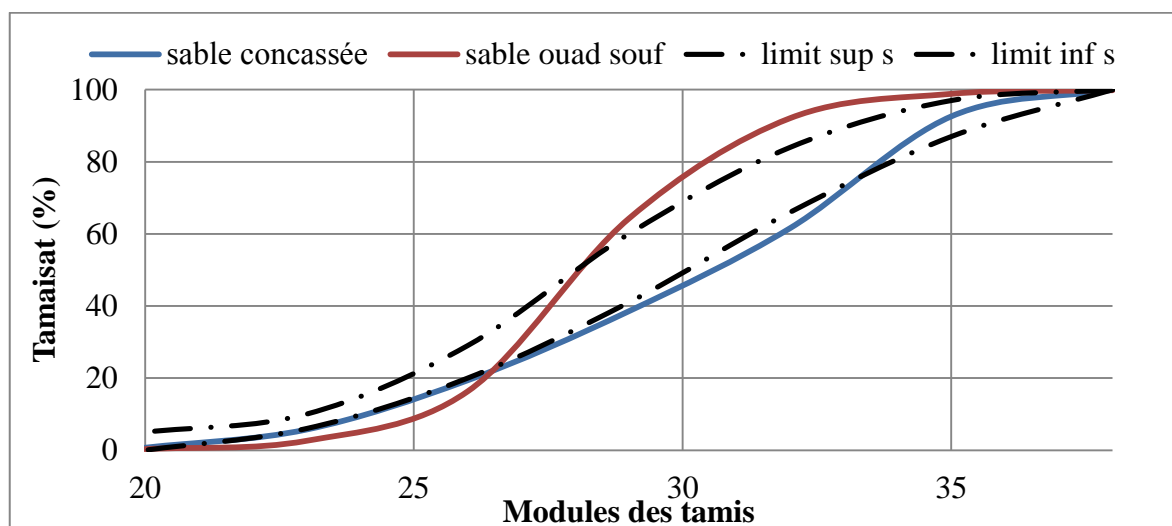


Figure IV.4 : Analyse granulométrique du sable de dune (ouad souf) et sable concassée.

En observe qu'une grande partie de la courbe granulométrique est située à l'extérieur du fuseau recommandé, ce qui nous informe que le sable testé est un sable fin, en peut confirmer notre jugement par le calcul du module de finesse du sable.

VI. 3. 2. 2 Module de finesse : NF P 18-540

Le module de finesse est égal au $1/100^{\circ}$ de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm.

$$MF = \frac{1}{100} \times \sum (\text{refus cumulés en \% des tamis} \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\}) \quad (\text{IV.14})$$

Le module de finesse donne une estimation sur la qualité du sable d'où, en trouve que la norme Française donne la classification suivante :

Tableau IV. 12 : Classification des sables en fonction du module de finesse.

Qualité du sable	Module de finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

En a obtenue pour notre sable testé un module de finesse **MF=2.26** et sable concassée **MF=2.82**, ce qui nous donne une indication sur la grosseur du sable.

Le sable de dune testé est un **sable Moyen** : $2 < MF < 2.5$ et sable concassée un sable gros : **MF** > 2.5 Convient à un béton de moindre résistance mais facile de mettre en place.

Les normes préconisent pour un bon sable à béton, un module de finesse de l'ordre de 2,2 à 2,8. En utilisant la méthode théorique, en prenant un sable de dune avec un module de finesse

MF = 2.26 qu'on va corriger avec le sable alluvionnaire dont le module de finesse **MF = 2.82** suivant les formules suivantes, on peut obtenir un mélange dont le module de finesse fixé au préalable à **MF = 2,5**.

Les proportions des deux sables seront les suivantes :

$$\mathbf{SD} = \frac{(Mf - Mf2)}{Mf1 - Mf2} = 40\% \text{ et } \mathbf{SC} = \frac{(Mf - Mf1)}{Mf2 - Mf1} = 60\% \quad (\text{IV.15})$$

Avec : **SD** est le sable de dune.

SC est le sable concassé.

VI. 3. 2. 3 Propreté « équivalent de sable » : NF P18-590

➤ But de l'essai

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

➤ Mode opératoire

- ✓ Remplir l'éprouvette d'une solution la vente jusqu'au premier repère.
- ✓ A l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de 120 ± 1 g dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main a fin de libéré les bulles d'air et favorise le mouillage de l'échantillon.
 - ✓ Laisser reposer pendant 10 min.
 - ✓ Boucher l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de secousses horizontal en 30s à la main à l'aide de l'agitateur mécanique.
 - ✓ Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec solution la vente au-dessus l'éprouvette et rincer ensuite les parois de celle-ci.
 - ✓ Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette tout en imprimant au tube un léger piquage.
 - ✓ Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h_1 , de niveau supérieure de flocculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
 - ✓ Mesuré également avec la règle la hauteur h_2 compris entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

$$\mathbf{E_{sv}} = (h_2/h_1) 100\% \quad (\text{IV.16})$$

Avec : **h₁** : hauteur du sable plus flocculat.

h₂ : hauteur du sable.

✓ Introduire el piston dans l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment.

$$E_{sp} = (h'_2/h_1) 100\% \quad (IV.17)$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h'_2 : hauteur du sable.

➤ Interprétation des résultats

Tableau IV. 13: Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E_{sv} et E_{sp} .

E_{sv}	E_{sp}	Nature et qualité de sable
$Es < 65$	$Es < 60$	Sable argileuse : risque de retrait au de gonflement à rejeter pour des bitons de qualité.
$65 < Es < 75$	$65 < Es < 80$	Sable légèrement argileux : de propriétés admissible convient parfaitement pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 \leq Es \leq 85$	$70 \leq Es \leq 80$	Sable propre : à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
$Es \geq 85$	$Es > 85$	Sable très propre : l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

En a répété l'essai 03 fois, les résultats sont regroupés dans le tableau (13) ci-dessous :

Tableau IV. 14: Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de OUAD SOUF.

Hauteur (cm)	h_1	h_2	E_{sv} (%)	E_{svmoy} (%)	h'_2	E_{sp} (%)	E_{spmoy} (%)
Echantillon (1)	8.75	8.5	97.14	97.54	8.6	98.28	96.80
Echantillon (2)	8.8	8.6	97.72		8.5	96.59	
Echantillon (3)	9	8.8	97.77		8.6	95.55	

Tableau IV. 15: Résultats d'essais d'équivalent de sable concassée testé.

Hauteur (cm)	h_1	h_2	$E_{SV}(\%)$	$E_{SVmoy}(\%)$	h'_2	$E_{SP}(\%)$	$E_{SPmoy}(\%)$
Echantillon (1)	9.7	9.3	95.87	95.98	9.5	97.93	95.32
Echantillon (2)	10.4	9.9	95.19		9.8	94.23	
Echantillon (3)	9.7	9.4	96.90		9.1	93.81	

Le sable testé donne les résultats suivants :

Sable de OUAD SOUF

$E_{SV} = 97.54 (\%)$
 $E_{SP} = 96.80 (\%)$

Sable très propre : l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Sable concassée :

$E_{SV} = 95.98 (\%)$
 $E_{SP} = 95.32 (\%)$

Sable très propre : l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

VI. 3. 2.4 Caractéristiques physiques du sable

Il est nécessaire de déterminer tous les caractéristiques physiques pour le sable de dune .

Pour cela, une série des essais a été effectuée afin de bien caractérisé notre sable.

VI. 3. 2. 4. 1 Masse volumique apparent : NF P18-555

a. Masse volumique à l'état lâche

On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé et un récipient de capacité 1 ℓ .

On remplit l'entonnoir avec du sable sec.

On pèse le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.

On nivelle la surface du sable et on pèse le tout soit M_2 ce poids.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\gamma_L = (M_2 - M_1) / V_r \quad (\text{IV.19})$$

M_1 : Masse du récipient vide

M_2 : Masse du récipient plus le sable

V_r : Volume du récipient ($V_r = 0.9\ell$)

b. La porosité

$$P(\%) = [1 - (\gamma / \rho)] \times 100\% \quad (\text{IV.20})$$

➤ à l'état lâche

$$P_L(\%) = [1 - (\gamma_L / \rho_s)] \times 100\% \quad (\text{IV.21})$$

c. La compacité

$$C(\%) = 1 - P \quad (\text{IV.22})$$

➤ à l'état lâche

$$C_L(\%) = 1 - P_L \quad (\text{IV.23})$$

d. L'indice des vides:

$$e(\%) = p / (1 - p) \quad (\text{IV.24})$$

➤ à l'état lâche

$$e_L(\%) = P_L / (1 - P_L) \quad (\text{IV.25})$$

On note ici que les résultats présentés dans le tableau **IV.16** ci-dessous sont calculés comme moyennes des essais effectués en laboratoire après avoir fait l'échantillonnage.

Les commentaires concernant les propriétés physiques, mentionnés dans le tableau, sont tirés d'après une étude de caractérisation du sable, les rapports et projets de recherches réalisées au sein du département de génie civil, université Mouhamed Boudiaf Msila.

Tableau IV. 16 : Caractéristiques physiques du sable d'OUED SOUF et sable concassé.

Propriété	Sable	Concassé	Commentaire
Provenance	OUED SOUF	Région Bourdj bouririg	Ce site se trouve dans un lieu accessible pour tous les utilisateurs.
Classe	0/5	0/5	Le sable est tamisé in situ.
Nature minéralogique	Siliceux	calcaire	La silice représente plus de 90% d'après l'analyse chimique.
Masse volumique apparente	1,602	1.479	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Masse volumique absolue	2,550	2.70	Un sable performance pour l'utilisation ordinaire.
Masse volumique	1,602	1,479	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire et haute performance..
Compacité	62%	54.7%
Porosité	38%	45.3%	Le sable est peu poreux.
Indice des vides	38.8%	17.18%
Degré d'absorption	4.279%

VI. 3. 3 Caractéristiques du ciment utilisé

VI. 3. 3. 1 Présentation du ciment GICA

C'est un ciment CEM I/ 42.5 ES, provient de la cimenterie de AIN EL KBIRA Wilaya de STIFE. Il gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle 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.



Figure IV. 3 : Sac ciment CRS- CEM I /42.5 ES

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 constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés (C-S-H).

GICA présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 443 :2002.

VI. 3. 3. 2 Analyses et caractérisation

Tous les résultats mentionnés ci-après sont tirés à partir de la fiche technique du ciment GICA obtenue par le fournisseur.

Tableau IV. 17: Composition minéralogique du clinker.

Composantes	Valeur (%)
Silicates tricalciques C3S	63.26
Silicates bicalsiques C2S	14.43
Aluminates tricalciques C3A	2.49
Aluminoferrites tetracalsiques C4AF	15.9

Tableau IV. 18: Analyse chimiques du ciment GICA

Composantes	Valeur (%)	Norme
Teneur en sulfates SO ₃	1.96	NA 5042
Teneur en oxyde de magnésium MgO	1.61	
Teneur en chlorures	0.00	
Le dioxyde de silicium	21.58	
Résidus insolubles	0.8	
Teneur en alumine Al ₂ O ₃	4.87	
Fe ₂ O ₃	5.56	
CaO	63.18	
K ₂ O	0.33	
Pert de feu	0.91	

Tableau IV. 19 : Propriétés physiques du ciment utilisé.

Propriété	Valeur
Consistance normale	20 à 25.6 (%)
Surface spécifique Blaine	3247 (cm ² /g)
Retrait à 28 jours	<1000 (µm/m)
Expansion	0.3 à 2.5 (mm)
Masse volumique apparente	1.005 (kg/dm ³)
Masse volumique spécifique	3.02 (kg/dm ³)

Tableau IV. 20: Temps de prise à 20°C.

Temps de prise	Temps (min)	Norme
Début de prise	130 à 175	NA 232
Fin de prise	260 à 265	

Tableau IV. 21 : Résistance mécanique à la compression.

Age de l'éprouvette	Résistance à la compression (MPa)	Norme
02 jours	≥ 10.0	NA 442
28 jours	≥ 40	

VI. 3. 3. 2 Domaines d'utilisation

Le ciment CEM I 42, 5 de La SCAEK Convient pour :

- ✓ Les bétons armés et non armés, Préfabriqués ou précontraints, étuvés et auto étuvés.
- ✓ Les bétons prêts à l'emploi ;
- ✓ Le génie Civil (ouvrages et routes).

- ✓ Les travaux de construction (Logements, locaux commerciaux et Industriels).
- ✓ Les produits dérivés de ciment.
- ✓ Les mortiers pour chapes et crépis.
- ✓ pour les milieux fortement agressifs.

Le ciment CEM I/ 42,5 de La SCAEK répond aux exigences de la norme NA 442 :2000.

VI. 3. 4 L'eau de gâchage : [NA EN 1008]

Nous avons utilisés pour le gâchage de notre béton l'eau de robinet disponible au niveau de notre université,

IV.4 Adjuvant

On a utilisé dans notre projet de recherche pour cette étude un adjuvant MEDAFLUID 40 et MEDAFLOW 30.

IV.4.1 MEDAFLUID40

IV.4.1. 1 DESCRIPTION

Le MEDAFLUID 40 est un plastifiant réducteur d'eau. il est compatible avec tous les types de ciment.

IV.4.1. 2 Domaine d'application

Le medafluid40 est recommandé pour la confection des bétons suivants :

- ✓ Béton pompé sans forme de ségrégation.
- ✓ Béton de masse
- ✓ Béton BCR

IV.4.1. 3 Propriétés

Tableau IV. 22 : Propriétés de MEDAFLUID40.

Béton frais	Béton durci
Diminuer le rapport E/C	Augmenter les résistances mécaniques
Augmenter le slump	Augmenter la compacité
Faciliter la mise en œuvre	Augmenter la durabilité
viter la ségrégation	Augmenter l'imperméabilité

IV.4.1.4 Caractéristiques

Tableau IV. 23 : Caractéristiques de MEDAFLUID40.

Aspect	Liquide
Couleur	Marron
PH	8/9
Densité	1.19 ± 0.01
Teneur en chlore	<0.1 g/l
Extrait sec	40%

IV.4.1.6 Dosage

Plage de dosage recommandée :

0.8 à 2.0 % du poids de ciment. Soit 0.67 L à 1.68 L d'adjuvant pour 100 Kg de ciment.

Des dosages supérieurs à 1.5% du poids de ciment (soit 1.2 L d'adjuvant par 100 Kg de ciment) permettent d'obtenir un retard de début de prise du ciment.

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

IV.4.2 MEDAFLOW 30

IV.4.2.1 Description

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de troisième génération. Il est conçu à base de polycarboylates d'éther qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

IV.4.2.2 Domaine d'application

- ✓ Bétons à hautes performances
- ✓ Béton auto-plaçant
- ✓ Béton pompés, Bétons précontraints

IV.4.2.3 Propriétés

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

Tableau IV. 24: Propriétés MEDAFLOW30.

Béton frais	Béton durci
Obtention d'un rapport E/C très faible	Augmenter les résistances mécaniques
Amélioration considérable de la fluidité	Diminuer la porosité
Une très bonne maniabilité	Augmenter la durabilité
Eviter la ségrégation	Diminuer le retrait et le risque de fissuration
Faciliter la mise en œuvre du béton	

IV.4.2.4 Caractéristiques

Tableau IV. 25: Caractéristique MEDAFLOW30.

Aspect	Liquide
couleur	Brun claire
pH	6-6.5
densité	1.07±0.01
Teneur en chlore	<0.1g/l
Extrait sec	30%

IV.4.2.5 Dosage

Plage de dosage recommandée :

0.5 à 2.0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

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

IV.5 L'ajout cimentaires : La fumée de silice

➤ MEDAPLAST HP : NFP 18-502

Le MEDAPLAST HP est un ajout en poudre pour confection de bétons à hautes performances (BHP). Il permet :

- ✓ D'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées.
- ✓ D'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques .

Domaines d'application :

- ✓ Bétons à haute performances
- ✓ Ouvrage d'art, ouvrage hydrauliques
- ✓ Bétons soumis aux impacts et aux chocs
- ✓ Silos

Propriétés :

Tableau IV. 26: Les propriétés d'un MEDAPLAST HP

Béton frais	Béton durci
-Améliorer la cohésion -Eviter le ressuage et la ségrégation	-Augmenter les résistances mécaniques et la durabilité -Augmenter la résistance à l'érosion et à l'abrasion - Obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques

➤ La composition chimique de fumée de silice

Tableau IV. 27: La composition chimique d'un MEDAPLAST HP

Ajout	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	k ₂ O	cl	P.A.F
Fumée de silice	88,72	0,78	2,54	/	3.70	1,06	2,817	0,141	/

➤ La caractéristique physique

Tableau IV. 28 : La caractéristique physique d'un MEDAPLAST HP.

La masse volumique apparente	0.743Kg/m ³
La masse volumique absolue	2.43 Kg/m ³
Surface superficielle de blaine	2800

IV.6 Composition du béton

➤ **But :**

Déterminer les proportions de ciment, d'eau, de granulats et sable éventuels devant entrer dans la composition d'un béton dont on exige certaines performances.

IV.6.1 Méthode de L'Université de Sherbrooke

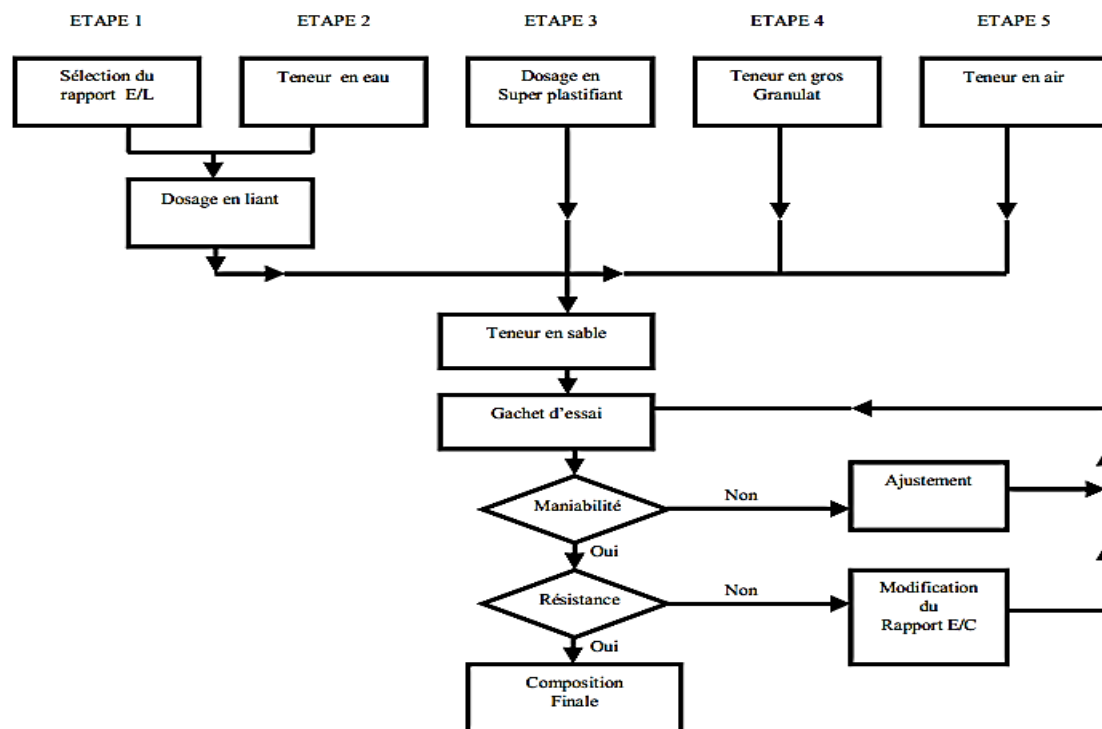


Figure IV. 4: Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP [96]

La somme de tous les matériaux composants pour un dosage de 1m³ de béton frais est à 1000 litres.

La méthode de formulation développée à l'université de Sherbrooke permet de formuler un BHP sans air entraîné, elle peut aussi être utilisée pour formuler un BHP à air entraîné à condition de tenir compte de la réduction de la résistance à la compression due à la présence du réseau de bulles d'air contenu dans le béton. [96] Cette méthode très simple suit la même approche que la norme ACI 211-1. IL S'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basée sur la méthode des volumes absolus. La quantité d'eau contenue dans le super plastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage. L'organigramme de cette méthode est présenté dans la figure ci-dessous figure IV.6:

La procédure de formulation commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés:

- ✓ Le rapport eau / liant;
- ✓ Le dosage en eau ;
- ✓ Le dosage en super plastifiant;
- ✓ Le dosage en gros granulat;
- ✓ La teneur en air.

Tous les calculs nécessaires à la formulation d'un BHP sont présents sur une seule feuille de calcul.

IV.6.2 Rapport eau/liant

On peut trouver le rapport eau /liant en utilisant la figure IV.5 pour des bétons ayant une résistance à la compression donnée à 28 jours. Le fuseau de la figure IV.5 donne une gamme relativement étendue de rapport eau/ciment pour une résistance donnée. Si l'on ne connaît pas l'efficacité du liant que l'on utilise, on peut commencer par prendre la valeur moyenne donnée par ce fuseau. [96]

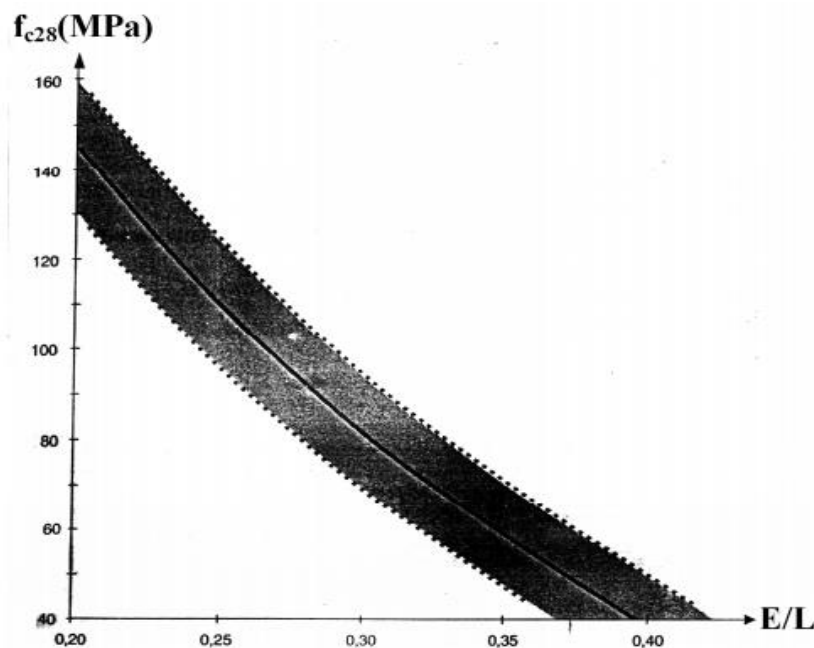


Figure IV. 5: relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression [11].

IV.6.3 Dosage en eau

Une des plus grandes difficultés rencontrées lorsque l'on calcule la composition d'un BHP est de déterminer la quantité d'eau qu'il va falloir utiliser pour fabriquer un béton qui aura un affaissement de 200 mm plus d'une heure après son malaxage. En effet, la maniabilité d'un BHP est contrôlée par plusieurs facteurs: la quantité initiale d'eau, la réactivité du ciment, la quantité de super plastifiant et son degré de compatibilité avec ce ciment particulier. [96]

Point de saturation	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	%
Dosage en eau	120 à 125	125 à 135	135 à 145	145 à 155	155 à 165	l/m^3

Figure IV. 6: Détermination du dosage en eau [11]

IV.6.4 Dosage en superplastifiant

Le dosage en super plastifiant se déduit du dosage au point de saturation. Si l'on ne connaît pas le point de saturation, on peut toujours commencer avec un dosage en super plastifiant égale à 1.0%.

IV.6.4.1 Point de saturation

Quand on mesure le temps d'écoulement pour différents dosages en super plastifiant à différents instants et que l'on exprime ce dosage sous forme de pourcentage de solides contenus dans le super plastifiant par rapport à la masse de ciment, on obtient une courbe qui ressemble en général à celle présentée à la figure IV.6. Cette courbe est composée de deux parties linéaires ayant des pentes différentes. L'intersection de ces deux parties linéaire est ce que l'on appelle le " point de saturation ", c'est-à-dire le point à partir duquel, dans les conditions expérimentales de mesure, toute augmentation du dosage en super plastifiant n'a plus de répercussion sensible sur la rhéologie du coulis. Le dosage en super plastifiant qui correspond à ce point est appelé le point de saturation.

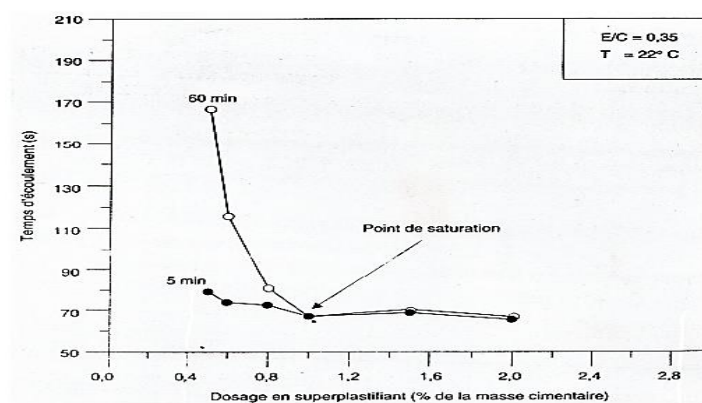


Figure IV. 7: Temps d'écoulement en fonction du dosage en super plastifiant [96]

IV.6.5 Dosage en gros granulat

Le dosage en gros granulat peut être déduit de la figure IV.8 en fonction de la forme des granulats. S'il y a quelque doute sur la forme des granulats ou si on ne la connaît pas, on peut toujours commencer avec une quantité de gros granulats de 1000 kg/m³.

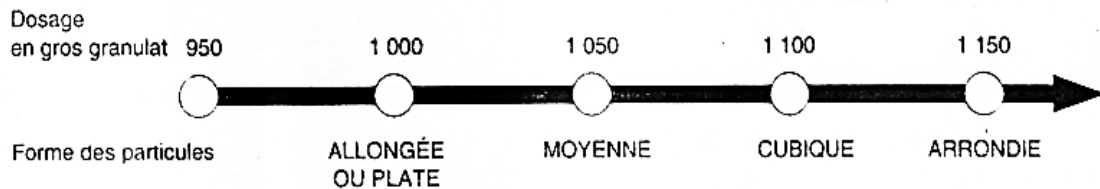


Figure IV. 8 : Dosage en gros granulat [96]

IV.6.6 Teneur en air

Les BHP qui sont utilisés dans des environnements où il n'y a pas de cycle de gel dégel n'ont évidemment pas besoin de contenir de l'air entraîné, de telle sorte que la seule quantité d'air que l'on retrouvera dans les BHP est le volume d'air piégé. Cependant, de façon à améliorer la manipulation et la mise en place des BHP. [96]

L'expérience a démontré qu'il était assez difficile de fabriquer des BHP qui contiennent moins de 1% d'air piégé et que, dans les pires des cas, la teneur en air piégé peut être aussi élevée que de 3%. Par conséquent, certains auteurs suggèrent d'utiliser une valeur de 1.5% comme valeur initiale de la quantité d'air piégé. [96]

IV.6.7 Feuille de calcul

Tous les calculs nécessaires à la formulation d'un BHP sont présents sur une seule feuille de calcul.

Avant de présenter la pratique de la méthode, les paragraphes ci-dessous expliquent les calculs détaillés qu'il faut effectuer pour remplir chacune des cases de la feuille de calcul

Calculs:

Case1: Reporter la valeur du rapport eau/liant telle que choisie à la figure

Case2: Ecrire la quantité d'eau nécessaire, selon la figure.

Case3: calculer la masse de liant.

Case 4: calculer la masse de chaque ajout cimentaire nécessaire.

Case5: Reporter la masse un gros granulat trouvé à la figure.

Case6: Ecrire la quantité d'aire piégée que l'on prévoit obtenir dans le BHP.

Case7: Ecrire la quantité de superplastifiant qu'il sera nécessaire d'utiliser en se basant sur la valeur du point de saturation.

A cette étape, la seule information manquante est la masse de granulat fin qu'il faut utiliser. Cette valeur peut se calculer par la méthode des volumes absolus, c'est-à-dire que l'on soustrait de 1m^3 le volume de tous les ingrédients déjà sélectionnés de façon à trouver le volume restant pour le granulat fin, ce qui se fait dans la colonne 2.

Case 8-1,8-2,8-3: calculer les volumes des différents ajouts cimentaires.

Case9: calculer le volume de gros granulat.

Case10: Multiplier la quantité d'air par 10 pour obtenir le volume d'air piégée en l/m^3 .

Case11: calculer le volume V_{sol} .

Case12: inscrire la somme de tous les volumes déjà calculés.

Case13: calculer le volume de granulat fin en l/m^3

Case14: calculer la masse de granulat fin.

Case15: calculer la masse de solides dans le superplastifiant M_{sol} .

Case16: calculer le totale de toutes les masses, pour obtenir la masse volumique du béton.

Jusqu'à présent, les masses de granulats ont toujours été calculées dans des conditions SSS. Il faut donc corriger le dosage en eau de gâchage.

Case17: Multiplier la masse SSS du gros granulat par $(1+Eh/100)$.

Case18: Soustraire la valeur trouvée à la case 17 de la valeur de la case 5.

Case19: Calculer la masse SSS du granulat fin.

Case20: Soustraire la valeur apparaissant dans la case 19 de celle apparaissant dans la case 14. (Écrire la valeur en signe négatif)

Case21: Ecrire la quantité d'eau contenue dans le superplastifiant (le signe négatif apparaît déjà dans cette case).

Case22: Ajouter algébriquement toutes les corrections d'eau. La composition finale de 1m^3 de béton avec des granulats humides est maintenant calculée dans la colonne 5.

Case23: Ajouter la correction de l'eau.

Case24: Ecrire le dosage en superplastifiant V_{liq} .

Gâchée d'essais : (Colonne 6)

Il nécessaire de fabriquer de (x) kg de béton, ce qui reprisant $(x)/\text{case16} = (f) \text{m}^3$ donc toutes les valeurs de la colonne (5) doivent être multipliées par (f) .

Case25 à 29 : Multiplier les valeurs de la colonne 5 par le facteur f .

Case30: Calculer la masse de la gâchée d'essai en additionnant les masses des différents ingrédients du béton que l'on retrouve dans les cases 25 à 29.

Composition d'un béton à haute performance

La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke

Gâchée : F_{c28} : Mpa

Tableau IV. 29 : Composition d'un BHP.

Matériaux	Teneur Kg/m	Volume L/m3	Dosage état SSS kg/m3	Correction D'humidité L/m3	Composition		
					1 m3	Gâchée d'essais	
Eau	E/L 1	2	2		23	25	
ciment	=	4	4		4	26	
	3	4	4		4	26	
		4	4		4	26	
Gros granulat	5	9	5	18	17	27	
Granulat fin		13	14	20	19	28	
Air	POURCENTAGE	10	-				
	% 6						
Super plastifiant	% 7	11	15	21	24	29	
Total		12	16	22		30	
SUPERPLASTIFIANT							
Densité (Gsup)	Teneur en solides (s) (%)	Msol = c*d/100	Vliq= Msol*100/s* Gsup	VE= Vliq*Gsup *(100-s)/100	Vsol=V lq-VE		
		15	24	21	11		
	Gs	%		%			
ciment			Granulat	G _{SSS}	E _{abs}	E _{tot}	E _h
Fumée de silice			Gros				
			Fin				

$$M = M_{SSS}(1 + E_h) \quad (IV.26)$$

$$E_h = E_{tot} - E_{abs} \quad (IV.27)$$

La feuille de calcul utilise les symboles suivants:

d_c : densité du ciment ou des ajouts cimentaires

d_{sss} : densité des granulats à l'état saturé superficiellement sec

E_{abs} : quantité d'eau absorbée dans les granulats (en pour cent)

E_{tot} : teneur en eau totale des granulats (en pour cent)

E_h : humidité des granulats (en pour cent)

d_{sup} : densité du super plastifiant liquide

s : teneur en solides du super plastifiant (en pour cent)

M_{sol} : masse de solides dans super plastifiant

d : dosage du super plastifiant exprimée sous forme de pourcentage de la masse de solide par rapport à la masse de matériaux cimentaires.

V_{liq} : volume de super plastifiant liquide

V_E : volume d'eau dans le super plastifiant

V_{sol} : volume de solides dans le super plastifiant

E : masse d'eau en kg/m^3 dans le béton

L : masse de liant par mètre cube de béton

IV.6.8 Granulats à l'état saturé superficiellement sec (SSS)

Par convention, en Amérique du nord, l'état de référence des granulats est appelé l'état **saturé superficiellement sec** (état SSS). Cet état est défini dans la norme ASTM C127 pour le gros granulat et dans la norme ASTM C128 pour le granulat fin.

Pour obtenir et mesurer l'état **saturé superficiellement sec** (état SSS), en laissant les gros granulats immergés dans de l'eau pendant 24 heures, en les essuyant et en séchant ensuite jusqu'à la masse constante dans une étuve.

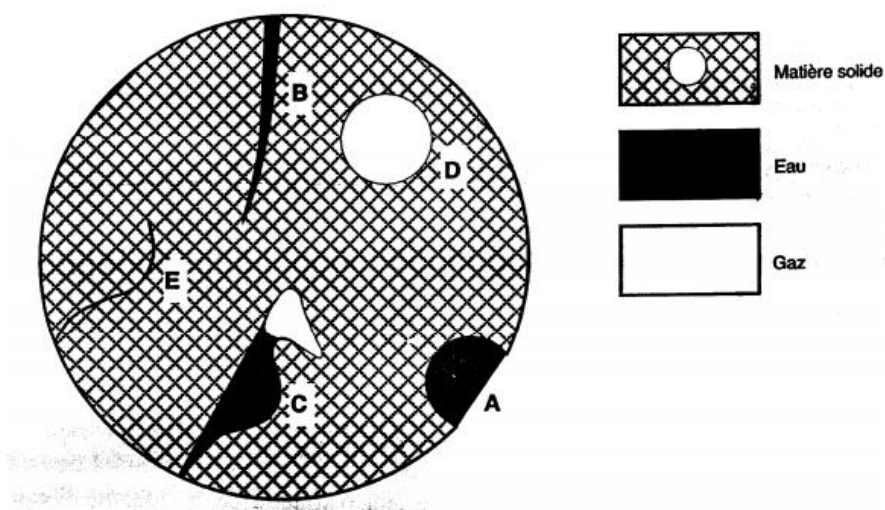


Figure IV. 9 : Représentation schématique d'un granulat à l'état SSS. [96].

L'état **saturé superficiellement sec** (état SSS) du granulat fin est atteint lorsqu'un petit tronc de cône de sable s'affaisse par suite des forces de capillarité entre les grains de sable humide qui ne sont plus suffisamment fortes pour assurer la cohésion du cône.

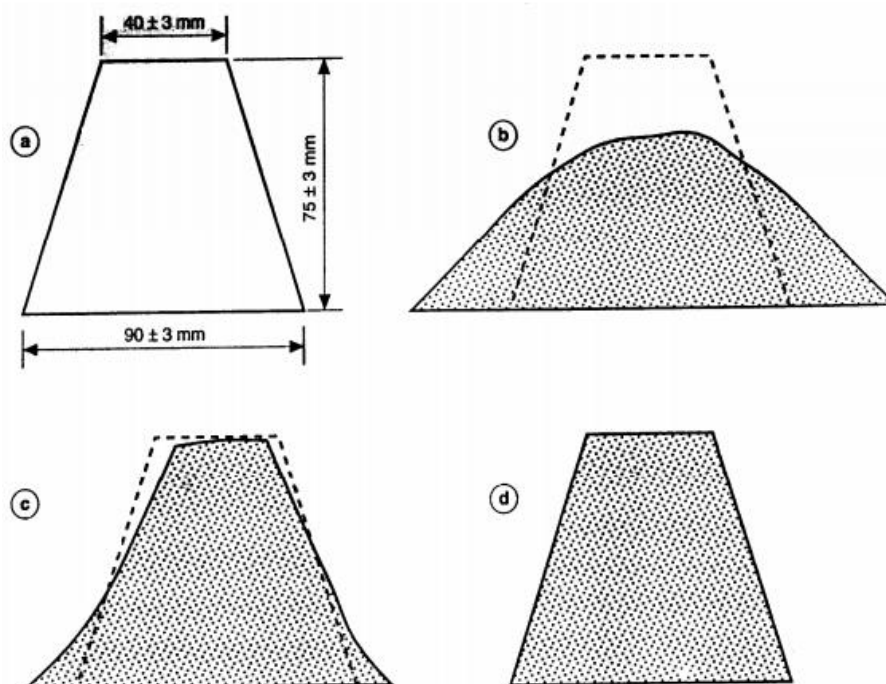


Figure IV. 10 : Détermination de l'état SSS pour un sable. [96]

- a) Utilisation du minicône normalisé.
- b) Sable ayant une teneur en eau inférieure à l'état SSS.
- c) Sable à l'état SSS.
- d) Sable ayant une teneur en eau supérieure à l'état SSS.

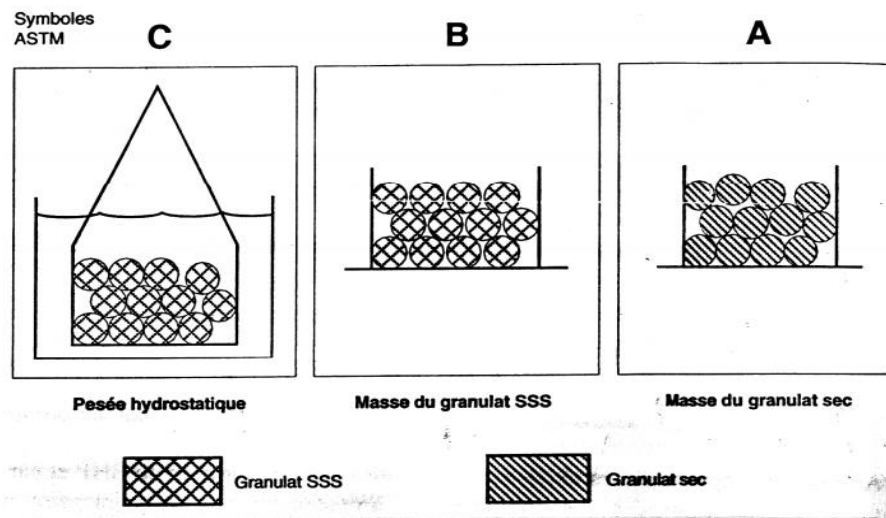
IV.6.8.1 Teneur en eau totale d'un granulat (E_{tot})

Figure IV. 11: Représentation schématique de la mesure de l'absorption et de la densité d'un gros granulat à l'état SSS. [96]

Est définie comme étant la quantité d'eau évaporable divisée par la masse sèche du granulat et elle s'exprime en pourcentage. Pour mesurer cette valeur, il suffit de placer une certaine quantité de sable humide ou de granulat humide dans une étuve à 105°C et de peser le granulat lorsqu'il a atteint une masse constante [96].

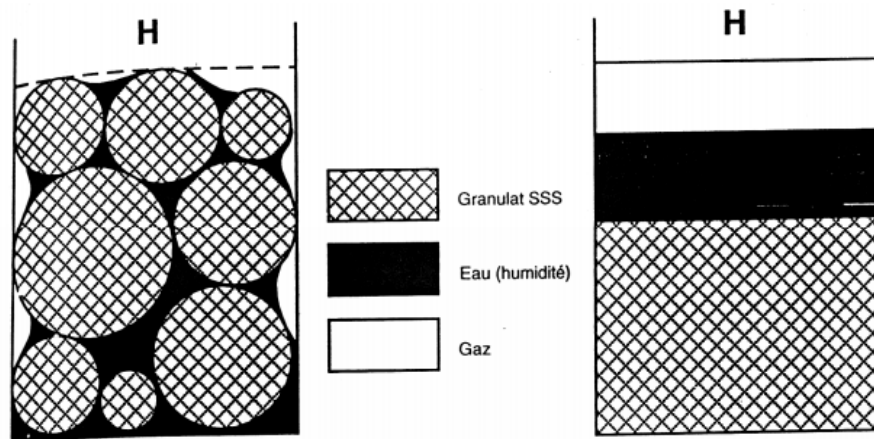


Figure IV. 12 : Représentation schématique d'un granulat mouillé. [96]

La teneur en eau totale, E_{tot} est définie comme suite:

$$E_{tot} = \frac{H-A}{A} \cdot 100 \quad (IV.28)$$

H : Masse des granulats humides.

A : Masse des granulats secs.

IV.6.8.2 Teneur en eau absorbée d'un granulat (E_{abs})

L'absorption d'un granulat, est égale à :

$$E_{abs} = \frac{B-A}{A} \cdot 100 \quad (IV.29)$$

B : Masse des granulats à l'état SSS.

A : Masse des granulats secs.

IV.6.8.3 Densité d'un granulat (SSS)

La densité SSS d'un granulat correspond à la densité du granulat lorsqu'il est à l'état SSS. Voir la figure V-20

$$d_{SSS} = \frac{B}{B-C} \quad (IV.30)$$

B : Masse des granulats à l'état SSS.

C : Pesée hydrostatique des granulats

IV.7 Teneur en superplastifiant

Il est toujours préférable d'exprimer la teneur en super plastifiant en pourcentage de solides par rapport à la masse de ciment parce que les super plastifiants commerciaux n'ont pas la même teneur en solides (actifs) ni la même densité [96].

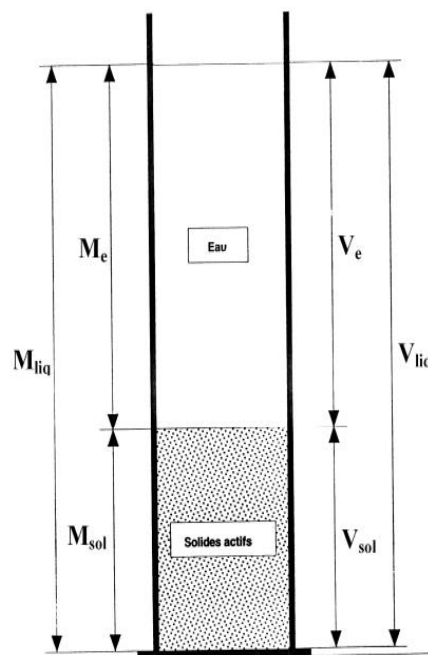


Figure IV. 13 : Représentation schématique d'un super plastifiant [96]

a- Densité d'un super plastifiant:

En utilisant les notations qui apparaissent à la figure V-23, la densité est égale à :

$$d_{\text{sup}} = \frac{M_{\text{liq}}}{V_{\text{liq}}} \quad (\text{IV.31})$$

M_{liq} : Masse de liquide de super plastifiant.

V_{liq} : volume de super plastifiant liquide.

Teneur en solides:

Elle est égale à :

$$S = \frac{M_{\text{sol}}}{M_{\text{liq}}} \cdot 100 \quad (\text{IV.32})$$

IV.7.1 Masse d'eau contenue dans un certain volume de super plastifiant

Lorsque l'on ajoute plusieurs litres de super plastifiant dans un béton, il faut tenir compte de la quantité d'eau que l'on ajoute ainsi, de façon à pouvoir calculer le rapport (eau / liant) réel du béton. Il est donc nécessaire de savoir calculer la quantité d'eau contenue dans un certain volume de super plastifiant.

$$M_E = \frac{V_{\text{liq}} \cdot d_{\text{sup}}}{s} \cdot (100 - s). \quad (\text{IV.33})$$

Lorsque l'on utilise les unités g et cm³ ou kg et L, on peut alors exprimer M_E et V_E par la même valeur:

$$V_E = \frac{V_{\text{liq}} \cdot d_{\text{sup}}}{s} \cdot (100 - s) \quad (\text{IV.34})$$

d_{sup} : Densité du superplastifiant.

s : Teneur en solides de superplastifiant.

V_{liq} : volume de super plastifiant liquide.

IV.7.2 Masse des particules solides et volume de super plastifiant nécessaire

Si C est la masse de liant utilisée dans un béton et si d est le dosage en super plastifiant suggéré par le fabricant, alors la masse de solides est:

$$M_{\text{sol}} = \frac{c \cdot d}{100} \quad (\text{IV.35})$$

C : est la masse de liant.

d : est le dosage en super plastifiant (la masse de solides)

Le volume de super plastifiant liquide qui contient M_{sol} se calcule de la façon suivant:

$$V_{liq} = \frac{M_{sol}}{s \cdot d_{sup}} \cdot 100 \quad (IV.36)$$

M_{sol} : Masse des particules solides de super plastifiant

d_{sup} : Densité du super plastifiant

s : Teneur en solides de superplastifiant.

IV.7.3 Volume des solides contenus dans V_{liq}

$$V_{sol} = V_{liq} \cdot \left(1 - d_{sup} \cdot \frac{100-s}{100}\right) \quad (IV.37)$$

d_{sup} : Densité du super plastifiant

s : Teneur en solides de superplastifiant.

V_{liq} : volume de super plastifiant liquide

L'étude a été menée sur cinq types des compositions des bétons suivantes :

BHP_T: béton à haute performance, 8% fumée de silice sans adjuvants.

BHPI_{0,5}: béton à haute performance, 8% fumée de silice avec 0.5% MEDAFLOW30.

BHPI₁: béton à haute performance, 8% fumée de silice avec 1% MEDAFLOW30.

BHPI_{1,5}: béton à haute performance, 8% fumée de silice avec 1.5% MEDAFLOW30.

BHPII_{0,5}: béton à haute performance, 8% fumée de silice avec 0.5% MEDAFLUID40.

BHPII₁: béton à haute performance, 8% fumée de silice avec 1% MEDAFLUID40.

BHPII_{1,5}: béton à haute performance, 8% fumée de silice avec 1.5% MEDAFLUID40.

Type et composition des différents bétons:

Composition d'un béton à haute performance sans adjuvant

La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke.

Gâchée **F_{c28} : 60 MPa** :

Tableau IV. 30 : Composition d'un BHP 0%

Matériaux		Teneur Kg/m3		Volume L/m3	Dosage état SSS kg/m3	Correction D'humidité L/m3	Composition			
							1 m3		Gâchée d'essais	
Eau	E/L = 0.35	117.5		117.5	117.5		152.8	3.056		
ciment	0.35	335.71	308.6	106.23	308.6		308.6	6.172		
			26.8	11.04	26.85		26.85	0.537		
Fumée de silice										
Gros granulat		1075		428.28	1075	+6.3	1068.7	21.37	16.07	5.943
Granulat fin		884.87		324.95	884.87	+29	855.87	17.11	10.27	6.85
Air	POURCENTAGE	1.5%			0					
Super plastifiant		0%		-	-	-	-			-
Total				1000	2412.8	+35.3			48.855	
SUPERPLASTIFIANT										
Densité (Gsup)	Teneur en solides (s) (%)	Msol = c*d/100		Vliq = Msol*100/s* Gsup		VE = Vliq*Gsup *(100-s)/100		Vsol = Vliq-VE		
0	0	0		0		0		0		
	Gs	%				%				
ciment	3.16	92		Granulat		G _{SSS}	E _{abs}	E _{tot}	E _h	
Fumée de silice	2.43	8		Gros		2.51	+6.3	0	-6.3	
				Fin		2.60	4.25	0	-4.25	

Tableau IV. 31 : Les quantités des matériaux à chaque pourcentage des adjuvants

Quantité de matériaux (Kg/m ³)	BHP _T	BHPI _{0,5}	BHPI ₁	BHPI _{1,5}	BHPII _{0,5}	BHPII ₁	BHPII _{1,5}
ciment	308.6	309	368	433.7	309	368	433.7
Fumée de silice	26.85	27	32	37.71	27	32	37.71
Sable concassée	531	500	443	364	500.5	445	360
Sable de dune	354	333.5	296	243	334	297	240.5
Gravier 3/8	269	269	269	269	269	269	269
Gravier 8/16	806	806	806	806	806	806	806
eau	160	117.5	140	165	117.5	140	165
adjuvants	0	5.20	12.5	22.02	3.5	8.403	14.886

IV.8 Matériels et essais

IV.8.1 Les essais sur le béton à l'état frais

Après avoir calculé théoriquement les compositions des différentes classes du béton, en va passer à la confection des éprouvettes de chaque classe et les effectuer les essais nécessaire commencent par celle à l'état frais.

a. Le malaxage : P18-404

Les constituants sont introduits dans le malaxeur à l'ordre suivant :

- ✓ Gros éléments,
- ✓ Liant,
- ✓ Sable,
- ✓ Après un malaxage à sec de l'ordre de 1 min,
- ✓ Ajouter l'eau de gâchage et poursuivre le malaxage pendant 2 min,
- ✓ Mesurer l'affaissement à chaque fois par cône d'Abrams jusqu'à la valeur désiré.

b. Affaissement au cône d'Abrams (slump test) : NF P18-305

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

- ✓ Introduire le béton dans le moule légèrement humidifié et huilé en trois couches d'égales.



Figure IV. 14 : Mesure de l'affaissement.

- ✓ 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

c. 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 $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$.
- ✓ On 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.

IV.8.2 Les essais sur le béton a l'état durci

Le béton est considéré comme un solide monolithique après achèvement de la prise c'est un matériau perpétuelle évolution ceci pour plusieurs raison parmi lesquelles :

- ✓ La poursuite des réactions d'hydratation du ciment pendant plusieurs années notamment, la cohésion et les dimensions du matériau.
- ✓ Les variations du milieu ambiant engendrent des changements lents dans la structure du béton durci.

a. Durcissement de béton

Le durcissement d'un béton avec le temps est essentiellement à l'hydratation progression du ciment.

Il bien connu que la progression des résistances mécaniques d'un béton se fait de plus en plus lentement lorsque le passe ceci peut expliquer par le fait que la vitesse d'hydratation des grains de ciment décrois elle-même avec le temps.

b. Mode de conservation de béton

Le degré d'humide du milieu de conservation a une influence importante sur la résistance du béton.

Les éprouvettes cylindriques sont conservées dans l'eau à une température de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ$.

c. La résistance à la compression (essai d'écrasement): NF P18-411

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton.

La détermination de cette résistance est nécessaire pour contrôler cette qualité essentielle de notre du béton.

d. La presse hydraulique

La presse utilisée répond aux normes NF P18-411, elle comporte deux parties :

- Unité de commande constituée de :
 - ✓ Un cadrant pour valeur maximal de charge ;
 - ✓ Interrupteur principal ;
 - ✓ Commande de réglage de la vitesse ;
 - ✓ Clapet de charge-décharge.

- Unité de pression : où on met l'éprouvette d'essai.



Figure IV. 15 : Presse hydraulique.

Description générale de l'essai : NF P18-411

L'essai lui-même doit être conduit rigoureusement pour obtenir de bons résultats. On observera en particulier :

- ✓ Un bon centrage de l'éprouvette.
- ✓ Une vitesse de chargement donnée.
- ✓ On met la presse en marche de nouveau avec la même vitesse (0.5 KN/S) jusqu'à la rupture, on décharge et on note la charge de rupture **F** et la résistance **R_c**.

On calcule la résistance avec cette formule :

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (IV.38)$$

R_c: résistance à la compression (MPa).

F : la charge de rupture (N).

S : section de l'éprouvette (mm²).

IV.8.3 Essais non destructive : P18-418 EN 12504-4

a. Essais d'auscultation sonique

➤ Principe:

Il s'agit d'évaluer la résistance du béton à partir de la vitesse de propagation d'ondes. Il est en effet reconnu et prouvé qu'il existe un rapport étroit entre la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à l'intérieur de matériaux homogènes, et la qualité de ceux-ci .

La vitesse est le quotient entre la distance séparant les transducteurs émetteur et récepteur par le temps de propagation de l'onde.



Figure IV. 16 : Appareil à ultrasons hautes performances et ses équipements.

En a effectuer les mesures sur les éprouvettes après les faire sortir du bac de conservation et laisser sécher pendant 24h. Les éprouvettes cubiques sont préparées pour effectuer des essais d'auscultation dynamique. Cette préparation 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.

b. Essais de dureté par rebondissement scléromètre:P18-417EN 12504-2

➤ Description de l'essai

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. 17 : Scléromètre.

Cet indice, reporté sur abaque, permet de déduire la résistance à la compression du béton testé.

On place l'éprouvette entre les plateaux de la presse on applique la vitesse constante (0,5MPa/s) jusqu'à ce que la charge atteinte $10 \approx 20$ KN, puis on fait l'essai sclérométrique horizontal 5 coups en avant.



Figure IV. 18: Exécution de l'essai sclérométrique.

IV.9 Module d'élasticité dynamique

A partir de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, il est possible de calculer le module d'élasticité dynamique (E_d) selon l'expression suivante :

$$E_d = ((\rho \times v^2) / g) \times 10^{-2} \quad (\text{IV.39})$$

Avec :

V : la vitesse ultrasonique (Km/s).

ρ : la densité du béton (Kg/m^3).

g : la vitesse gravitationnelle (9.81 m/s^2).

IV.10 Mesure le taux d'absorption d'eau: EN 1097

a. Objet

La présente norme a pour objet d'exposer la technique de la mesure du coefficient d'absorption d'eau des agrégats.

b. Méthode d'essai

b.1 Préparation des éprouvettes

Dans notre travail nous avons utilisés l'éprouvette coupée en trois coups.

Avant tout essai, les éprouvettes sont séchées à la température de 105°C jusqu'à masse constante. On considère que cette masse est atteinte lorsque l'écart entre deux pesées effectuées à une heure d'intervalle est au plus égale à 1/1000 (Généralement, il suffit de 15heures à l'étuve pour éteindre cette masse).

Par la suite la précision admise sur les pesées est de 1/1000.

b.2 Expression des résultats

L'absorption d'eau à la pression atmosphérique est $M_2 - M_1$.

Alors le taux d'absorption sera calculer a partir cette formule :

$$A_{bs} = (M_2 - M_1) / M_1 \quad (IV.40)$$

A_{bs} : taux d'absorption.

M_1 : masse d'éprouvette après l'étuvage.

M_2 : masse d'éprouvette saturée d'eau.

IV.11 Porosité : ASTM - C642

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

Le but de cette méthode est de déterminer pourcentage de volume des pores contenus dans l'éprouvette, afin de connaitre l'influence de la structure interne du béton sur l'interconnexion des pores.

➤ Mode d'essai

✓ Séchage la étuve a 1050C 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'échantillonnage l'air (soit C ce point) puis pesage a l'eau (pesée hydrostatique, soit D ce point).



Figure IV. 19 Pesé hydrostatique

➤ **Calcul de la porosité**

Calculer par la formule :

$$V_p = \frac{C-A}{C-D} \cdot 100 \quad (\text{IV.41})$$

V_p : volume des vides.

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

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

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

IV.12 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les facteurs qui sont à prendre en compte dans l'étude de la composition d'un béton sont nombreux commençant par la méthode de formulation, les propriétés à l'état frais; mode de conservation ainsi que les propriétés à l'état durci soit par l'ultrason, scléromètre ou bien l'écrasement ce qui est étudié en détailles dans

Ce chapitre. Nous avons fait et d'identification des matériaux utilisés dans ce projet suivant les normes en vigueur. Les résultats obtenus sont conformes à des matériaux pouvant être introduits dans la composition des bétons de haute performance.

Chapitre V

Résultats

Et

Discussion

V.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter les résultats obtenus par les essais de compression et les essais non destructifs (ultrasons, scléromètre). Dans l'analyse de ces résultats on va baser sur l'étude statistique pour trouver une corrélation entre les essais de compression et les essais non destructifs (ultrasons, scléromètre).

V.2 Méthodologie adaptée pour les manipulations

Rappelons que le but de notre travail est la formulation et la caractérisation aux moyens des essais non destructifs (END) et essais direct d'un béton haute performance adjuvanté à base des matériaux locaux. Pour atteindre les objectifs on a adoptée pour les essais proposés la méthodologie suivante :

- ✓ Il fallait préparer des gâchés pour confectionner 96 éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10$) cm^3 , et 07 éprouvettes prismatiques ($10 \times 10 \times 40$) cm^3 .
- ✓ La composition a été déterminée par la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke.
- ✓ Les pourcentages d'adjuvant (MEDAFLUID 40 et MEDAFLOW 30) sont : (0%, 0.5% ,1% et 1.5%).
- ✓ Fixation du pourcentage du fumé de silice à 8 % pour chaque type de béton.
- ✓ Les essais étant exécuté à : 7 j, 14 j et 28 jours.
- ✓ Les propriétés étudiées: (La masse volumique, l'affaissement, l'absorption d'eau, la porosité, l'indice sclérometrique (Is), la vitesse de propagation des ultrasons (V) et la résistance à la compression (**Rc**), ainsi que la résistance à la flexion (**Rf**)

V.3 Présentation des résultats

Les résultats à l'état frais et durci (la masse volumique à l'état frais, la masse volumique à l'état durci, la résistance à la compression et la traction par flexion, la vitesse de propagation ultrasonique, l'indice sclérometrique, le taux d'absorption d'eau et la porosité accessible à l'eau.) sont présentés dans les tableaux ci-après.

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

V.4.1 L'affaissement

Dans ce travaille on a formulé 07 gâcher avec différents pourcentage d'adjuvant et E/L fixés, d'où en a choisi deux type d'adjuvant MEDAFLOW30 et MEDAFLUID40 pour voir influence de ces adjuvant sur le comportement des BHP à l'état frais.

Le tableau suivant regroupe l'ensemble des affaissements obtenus.

Tableau V. 1: L'affaissement des différents bétons étudiés.

Type de béton	Affaissement
BHP _T	16
BHP _{0,5}	15
BHP ₁	18
BHPI _{1,5}	21
BHP _{II} _{0,5}	15,5
BHP _{II} ₁	17,3
BHP _{II} _{1,5}	19,6

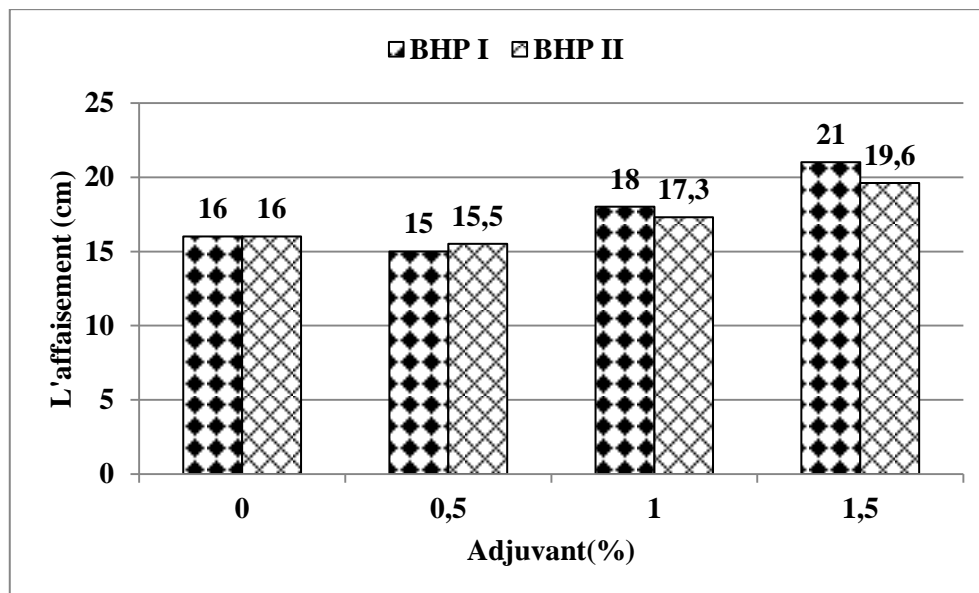


Figure V. 1 : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage d'adjuvant pour chaque béton.

La figure V.1 représente la variation de l'affaissement en fonction du pourcentage d'adjuvant pour chaque béton. On remarque une proportionnalité entre l'affaissement et le pourcentage d'adjuvant pour les deux adjuvants utilisés. On remarque que les résultats obtenus avec le superplastifiant MEDAFLOW30 sont meilleurs que ceux du superplastifiant MEDAFLUID40 à partir du pourcentage de 1%. Cette variation est due à la nature de superplastifiant MEDAFLOW30 qui est un haut réducteur d'eau par rapport au MEDAFLUID40 qui est un réducteur d'eau.

Cela est due à l'effet de dispersion du superplastifiant, qui sépare des grains de ciment les uns des autres et fluidifie le mélange sans la nécessité d'eau supplémentaire ; plus le pourcentage d'adjuvant est grand plus les grains de ciment sont recouverts plus rapidement et plus efficacement par les particules de superplastifiant. Néanmoins, ce mécanisme n'est pas le

même pour tous les adjuvants, ce qui explique la variation des résultats pour les adjuvants utilisés dans notre étude.

V.4.2 La masse volumique (frais)

Pour voir l'effet des adjuvants sur la variation de la masse volumique apparente à l'état frais, des pesés des éprouvettes à l'état frais ont été effectués, l'ensemble des résultats obtenue sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau V. 2 : La masse volumique des différents bétons étudié.

Type de béton	Masse volumique (t/m ³)
BHP _T	2.492
BHP _{0.5}	2.512
BHP ₁	2.583
BHPI _{1.5}	2.569
BHPII _{0.5}	2.543
BHPII ₁	2.331
BHPII _{1.5}	2.210

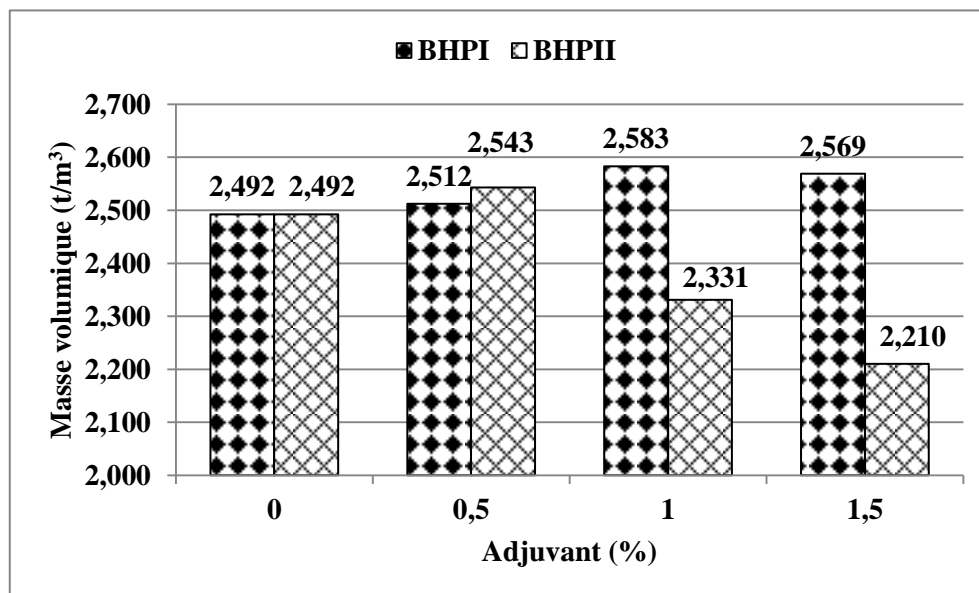


Figure V. 2 : La variation de la masse volumique apparente à l'état frais en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons.

La Figure V.2 représente la variation de la masse volumique apparente à l'état frais en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons.

En remarque que la masse volumique à l'état frais augmente avec l'augmentation des pourcentages d'adjuvant pour les deux types de superplastifiant utilisée mais avec une cadence différente, d'où en obtient une valeur optimum avec les dosages de **0.5 %** pour les bétons **BHPII** par contre une valeur optimum avec le dosage **1%** pour les **BHPI**, donc en peut dire que les pourcentage de saturation sont **1%** et **0.5%** pour les superplastifiant MEDAFLOW30 et

MEDAFUID40 respective. À partir de ce point, tout ajout complémentaire de superplastifiant n'a plus qu'un effet très faible sur la masse volumique, pour des raisons économiques, il n'est pas intéressant d'aller au-delà de ce dosage, car l'effet est marginal pour un cout croissant.

Après ces valeurs en remarque une chute de la masse volumique avec l'augmentation de pourcentage de superplastifiant, des écarts d'ordre **3.52%** et **9.76%** ont été enregistrés entre **BHPI₁**, **BHP_T** et **BHPI₁**, **BHPII₁** respectivement. Cela peut être expliqué par le dépassement du point de saturation pour les deux bétons.

V.5 État durci (Propriétés physiques)

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

Pour voir l'effet des adjuvants sur la variation de la masse volumique apparente à l'état durci des pesés des éprouvettes à l'état durci en été effectués à différentes échéances 7, 14 et 28 jours, l'ensemble des résultats obtenue son présenté dans le tableau **V.3** ci-dessous.

Tableau V. 3 : La masse volumique apparente à l'état durci des différents bétons étudié à 7.14.28 jours.

Type de béton	La masse volumique (t/m ³)		
	7 jours	14 jours	28 jours
BHP _T	2.358	2.351	2.390
BHP _{0,5}	2.415	2.439	2.432
BHP ₁	2.452	2.473	2.461
BHPI _{1,5}	2.446	2.475	2.499
BHPII _{0,5}	2.441	2.441	2.443
BHPII ₁	2.214	2.194	2.256
BHPII _{1,5}	2.128	2.111	2.099

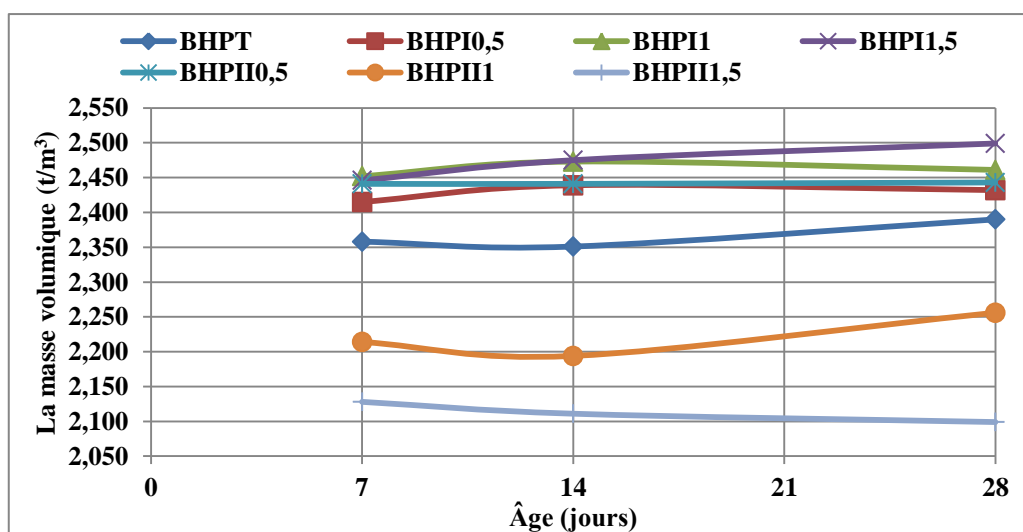


Figure V. 3 : L'évolution de la masse volumique apparente en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons à 7, 14 et 28 jours.

La figure V.3 représente l'évolution de la masse volumique des bétons testés dans le temps.

D'après cette figure on peut dire que tous les bétons étudié ont la même cinétique en ce qui concerne l'évolution de la masse volumique dans le temps.

BHPI₁, **BHP_{0,5}** et **BHPII_{1,5}** présente une diminution de la masse volumique à l'âge de 28 jours, ça peut être expliqué par les conditions de travail et de conservation des éprouvettes dans laboratoire, et les conditions climatiques que influent sur les prouesses d'hydratations, ce que influe à son tour sur l'uniformité des résultats obtenues.

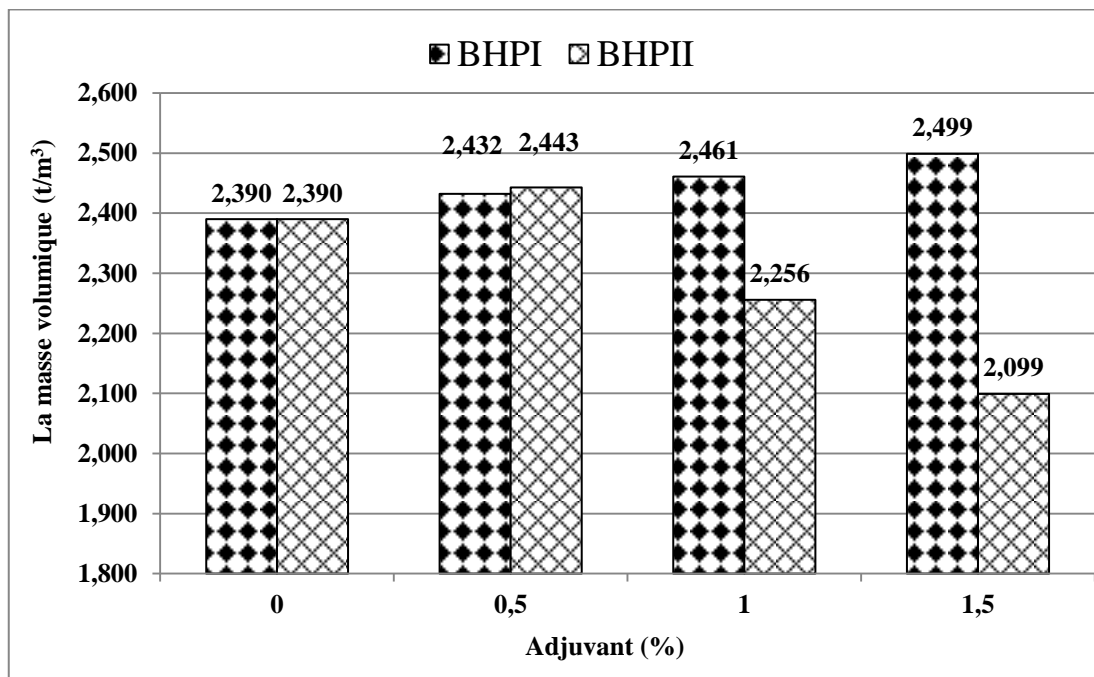


Figure V. 4 : Variation de la masse volumique des bétons testés à 28 jours.

En remarque que la masse volumique à l'état durci pour les bétons **BHPI** (à basse MEDAFLOW30) augmente avec l'augmentation du pourcentage de superplastifiant, d'où on enregistre un écart d'ordre **4.36%** entre **BHPI1.5** et **BHP_T**.

D'autre part, En remarque que la masse volumique à l'état durci pour les bétons **BHPII** (à basse MEDAFLUID40) diminué avec l'augmentation du pourcentage de superplastifiant au-delà de **0.5%** ; on illustre un écart d'ordre **2.17%** entre **BHPII_{0,5}** et **BHP_T**, ainsi un écart de **14.1%** entre **BHPII_{0,5}** et **BHPII_{1,5}** ; en peut expliquer les écarts entre **BHPII_{0,5}**, **BHPII₁** et **BHPII_{1,5}** par le dépassement du point de saturation, d'où l'eau de gâchage correspond aux pourcentage **1** et **1.5%** de (MEDAFLUID40), représente un excès dans la composition du béton, donc affect l'hydratation du liant et par conséquent, produire plus de porosité dans la structure du béton et donc faire diminué la densité de ce dernier.

V.5.2 La vitesse d'ultrason (V)

Tableau V. 4 : La vitesse d'ultrason des différents bétons étudiés à 7, 14 et 28 jours.

Type de béton	La vitesse (V) (Km/s)		
	7 jours	14 jours	28 jours
BHP _T	3.847	4.042	4.241
BHPI ₁	4.348	4.423	4.742
BHPI _{1,5}	4.351	4.544	4.809
BHPI _{1,5}	4.385	4.540	4.839
BHPII _{0,5}	4.487	4.61	4.779
BHPII ₁	4.051	4.347	4.457
BHPII _{1,5}	3.823	4.060	4.205

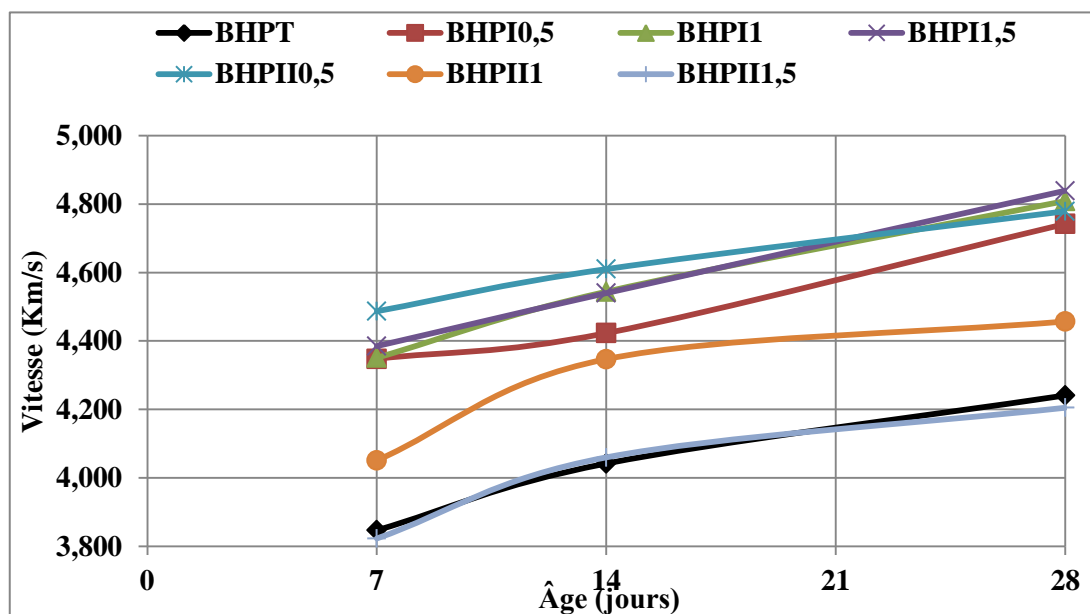


Figure V. 5 : L'évolution de la vitesse ultrasonique en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types de béton à 7, 14 et 28 jours.

La figure V.5 représente l'évolution de la vitesse de propagation des ondes ultrason des différents bétons étudiés dans le temps. On remarque que tous les bétons ont une cinétique analogue en ce qui concerne l'évolution de la vitesse d'ultrason dans le temps, mais avec des valeurs différentes, ces valeurs dépendent essentiellement de 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 obtenus à partir des essais d'écrasement (figure V.5), d'où les bétons qui ont des vitesses élevées ont logiquement des résistances élevées. Les meilleurs résultats sont obtenus avec **BHPI_{0,5}**, **BHPI₁**, **BHPI_{1,5}** et **BHPII_{0,5}**.

5.3 L'indice sclérométrique (Is)

Tableau V. 5 : L'indice sclérométrique des différents bétons étudiés à 7, 14, 28 jours.

Type de béton	Is		
	7 jours	14 jours	28 jours
BHP _T	25.3	32.2	37.4
BHPI _{0.5}	32	35.5	40.2
BHPI ₁	32.3	36	41
BHPI _{1.5}	37.3	41.7	45.6
BHPII _{0.5}	34	39.6	46
BHPII ₁	28.8	30.1	33.6
BHPII _{1.5}	22.4	24.9	30

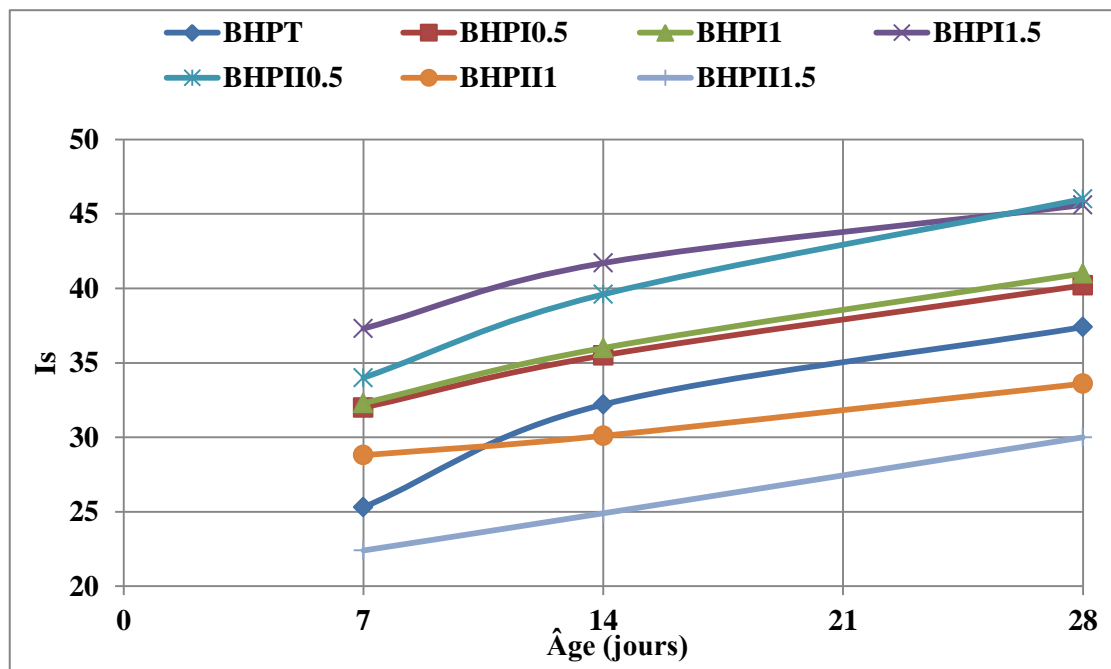


Figure V. 6 : Évolution de l'indice sclérométrique en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons à 7, 14 et 28 jours.

Comme pour le cas de la vitesse d'ultrason, les mêmes constatations sont tirées de la figure V.6. L'indice sclérométrique évolue dans le temps avec le durcissement du béton, les indices les plus grands sont obtenus avec les bétons les plus âgés. Les meilleurs résultats sont obtenus avec BHPI_{0.5}, BHPI₁, BHPI_{1.5} et BHPII_{0.5}.

V.5.4 Porosité et l'absorption

La porosité et l'absorption d'eau sont des paramètres indicateurs de la durabilité des bétons, car ils traduisent la capacité des substances agressives à pénétrer et endommager le béton. Le tableau suivant regroupe l'ensemble des résultats obtenus de la porosité accessible à l'eau et le taux d'absorption d'eau des bétons testés.

Tableau V. 6 : La porosité et à l'absorption des différents bétons étudiés.

Type de béton	P(%)	A(%)
BHP _T	11.42	4.84
BHP _{0,5}	5.22	2.04
BHP ₁	5.11	2.00
BHPI _{1,5}	5.38	2.68
BHPII _{0,5}	5.33	2.05
BHPII ₁	10.79	4.81
BHPII _{1,5}	12.32	5.67

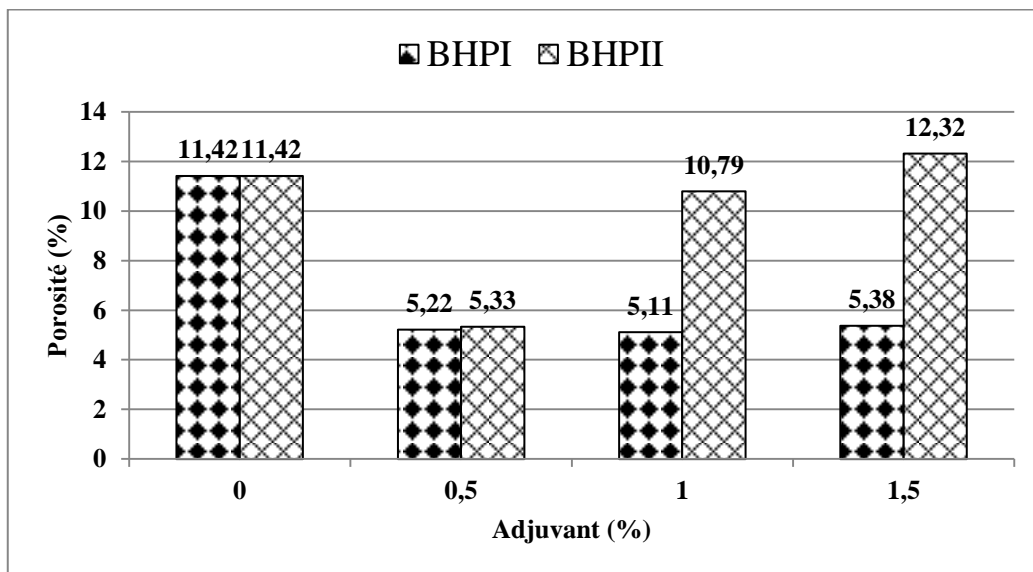


Figure V. 7 : La variation de la porosité fonction du pourcentage d'adjuvant.

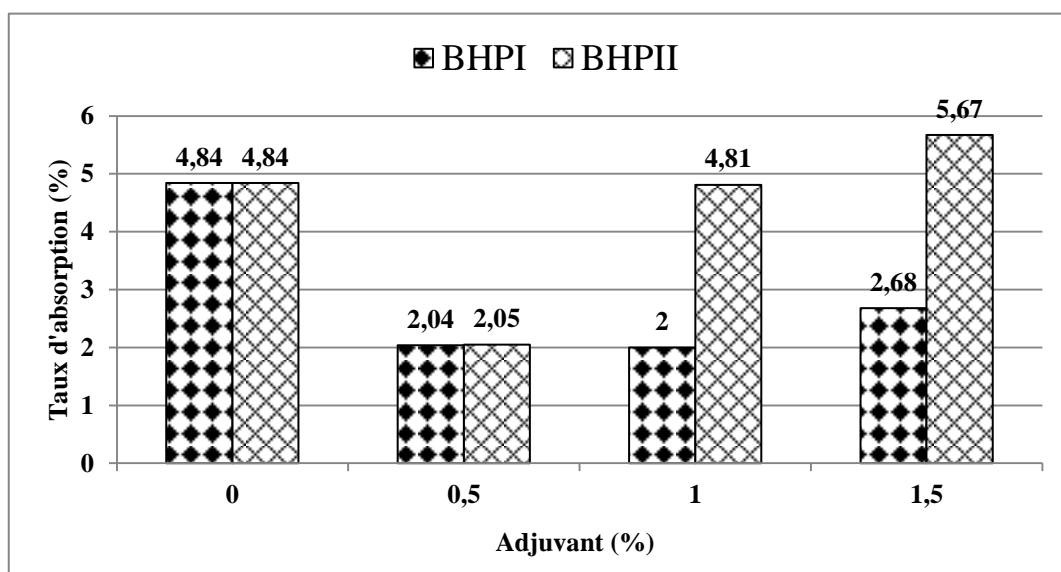


Figure V. 8 : La variation de l'absorption en fonction du pourcentage d'adjuvant.

On remarque pour les deux paramètres (porosité et absorption d'eau) que les résultats sont en coordination. Les bétons les plus poreux sont les bétons qui absorbent plus d'eau.

Le béton témoin **BHPT** a une porosité élevée comparativement aux bétons adjuvantes **BHPI_{0,5}**, **BHPI₁**, **BHPI_{1,5}** et **BHPII_{0,5}**, les meilleurs résultats pour la porosité sont obtenus avec les bétons **BHPI** (à basse MEDAFLOW30), d'où on constate un écart d'ordre **54.3**, **55.25** et **52.88%** entre **BHPT** et les bétons **BHPI_{0,5}**, **BHPI₁** et **BHPI_{1,5}**; pour les bétons **BHPII**, seul le pourcentage de **0.5%** qui donne des résultats encourageantes avec un écart de **53.33%** entre **BHPT** et **BHPII_{0,5}**. Les autres bétons **BHPII₁** et **BHPII_{1,5}** présentent des valeurs élevées de porosité.

En ce qui concerne le taux d'absorption d'eau, les mêmes remarques ont été constatées, les écarts entre **BHPT** et les bétons **BHPI_{0,5}**, **BHPI₁** et **BHPI_{1,5}** sont **57.85**, **58.68** et **44.63%** respectivement, et **57.64%** entre **BHPT** et **BHPII_{0,5}**.

On peut expliquer cette porosité des bétons non adjuvantes par l'augmentation de la quantité d'eau de gâchage pour assurer une maniabilité comparable à celle des bétons adjuvantes, lors de la prise et le durcissement du béton, l'eau qui ne réagit pas avec le ciment, va progressivement s'évaporer et laisser la place à la porosité ce qui explique le taux élevé de l'absorption d'eau. Pour les bétons **BHPII** le pourcentage correspond au point de saturation en superplastifiant est de **0.5%**.

V.5.5 Résistance à la compression (Rc)

Tableau V. 7: La résistance à la compression l'état durci des différents bétons étudiés à 7, 14, 28 jours.

Type de béton	Résistance à la compression (Rc) (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
BHPT	19.62	25.59	30.77
BHPI_{0,5}	33.48	41.21	51.58
BHPI₁	39.33	42.68	54.46
BHPI_{1,5}	33.65	42.10	50.51
BHPII_{0,5}	41.43	46.33	51.54
BHPII₁	20.04	27.69	33.25
BHPII_{1,5}	18.68	25	31.94

La figure **V.9** représente l'évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'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 analogique 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.

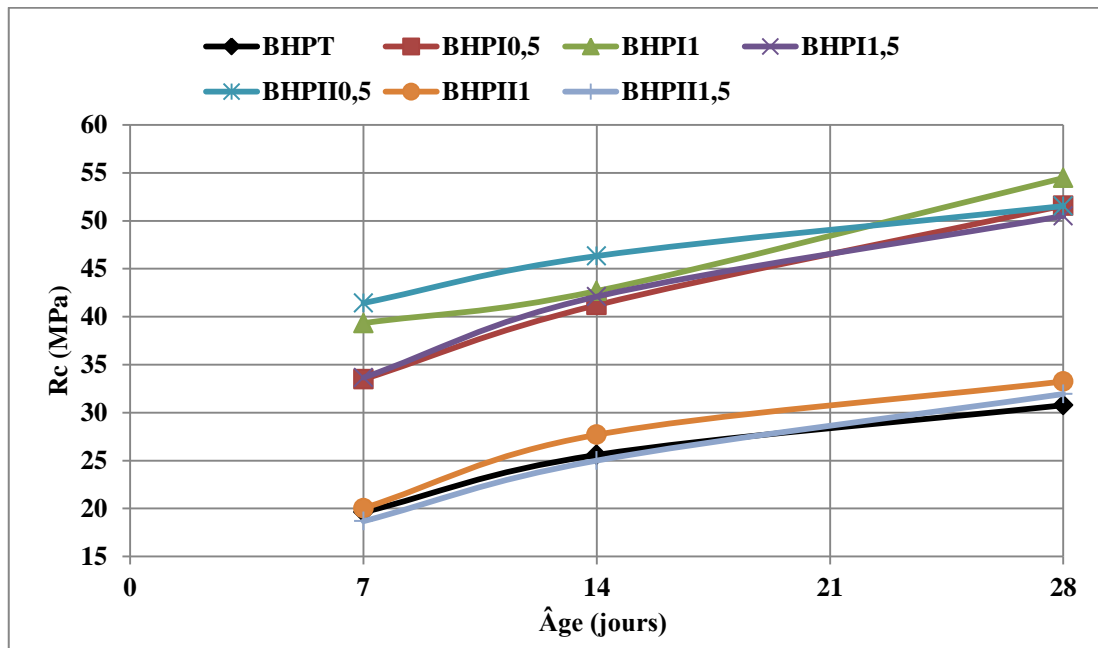


Figure V. 9 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons à 7, 14 et 28 jours.

Cependant, le développement des résistances des bétons préparés avec le (MEDAFLOW30) est plus rapide que celle des bétons préparés avec le (MEDAFLUID40) à différents âges, cette différence est due probablement d'une part, à l'effet retardateur du (MEDAFLUID40) et d'autre part, à la bonne compatibilité du ciment utilisé avec le superplastifiant (MEDAFLOW30).

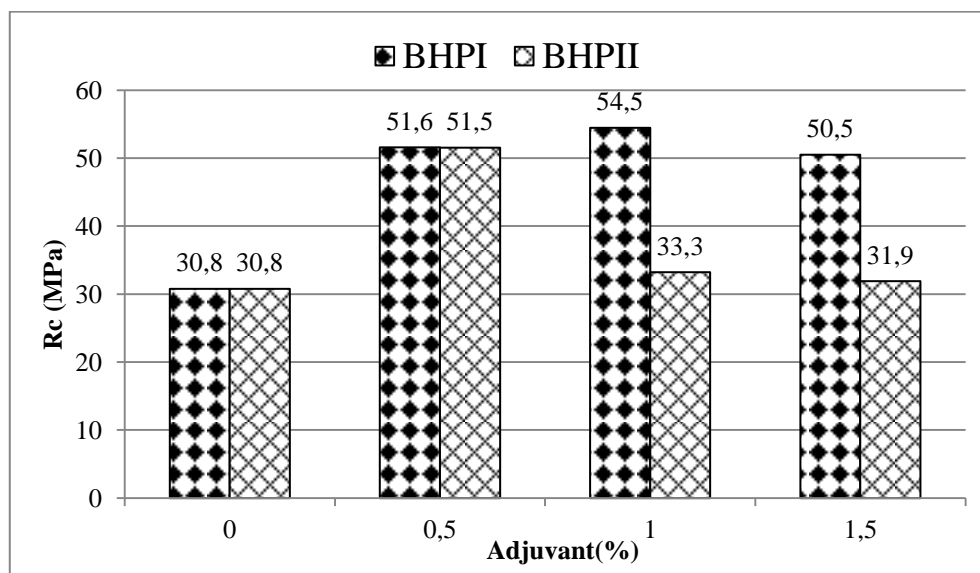


Figure V. 10 : la variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons à 28 jours.

La figure V.10 montre la variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons à 28 jours.

Pour les bétons **BHPI** à base de (MEDAFLOW30) on peut remarquer que la valeur optimum de la résistance à la compression est obtenue avec le pourcentage de **1% (54.46 MPa)** avec un écart de **43.5%** par rapport en **BHPT** ; 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.

Pour le béton **BHPII** à base de (MEDAFLUID40) la valeur optimale de la résistance à la compression est obtenue avec le dosage **0.5% (51.54MPa)** avec un écart d'ordre **40.3%** par rapport au **BHPT** et de **38.03%** par rapport **BHPII_{1.5}**.

Donc, on peut dire que la résistance à la compression des bétons **BHPII** (MEDAFLUID40) diminue avec l'augmentation du dosage en superplastifiant. Cette diminution peut être expliquée par le fait qu'à un rapport E/L constant l'augmentation du dosage en superplastifiant conduit à une augmentation de quantité de liquide dans le mélange du béton (surplus d'eau), ce qui provoque une chute de la résistance à la compression. Cette chute de résistance est d'autant plus importante que le dosage est supérieur à 0.5 %. Cependant, le développement des résistances des bétons préparés avec le (MEDAFLOW30) est plus rapide que celle des bétons préparés avec le (MEDAFLUID40) à différents âges, cette différence est due principalement à l'effet de retardateur du (MEDAFLUID40).

V.5.6 Résistance à la flexion (Rf)

Tableau V. 8: La Résistance à la flexion à l'état durci des différents bétons étudiés à 7.14 et 28 jours.

Type de béton	Résistance à la flexion (MPa)
BHP _T	7.8
BHP _{0.5}	9.2
BHP ₁	10
BHPI _{1.5}	13.2
BHPII _{0.5}	11.6
BHPII ₁	9

La figure V.11 montre la variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage d'adjuvant pour les différents types des bétons à 28 jours.

On remarque que les bétons adjuvantes donnent des résultats meilleurs comparativement au béton témoin quel que soit le type ou le pourcentage d'adjuvant utilisé, sauf pour le cas du béton **BHPII_{1.5}**, ou on remarque une légère diminution de la résistance à la flexion comparativement aux autres bétons.

Pour les bétons **BHPI** (MEDAFLOW30), on remarque que la résistance à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage d'adjuvant, on enregistre des écarts d'ordre **15.22, 22** et **40.9%** entre **BHPI_{0.5}**, **BHPI₁** et **BHPI_{1.5}** et **BHPI_T** respectivement.

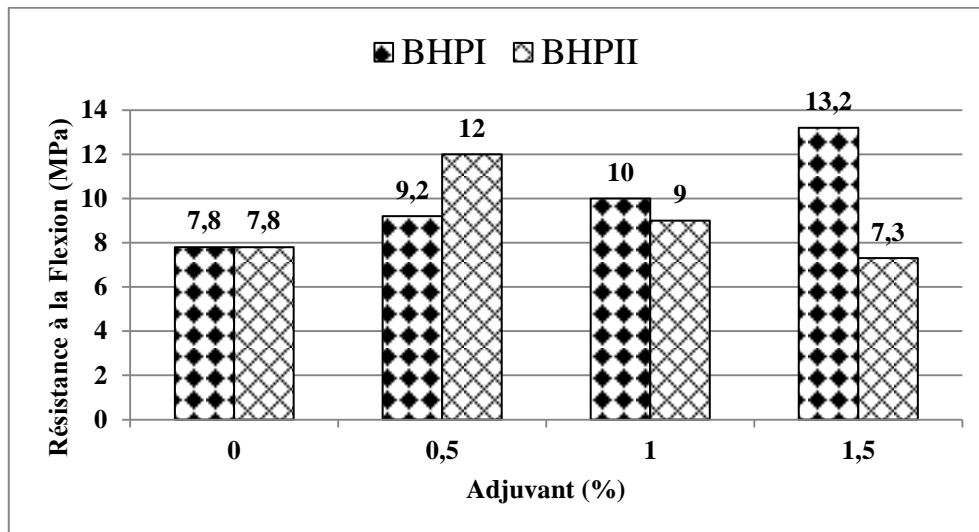


Figure V. 11 : la variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage d’adjuvant pour les différents types des bétons à 28 jours.

Pour les bétons **BHPII** (MEDAFLUID40), on remarque que la résistance à la flexion diminue avec l’augmentation du pourcentage d’adjuvant, et que le **BHPII**_{0,5} est le pourcentage optimum ; on enregistre des écarts d’ordre **35, 13.33%** entre **BHPII**_{0,5}, **BHPII**₁ et **BHPT** respectivement, un écart de **6.41%** entre **BHPT** et **BHPII**_{1,5}. La chute de résistance peut être attribuée à saturation en superplastifiant comme on a dit précédemment.

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 BHPI

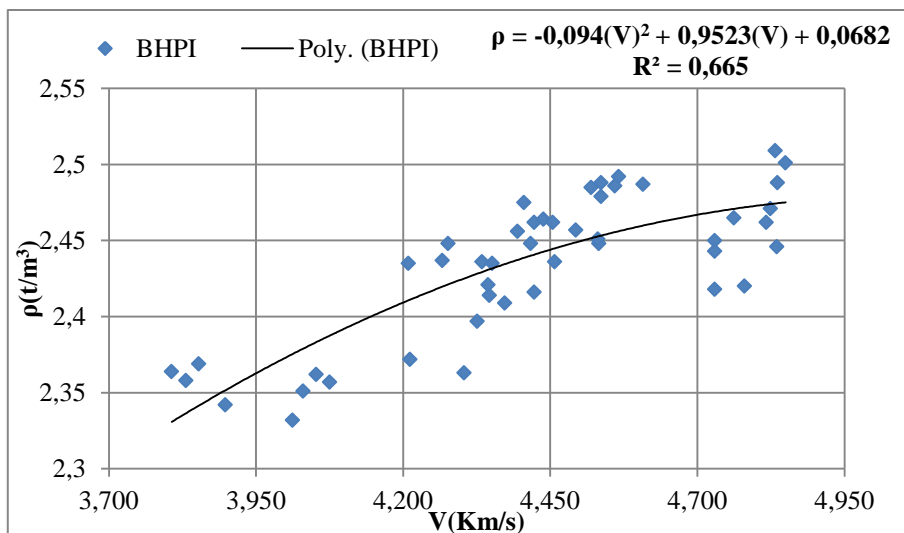


Figure V. 12 : Corrélation entre (ρ) et (v) pour BHPI

$$\rho = -0.094(V)^2 + 0.9523(V) + 0.0682 \tag{V.1}$$

$$R^2 = 0.665.$$

La figure V.12 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 polynomiale présentée par l'équation (1) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,665$ et une **erreur type** = 0.028 (t/m^3).

D'après cette figure, on peut conclure qu'il existe une corrélation acceptable ($R^2 = 0,665$) entre la masse volumique apparente et les vitesses d'ultrason correspondants pour l'ensemble des bétons.

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

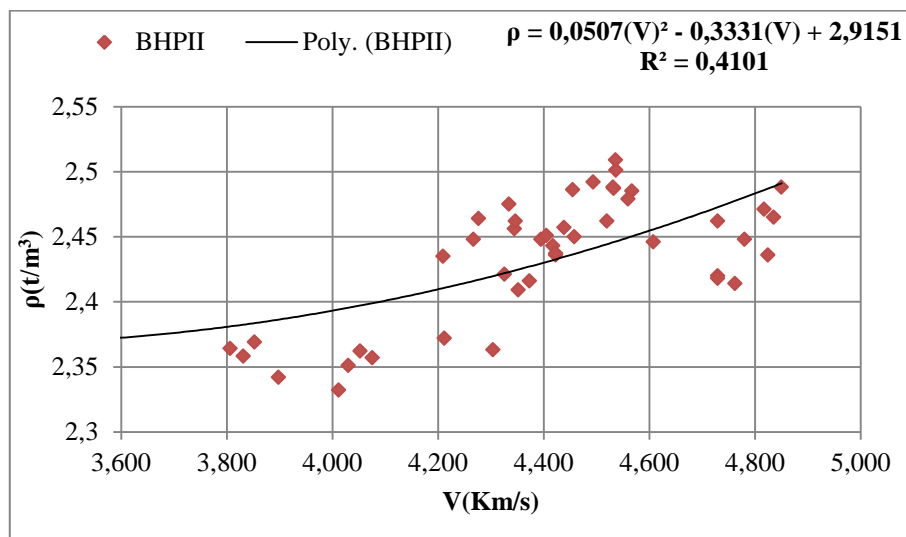


Figure V. 13: Corrélation entre (ρ) et (v) pour BHPII

$$\rho = -0.0507(V)^2 + 0.3331(V) + 2.9151 \quad (V.2)$$

$$R^2 = 0.410$$

La figure V.13 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 polynomiale présentée par l'équation (2) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,410$ et une **erreur type** = 0.117 (t/m^3).

D'après cette figure, on peut conclure qu'il existe une faible corrélation ($R^2 = 0,410$) entre les masses volumiques et la vitesse ultrason pour les bétons BHPII. A cet effet, on peut dire que les résultats trouvés pour ces bétons présentent une large dispersion à cause de l'irrégularité des résultats obtenue avec BHPII₁ et BHPII_{1,5} par rapport aux bétons BHPT et BHPII_{0,5}.

V.6.1.3 Corrélation entre (ρ) en fonction de (v) pour BHPI et BHPII

La figure V.14 présente la corrélation établie entre les mesures de la masse volumique apparente (ρ) et les vitesses d'ultrason pour **BHPI** et **BHPII**. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme polynomiale présentée par l'équation (3) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,425$ et une **erreur type** = $0.097(t/m^3)$.

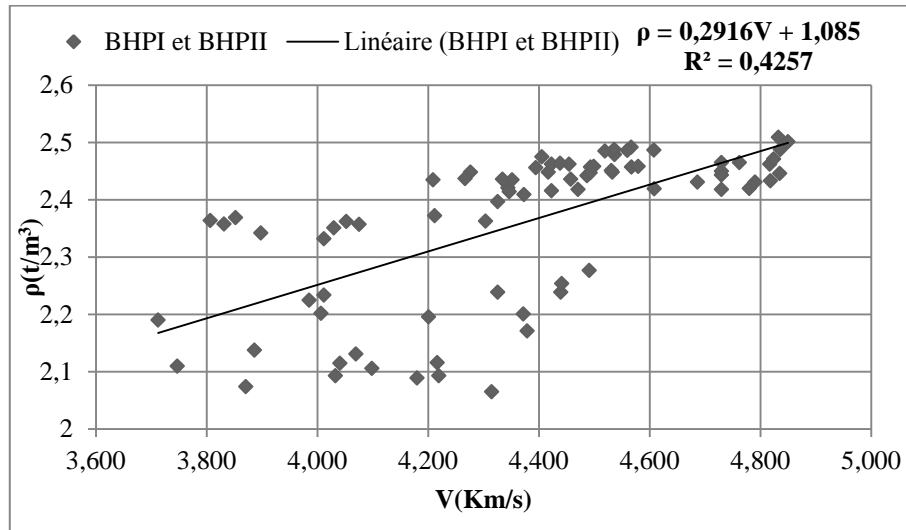


Figure V. 14 : Corrélation entre (ρ) et (v) pour BHPI et BHPII

$$\rho = 0.2916(V) + 1.085 \quad (V.3)$$

$$R^2 = 0.4257$$

On peut conclure qu'il existe une faible corrélation ($R^2 = 0,410$) entre les masses volumiques et la vitesse ultrason pour les bétons **BHPI** et **BHPII**.

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

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

La figure V.15 présente la corrélation établie entre les mesures de la masse volumique apparente (ρ) les indices de rebondissement correspondants. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme puissance présentée par l'équation (4) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,440$ et une **erreur type** = $0.039 (t/m^3)$.

On constate une faible corrélation ($R^2= 440$) entre la masse volumique apparente (ρ) et les indices de rebondissement correspondants, mais on peut quand même avoir une estimation de la masse volumique on utilisant l'indice de rebondissement.

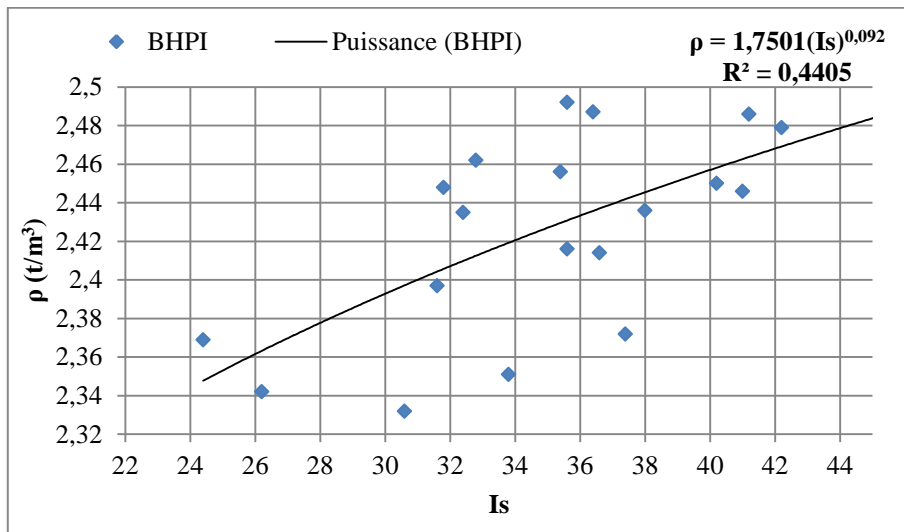


Figure V. 15: La corrélation (ρ) en fonction de (I_s) pour BHPI

$$\rho = 1.7501(I_s)^{0.092} \tag{V.4}$$

$$R^2 = 0.4405$$

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

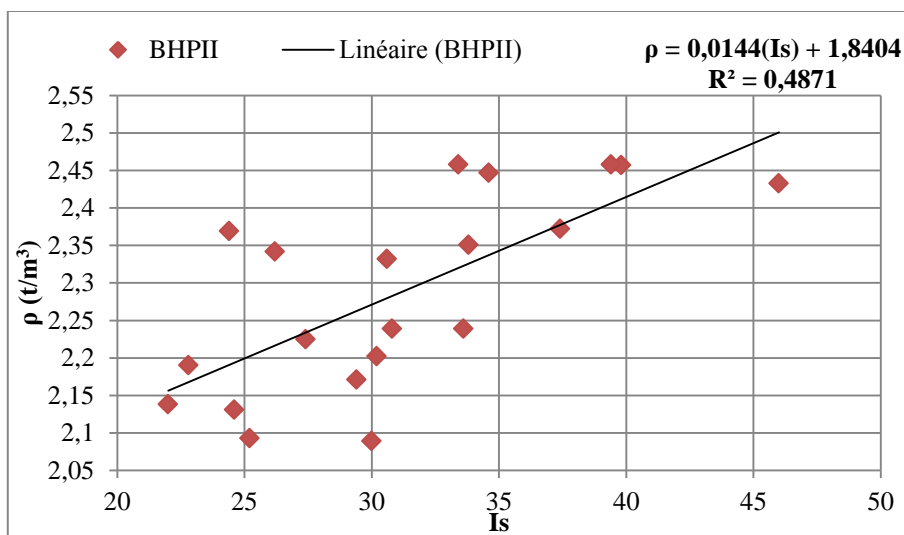


Figure V. 16: La corrélation (ρ) en fonction de (I_s) pour BHPII

$$\rho = 0.0144(I_s) + 1.8404 \tag{V.5}$$

$$R^2 = 0.4871$$

La figure V.16 présente la corrélation établie entre les mesures de la masse volumique apparente (ρ) les indices de rebondissement correspondants. L'expression proposée à cette

corrélacion est une relation de forme linéaire présentée par l'équation (5) avec un coefficient de corrélacion $R^2 = 0,487$ et une **erreur type** $= 0.095$ (t/m^3).

La même remarque pour la corrélacion obtenue à partir des bétons **BHPII**, ou on constate une faible corrélacion ($R^2 = 0.487$).

V.6.2.3 la corrélacion (ρ) en fonction de (I_s) pour BHPI et BHPII

La figure V.17 présente la corrélacion établie entre les mesures de la masse volumique apparente (ρ) les indices de rebondissement correspondants pour BHPI et BHPII. L'expression proposée à cette corrélacion est une relation de forme puissance présentée par l'équation (6) avec un coefficient de corrélacion $R^2 = 0.585$ et une **erreur type** $= 0.087$ (t/m^3).

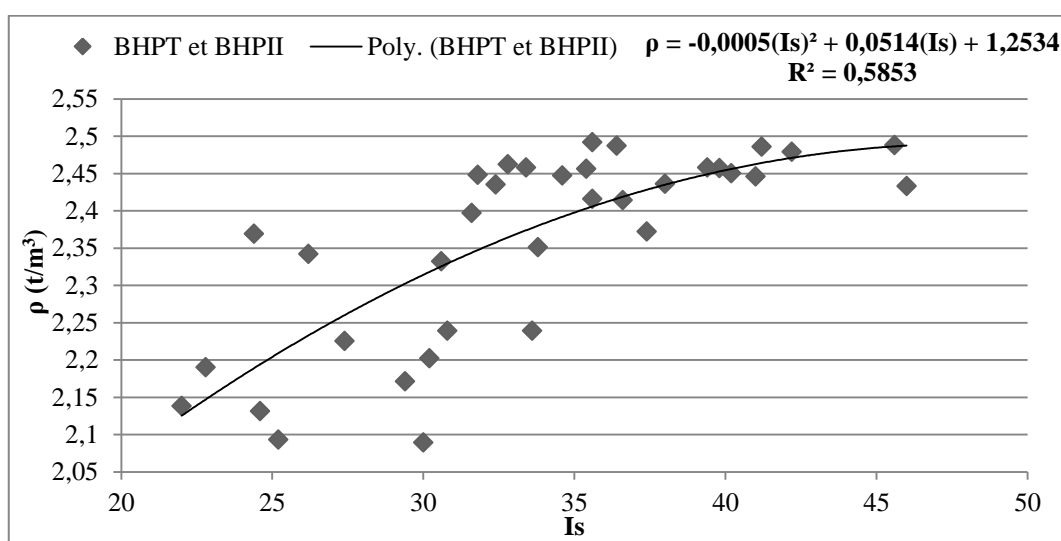


Figure V. 17: la corrélacion (ρ) en fonction de (I_s) pour BHPI et BHPII

$$\rho = -0.0005(I_s)^2 + 0.0514(I_s) + 1.2534 \quad (V.6)$$

$$R^2 = 0.5853$$

Pour le cas de l'ensemble des béton BHPI et BHPII on obtiene une corrélacion acceptable ($R^2 = 0.585$) pour l'estimation de la masse volumique par l'essai sclérométrique.

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

V.6.3.1 la corrélacion (R_c) en fonction de (V) pour BHPI

La figure 18, présente la courbe de corrélacion établie entre les résistances à la compression par écrasement « R_c » et les vitesses d'ultrason « V » correspondants. L'expression proposée à cette corrélacion est une relation de forme puissance présentée par l'équation (7) avec un coefficient de corrélacion $R^2 = 0,908$ et une **erreur type** $= 3.283$ MPa.

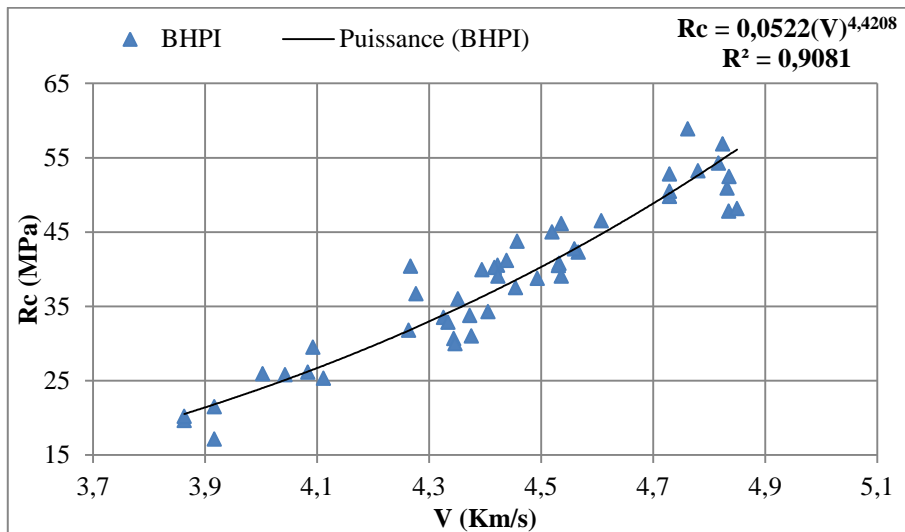


Figure V. 18 : la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour BHPI

$$Rc = 0.0522(V)^{4.4208} \tag{V.7}$$

$$R^2 = 0.9081$$

D’après cette figure V.18, on peut conclure qu’il existe une bonne corrélation ($R^2 = 0,908$) entre les résistances à la compression par écrasement et les vitesses ultrason pour l’ensemble des bétons.

V.6.3.2 la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour BHPII

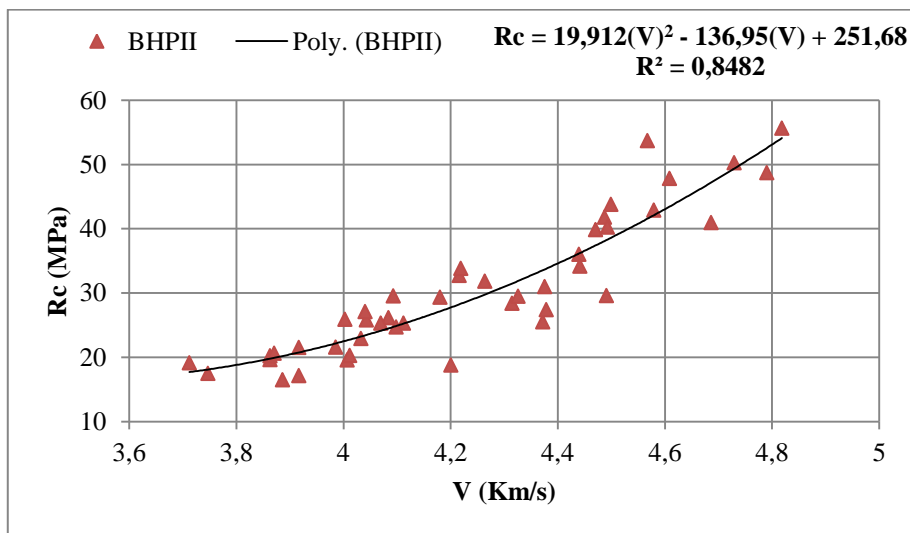


Figure V. 19 : la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour BHPII

$$Rc = 19.912(V)^2 - 136.95(V) + 251.68 \tag{V.8}$$

$$R^2 = 0.8482.$$

La figure V.19, 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 polynomiale présentée par l'équation (8) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,848$ et une **erreur type** = 4.498 MPa.

Une bonne corrélation a été constaté entre la résistance à la compression et la vitesse ultrason ce qui justifier par le coefficient de corrélation ($R^2 = 0.848$).

V.6.3.3 la corrélation (R_c) en fonction de (V) pour BHPI et BHPII

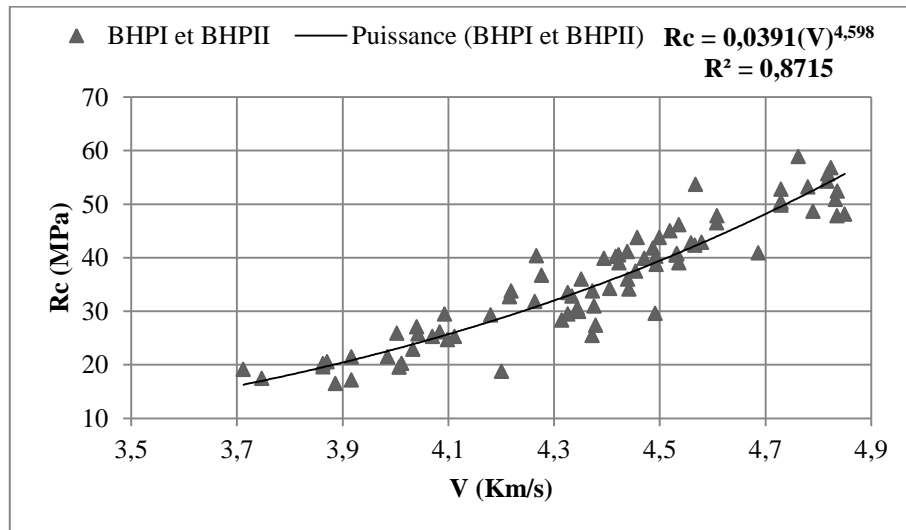


Figure V. 20 : La corrélation (R_c) en fonction de (V) pour BHPI et BHPII

$$R_c = 0.0391(V)^{4.598} \quad (V.10)$$

$$R^2 = 0.871$$

La figure V.20, 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 puissance présentée par l'équation (9) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,871$ et une **erreur type** = 4.135 MPa.

Pour l'ensemble des bétons **BHPI** et **BHPII** une bonne corrélation ($R^2 = 0.871$) a été constaté entre la résistance à la compression et la vitesse ultrason ce qui justifier par le coefficient de corrélation.

V.6.5 Étude de corrélation entre (R_c) et (I_s)

V.6.5.1 la corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BHPI

La figure V.21 présente la corrélation établie entre les mesures de la résistance à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme puissance présentée par l'équation (10) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,6667$ et une **erreur type** = 5.720 MPa.

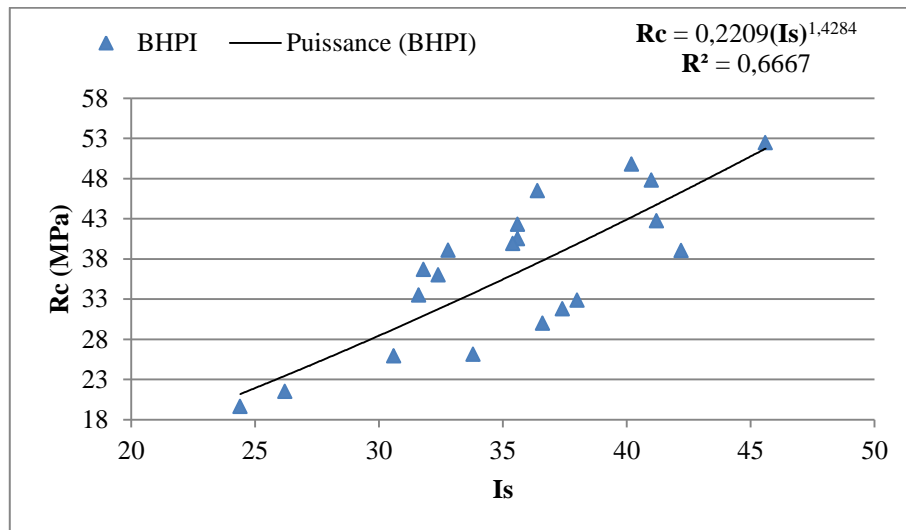


Figure V. 21: la corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BHPI

$$R_c = 0.2209(I_s)^{1.4284} \quad (V.11)$$

$$R^2 = 0.6667$$

On remarque pour la corrélation obtenue à partir des bétons BHPI, ou on constate une corrélation acceptable ($R^2 = 0.666$).

V.6.5.2 la corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BHPII

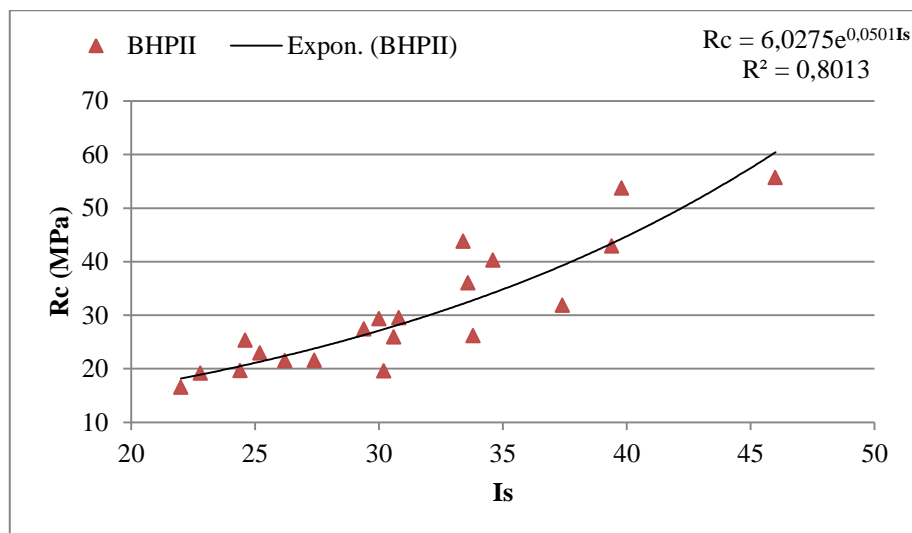


Figure V. 22 : la corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BHPII

$$R_c = 6.0275e^{0.0501(I_s)} \quad (V.12)$$

$$R^2 = 0.801$$

La figure V.22 présente la corrélation établie entre les mesures de la résistance à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants. L'expression

proposée à cette corrélation est une relation de forme exponentielle présentée par l'équation (11) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,801$ et une **erreur type** = 5.283 MPa.

Une bonne corrélation a été constaté entre la résistance à la compression et la indice de rebondissement correspondant ce qui justifier par le coefficient de corrélation ($R^2 = 0.801$).

V.6.5.3 la corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BHPI et BHPII

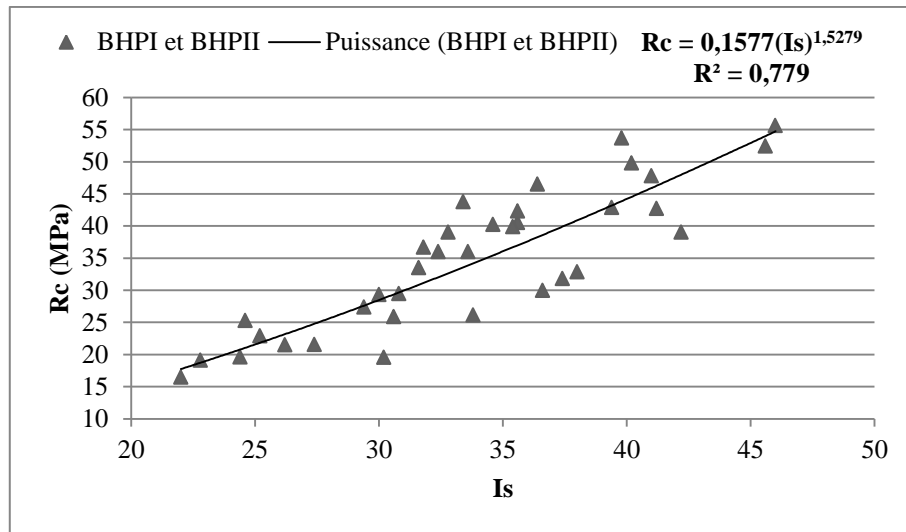


Figure V. 23 : La corrélation (R_c) en fonction de (I_s) pour BHPI et BHPII

$$R_c = 0.1577(I_s)^{1.5279} \quad (V.13)$$

$$R^2 = 0.779$$

La figure V.23 présente la corrélation établie entre les mesures de la résistance à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants pour BHPI et BHPII. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme puissance présentée par l'équation (12) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,779$ et une **erreur type** = 5.364 MPa.

Pour l'ensemble des bétons **BHPI** et **BHPII** une bonne corrélation ($R^2 = 0.779$) a été constaté entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement correspondant ce qui justifier par le coefficient de corrélation.

V.6.6 Étude de corrélation entre (E_d) et (V)

V.6.6.1 la corrélation (E_d) en fonction de (V) pour BHPI

La figure V.24 présente la corrélation établie entre les mesures de la module élasticité et vitesse de son pour BHPI. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme puissance présentée par l'équation 1 avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,990$ et une **erreur type** = 0.623 MPa.

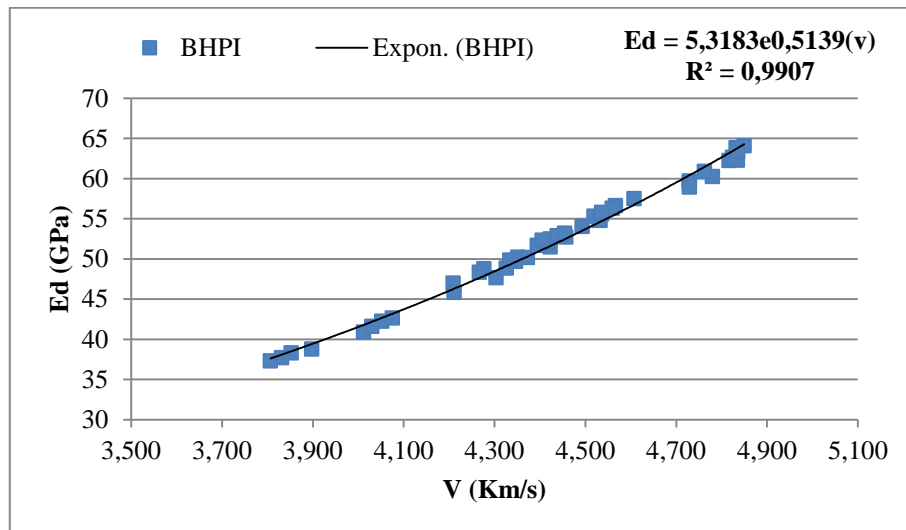


Figure V. 24 : la corrélation (Ed) en fonction de (V) pour BHPI

$$Ed = 5.3183e^{0.5139(V)} \quad (V14)$$

$$R^2 = 0.990$$

D'après cette figure **V.24**, on peut conclure qu'il existe une très bonne corrélation ($R^2 = 0,990$) entre la module élasticité par écrasement et les vitesses ultrason pour l'ensemble des bétons.

V.6.6.2 la corrélation (Ed) en fonction de (V) pour BHPII

La figure **V.25** présente la corrélation établie entre les mesures de la module élasticité et vitesse de son pour **BHPI**. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme puissance présentée par l'équation (14) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,919$ et une **erreur type** = 2.388 GPa.

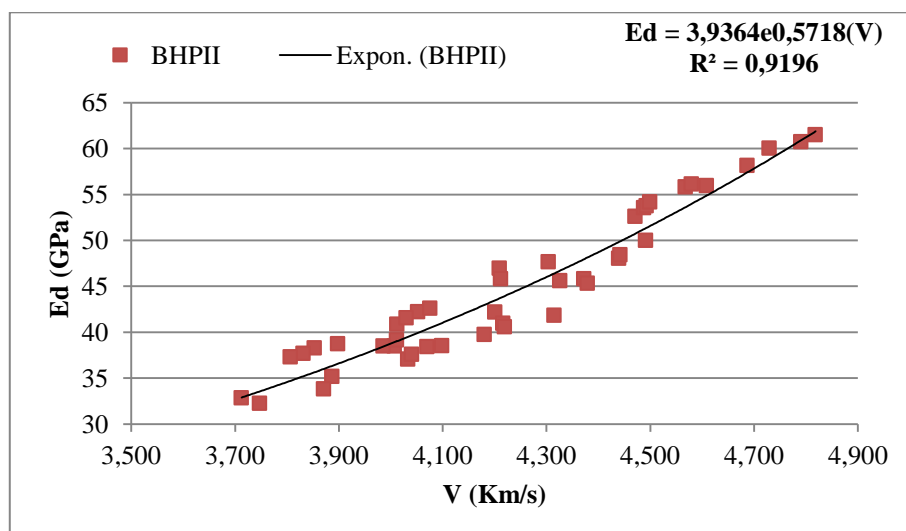


Figure V. 25 : la corrélation (Ed) en fonction de (V) pour BHPII

$$E_d = 3.9364e^{0.5718(V)} \quad (V.15)$$

$$R^2 = 0.919$$

D'après cette figure **V.25**-, on peut conclure qu'il existe une très bonne corrélation ($R^2 = 0,919$) entre la module élasticité dynamique par écrasement et les vitesses ultrason pour l'ensemble des bétons.

V.6.6.3 la corrélation (E_d) en fonction de (V) pour BHPI et BHPII

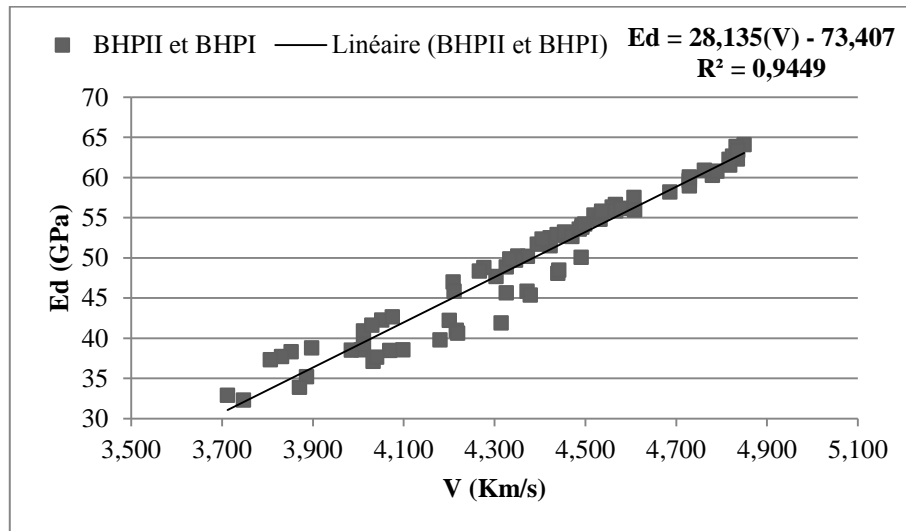


Figure V. 26 la corrélation (E_d) en fonction de (V) pour BHPI et BHPII

$$E_d = 28.135(V) - 73.407 \quad (V.16)$$

$$R^2 = 0.944$$

La figure **V.26** présente la corrélation établie entre les mesures de la module élasticité et vitesse de son pour BHPI et BHPII. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme puissance présentée par l'équation 1 avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,944$ et une **erreur type** = 2.027 GPa.

On peut conclure qu'il existe une très bonne corrélation ($R^2 = 0,944$) entre la module élasticité et la vitesse ultrason pour les bétons BHPI et BHPII.

V.6.7 Étude de corrélation entre (E_d) et (I_s)

V.6.7.1 la corrélation (E_d) en fonction de (I_s) pour BHPI

La figure **V.27** présente la corrélation établie entre les mesures de la module élasticité et les indices de rebondissement correspondants pour **BHPI**. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme puissance présentée par l'équation 1 avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,712$ et une **erreur type** = 4.091 GPa.

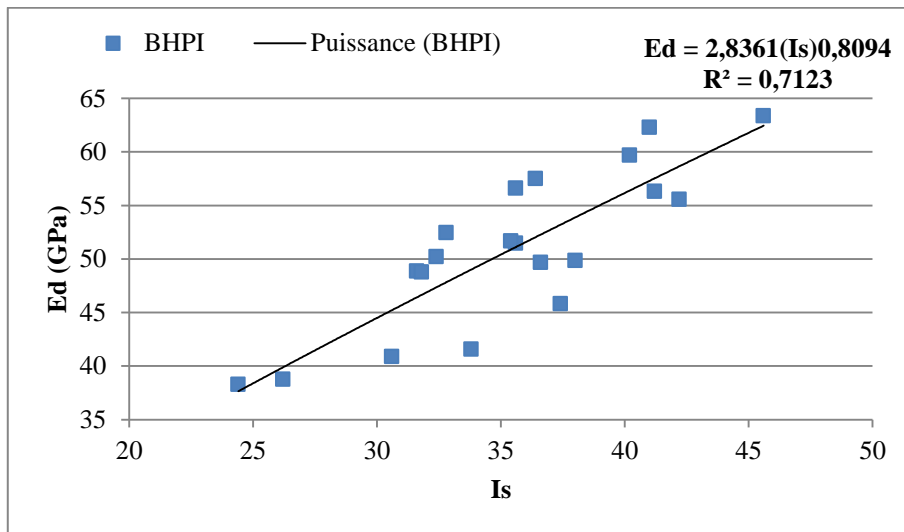


Figure V. 27 : la corrélation (Ed) en fonction de (Is) pour BHPI

$$Ed = 2.8361(Is)^{0.8094} \tag{V.17}$$

$$R^2 = 0.712$$

On remarque pour la corrélation obtenue à partir des bétons **BHPI**, ou on constate une corrélation acceptable ($R^2 = 0.712$).

V.6.7.2 la corrélation (Ed) en fonction de (Is) pour BHPII

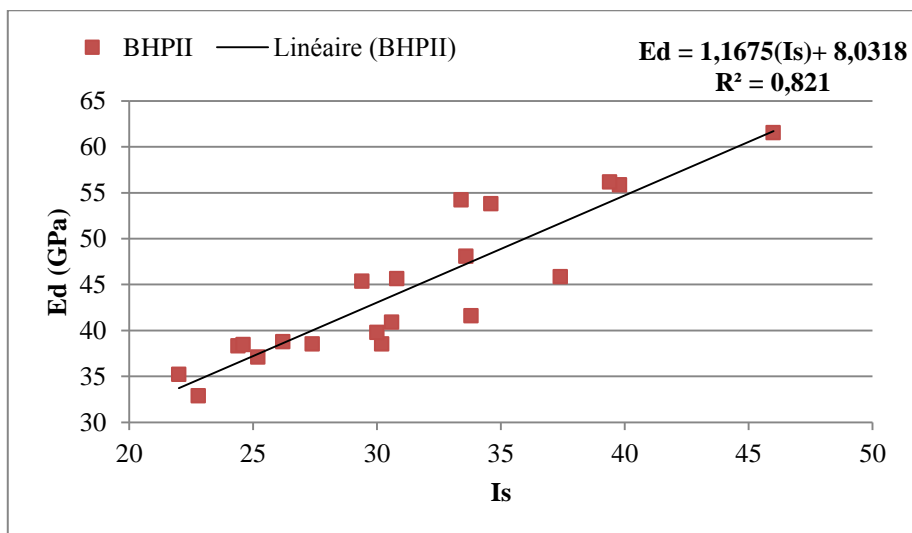


Figure V. 28 : la corrélation (Ed) en fonction de (Is) pour BHPII

$$Ed = 1.1675(Is) + 8.0318 \tag{V.18}$$

$$R^2 = 0.821$$

La figure **V.28** présente la corrélation établie entre les mesures de la module élasticité et les indices de rebondissement correspondants pour BHPI. L'expression proposée à cette

corrélation est une relation de forme linéaire présentée par l'équation (18) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,821$ et une **erreur type** = 3.528 GPa.

On constate une bonne corrélation obtenue à partir des bétons **BHPII**, ce qui est justifié par le coefficient de corrélation qui est le l'ordre de $R^2=0.821$.

V.6.7.3 la corrélation (E_d) en fonction de (I_s) pour BHPI et BHPII

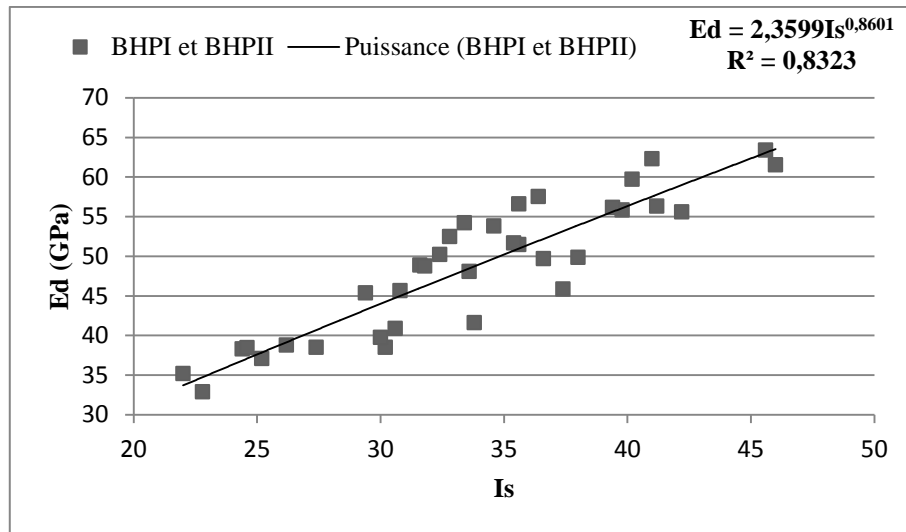


Figure V. 29 : la corrélation (E_d) en fonction de (I_s) pour BHPI et BHPII

$$E_d = 2.3599(I_s)^{0.8601} \quad (V.19)$$

$$R^2 = 0.832$$

La figure V.29 présente la corrélation établie entre les mesures de la module élasticité et les indices de rebondissement correspondants pour **BHPI** et **BHPII**. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme puissance présentée par l'équation (19) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,832$ et une **erreur type** = 3.620GPa.

Pour l'ensemble des bétons **BHPI** et **BHPII** une bonne corrélation a été constaté entre la module élasticité et l'indices de rebondissement correspondant ce qui justifier par le coefficient de corrélation ($R^2 = 0.871$).

V.6.8 la corrélation porosité (P) en fonction de (V)

La figure 3 présente la corrélation établie entre les mesures de porosité (%) et vitesse de son pour **BHPI** et **BHPII**. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme linéaire présentée par l'équation (20) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,932$ et une **erreur type** = 0.960%.

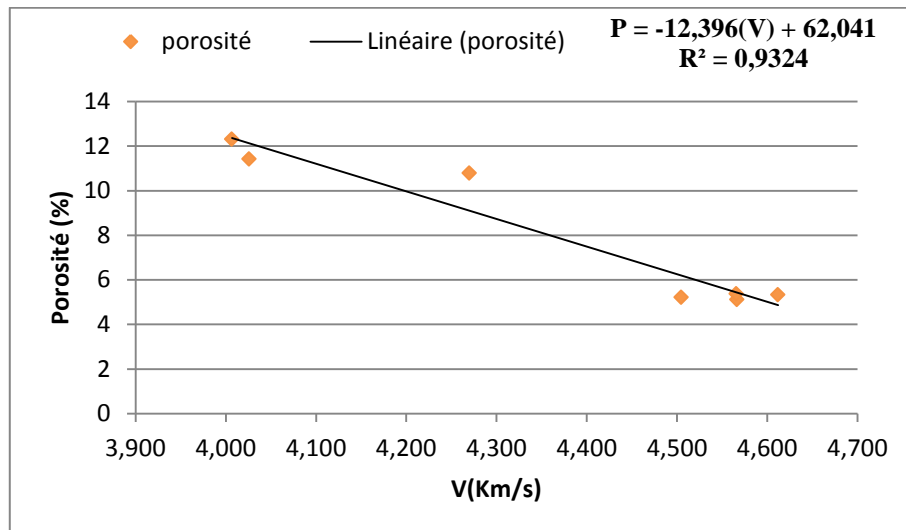


Figure V. 30 : la corrélation porosité (P) en fonction de (V)

$$P = -12.396(V) + 62.041 \quad (V.20)$$

$$R^2 = 0.932$$

On peut conclure qu'il existe une très bonne corrélation ($R^2 = 0,932$) entre la porosité et la vitesse ultrason pour les bétons **BHPI** et **BHPII**, et on constate une proportion inverse entre la porosité et la vitesse d'ultrason.

V.7 les méthodes combinées

V.7.1 Corrélation (Rc) entre (V) et (Is) pour les bétons BHPI

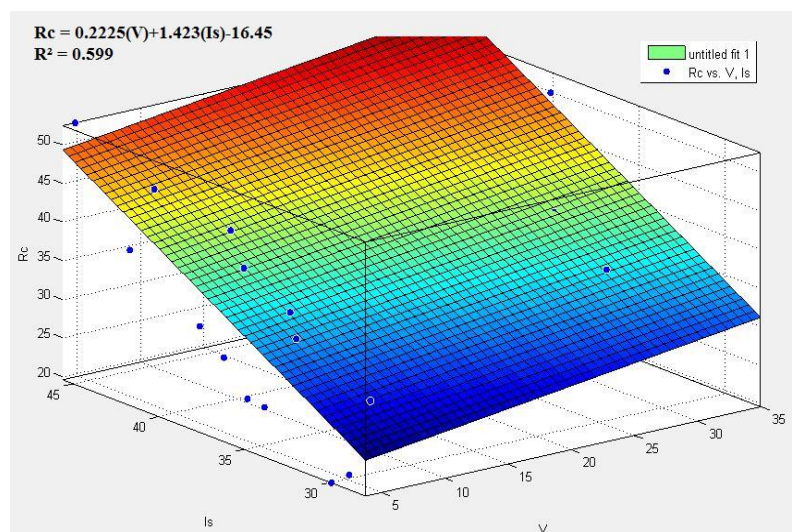


Figure V. 31 : Corrélation entre la résistance à la compression, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique pour BHPI

$$Rc = 0.2225(V) + 1.423(Is) - 16.45 \quad (V.21)$$

$$R^2 = 0.599$$

Afin de composer les insuffisances des méthodes non destructives (ultrason seul, scléromètre seul), on procède à la combinaison des techniques de mesure pour minimisés ou bien éliminés les erreurs liées aux conditions de mesure.

La figure V.31, présente une courbe de corrélation combinée élaborée entre les résistances à la compression par écrasement «**Rc**» et les mesures d'auscultations correspondantes (indices de rebondissement **Is** et vitesses ultrasoniques (**V**) pour **BHPII**. L'expression analytique proposée à cette corrélation, en utilisant la régression multiple, est une fonction de forme polynomiale présentée par l'équation (21), la corrélation est acceptable avec un coefficient de corrélation $R^2=0,599$.

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

Dans la figure V.32 , on présente une courbe de corrélation combinée élaborée entre les résistances à la compression par écrasement «**Rc**» et les mesures d'auscultations correspondantes (indices de rebondissement **Is** & vitesses ultrasoniques (**V**) pour **BHPII**. L'expression analytique proposée à cette corrélation, en utilisant la régression multiple, est une fonction de forme polynomiale présentée par l'équation (22). On obtient une bonne corrélation pour le cas des bétons BHPII se qui est justifié par le coefficient de corrélation $R^2 = 0,898$ qui est proche de l'unité.

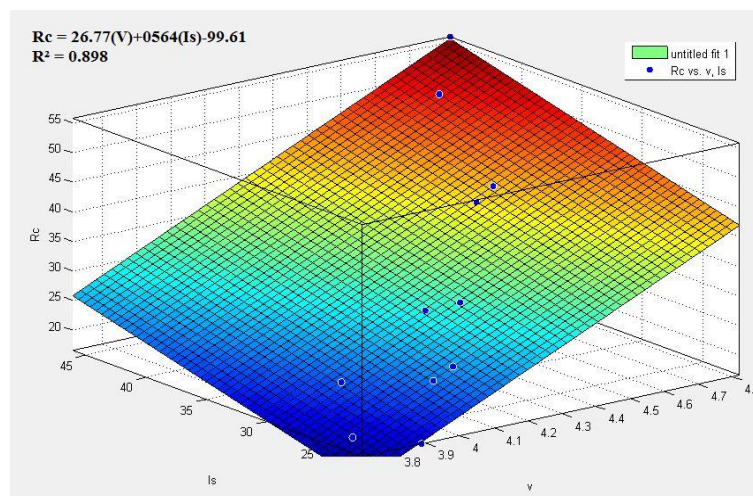


Figure V. 32 : Corrélation entre la résistance à la compression, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique pour BHPII

$$Rc = 26.77(V) + 0.564(Is) - 99.61 \quad (V.22)$$

$$R^2 = 0.898$$

V.7.3 Corrélation (R_c) entre (V) et (I_s) pour BHPI et BHPII

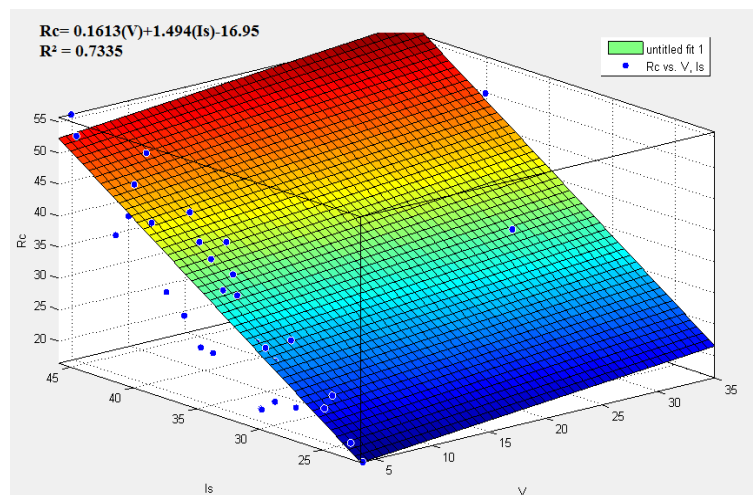


Figure V. 33 : Corrélation entre la résistance à la compression, la vitesse d’ultrason et l’indice sclérométrique pour BHPI et BHPII

$$R_c = 0.1613(V) + 1.494(I_s) - 16.95 \quad (V.23)$$

$$R^2 = 0.7335$$

Dans la figure **V.33**, on présente une courbe de corrélation combinée élaborée entre les résistances à la compression par écrasement « R_c » et les mesures d’auscultations correspondantes (indices de rebondissement I_s et les vitesses ultrasoniques V) pour BHPI et BHPII. L’expression analytique proposée à cette corrélation, en utilisant la régression multiple, est une fonction de forme polynomiale présentée par l’équation **(23)** avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,733$. La corrélation est acceptable.

V.7.4 Corrélation (E_d) entre (V) et (I_s) pour les bétons BHPI

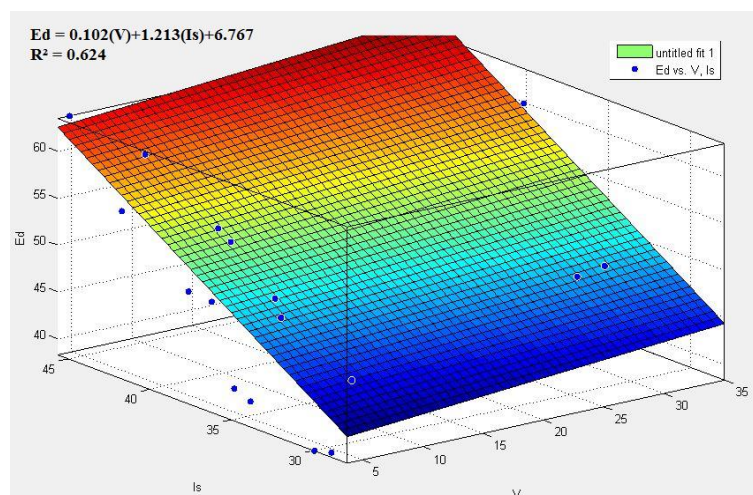


Figure V. 34 : Corrélation entre module élasticité dynamique, la vitesse d’ultrason et l’indice sclérométrique pour BHPI

$$E_d = 0.102(V) + 1.213(Is) + 6.767 \quad (V.24)$$

$$R^2 = 0.624$$

Dans la figure V.34, on présente une courbe de corrélation combinée élaborée entre la module élasticité dynamique et les mesures d'auscultations correspondantes (indices de rebondissement **Is** et les vitesses ultrasoniques (**V**) pour **BHPI**. L'expression analytique proposée à cette corrélation, en utilisant la régression multiple, est une fonction de forme polynomiale présentée par l'équation (24) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,624$. La corrélation est acceptable.

V.7.5 Corrélation (E_d) entre (**V**) et (**Is**) pour les bétons **BHPII**

Dans la figure V.35, on présente une courbe de corrélation combinée élaborée entre la module élasticité dynamique et les mesures d'auscultations correspondantes (indices de rebondissement **Is** et les vitesses ultrasoniques (**V**) pour **BHPII**. L'expression analytique proposée à cette corrélation, en utilisant la régression multiple, est une fonction de forme polynomiale présentée par l'équation (25) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,947$. On constate une est très bonne corrélation

$$E_d = 20.31(V) + 0.368(Is) - 52.43 \quad (V.25)$$

$$R^2 = 0.947$$

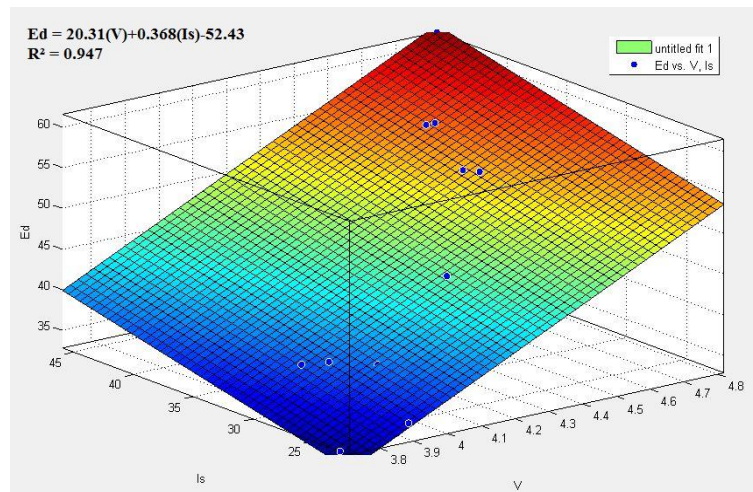


Figure V. 35 : Corrélation entre module élasticité dynamique, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique pour **BHPII**

V.7.6 Corrélation (E_d) entre (**V**) et (**Is**) pour les bétons **BHPI** et **BHPII**

Dans la figure V.36, on présente une courbe de corrélation pour **BHPI** et **BHPII**. L'expression analytique proposée à cette corrélation, en utilisant la régression multiple, est une

fonction de forme polynomiale présentée par l'équation (36) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,791$. La corrélation acceptable.

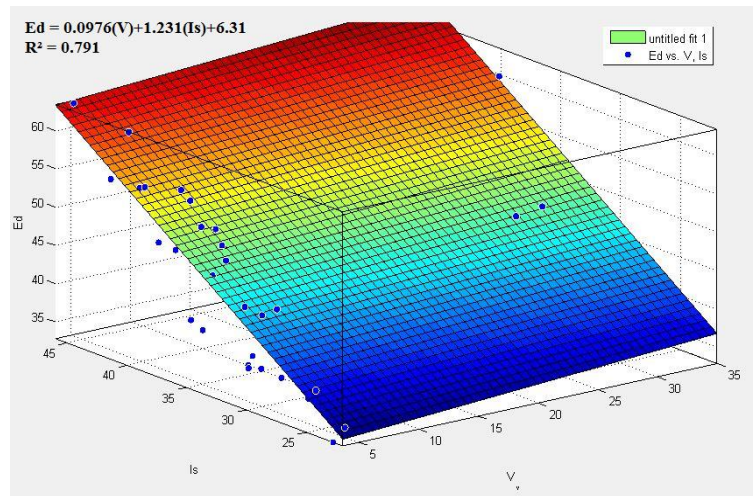


Figure V. 36 : Corrélation entre module élasticité dynamique, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique pour BHPI et BHPII

$$Ed = 0.0976(V) + 1.231(Is) + 6.31 \quad (V.26)$$

$$R^2 = 0.791$$

V.8 Synthèse de formules de corrélation proposées pour l'estimation des propriétés physiques et mécaniques d'un BHP

Le tableau V.9 regroupe l'ensemble des formules proposées pour l'estimation des propriétés physiques et mécaniques d'un BHP fabriqué à base des matériaux locaux avec différents types d'adjuvants.

Tableau V. 9 : Formules de corrélation proposées pour l'estimation des propriétés physiques et mécaniques d'un BHP.

Caractéristiques	Méthode	BHPI	BHPII	BHPI et BHPII
Résistance mécanique (MPa)	Ultrason	$R_c = 0.0522(V)^{4.4208}$ $R^2 = 0.9081$	$R_c = 19.912(V)^2 - 136.95(V) + 251.68$ $R^2 = 0.8482$	$R_c = 0.0391(V)^{4.598}$ $R^2 = 0.8715$
	Scléromètre	$R_c = 0.2209(Is)^{1.4284}$ $R^2 = 0.6667$	$R_c = 6.0275e^{0.0501Is}$ $R^2 = 0.8013$	$R_c = 0.1577(Is)^{1.5279}$ $R^2 = 0.7795$
	Combiné	$R_c = 0.2225(V) + 1.423(Is) - 16.45$ $R^2 = 0.599$	$R_c = 26.77(V) + 0.564(Is) - 99.61$ $R^2 = 0.898$	$R_c = 0.1613(V) + 1.494(Is) - 16.95$ $R^2 = 0.7335$
Module d'élasticité dynamique (MPa)	Ultrason	$E_d = 5.3183e^{0.5139(V)}$ $R^2 = 0.9907$	$E_d = 3.9364e^{0.5718(V)}$ $R^2 = 0.9196$	$E_d = 28.135(V) - 73.407$ $R^2 = 0.9449$
	Scléromètre	$E_d = 2.8361(Is)^{0.8094}$ $R^2 = 0.7123$	$E_d = 1.1675(Is) + 8.0318$ $R^2 = 0.821$	$E_d = 2.3599(Is)^{0.8601}$ $R^2 = 0.8323$
	Combiné	$E_d = 0.102(V) + 1.213(Is) + 6.767$ $R^2 = 0.624$	$E_d = 20.31(V) + 0.368(Is) - 52.43$ $R^2 = 0.947$	$E_d = 0.0976(V) + 1.231(Is) + 6.31$ $R^2 = 0.791$
La densité (Kg/m3)	Ultrason	$\rho = -0.094(V)^2 + 0.9523V + 0.0682$ $R^2 = 0.665$	$\rho = -0.0507V^2 + 0.3331V + 2.9151$ $R^2 = 0.410$	$\rho = 0.2916(V) + 1.085$ $R^2 = 0.4257$
	Scléromètre	$\rho = 1.7501(Is)^{0.092}$ $R^2 = 0.4405$	$\rho = 0.0144(Is) + 1.8404$ $R^2 = 0.4871$	$\rho = -0.0005(Is)^2 + 0.0514(Is) + 1.2534$ $R^2 = 0.5853$
Porosité (%)	Ultrason	-	-	$P = -12.396(V) + 62.041$ $R^2 = 0.9324$

V.8.1 Comparaison entre les résultats de différentes approches

Tableau V. 10: Formules de quelques corrélations existantes pour l'estimation de la résistance mécanique (R_c)

Références	Méthode	R ²	Formules
BOUDINA.R et LOURADIA (2012) [97]	Ultrason	0.0950	$R_c = -110.28 + 31.289(V)$
	Scléromètre	0.4976	$R_c = -9.5105 + 1.1843(Is)$
	Combiné	0.723	$R_c = -25.467 + 7.401(Is/V)$
Mr BELGUENDOUZE et al (2013) [98]	Ultrason	0.865	$R_c = -95.52 + 29.55(V)$
	Scléromètre	0.876	$R_c = -21.96 + 1.442(Is)$
	Combiné	0.917	$R_c = -62.59 + 14.55(V) + 0.8861(Is)$
HANNACHLS et al (2012) [99]	Ultrason	0.5213	$R_c = 97.5409 - 0.0162(V)$
	Scléromètre	0.3983	$R_c = 54.6389 - 0.7708(Is)$
	Combiné	0.5452	$R_c = 121.2976 - 0.0261(Is) + 0.5452(V)$

Tableau V.10 ci-dessus présente quelques formules de corrélations utilisées pour l'estimation de (R_c) en fonction de la vitesse d'ultrason, l'indice sclérométrique ou bien les deux.

V.8.2 (R_c) en fonction de (V)

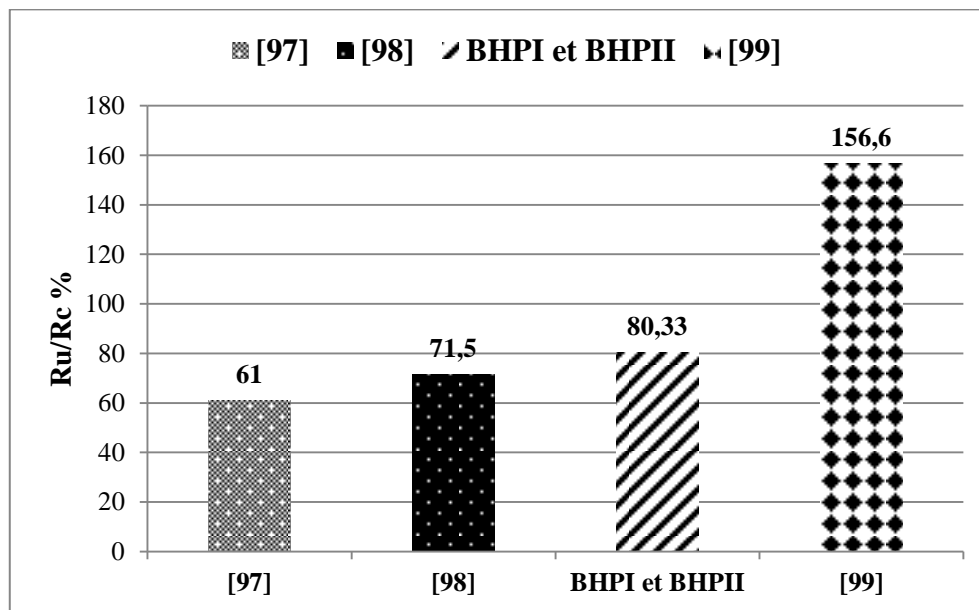


Figure V. 37 : Comparaison entre le résultat de l'écrasement et les valeurs estimées des différentes corrélations en fonction de la vitesse d'ultrason.

D'après Figure V.37, on remarque une variation parfois importante du (R_u) estimée en fonction de la vitesse d'ultrason par rapport à la valeur réelle (R_c) de l'essai d'écrasement, d'où on constate des écarts d'ordre -39%, -28.5%, -19.67% et +56.6% entre la résistance réel par écrasement et les résistances estimées par les référence [97], [98] notre corrélation et référence [99], la majorité des résultats sont comparable, sauf pour le cas des résultats obtenue avec la

corrélation des référence [99], cela peut-être due à la variation des bétons sur lesquels les corrélations proposées par ces références ont été constatées.

On remarque aussi que les formules proposées dans cette étude pour l'estimation de (R_c) sont très proches, donc acceptables avec un écart de (19.67%) par rapport à la valeur réelle.

V.8.3 (R_c) en fonction de (I_s)

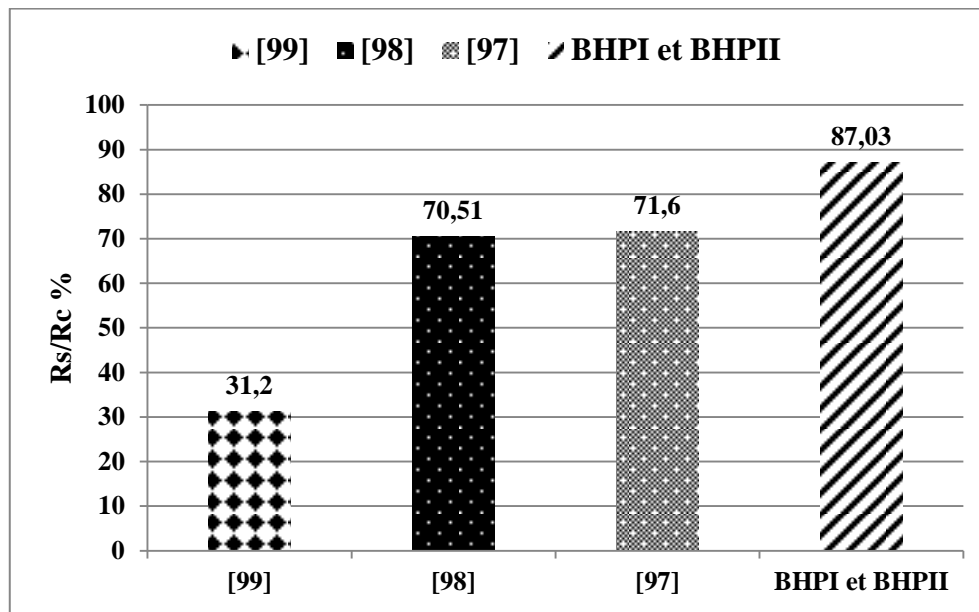


Figure V. 38 : Comparaison entre le résultat de l'écrasement et les valeurs estimées des différentes corrélations fonction de l'indice sclérométrique

Figure V.38 représente les écarts entre les résultats des différentes corrélations. Les écarts sont de l'ordre de 12.97%, 29.49%, 28.4% et 68.8% entre la corrélation proposée dans cette étude, [97], [98] et [99] et la valeur réelle de (R_c).

Les formules proposées dans cette expérimentation sont acceptables et comparables à celle obtenue par celle de l'essai écrasement direct. Les résultats d'estimation de la résistance selon le référence [99] sont très loin de la valeur réel.

V.8.4 (R_c) en fonction de (V , I_s)

La figure V.39 représente l'estimation de la résistance à la compression selon les corrélations proposées par quelques auteurs comparés avec la résistance réelle.

En remarque que toute les corrélations donnent des estimations inférieure de la valeur réelle d'environ 50% sauf pour la corrélation proposée par le référence [99].

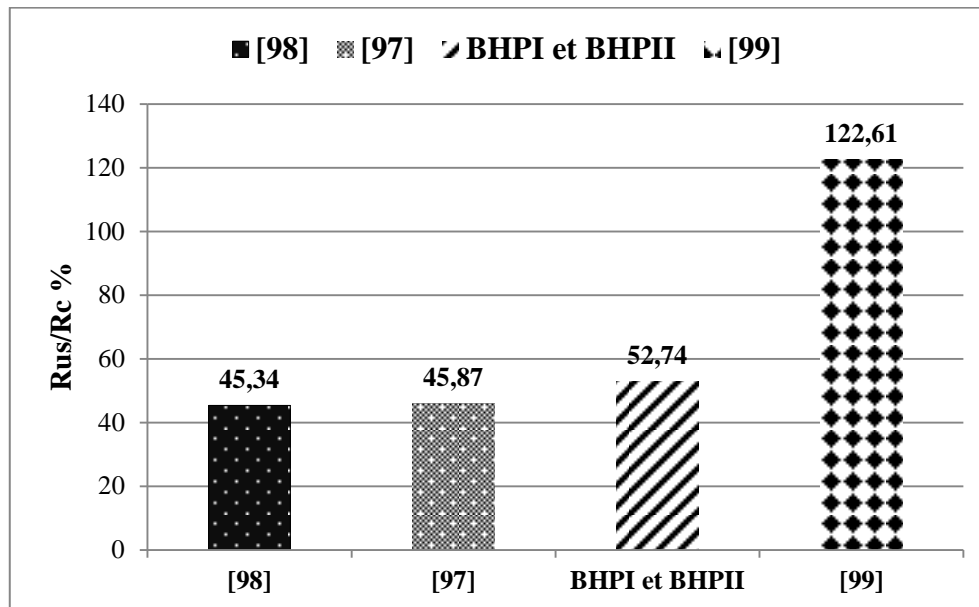


Figure V. 39 : Comparaison entre le résultat de l'écrasement et les valeurs estimées des différentes corrélations par la méthode combinée.

V.9 Conclusion

On peut conclure donc que les bétons préparés avec le superplastifiant MEDAFLOW30 ont développé des caractéristiques rhéologiques, physiques et mécaniques encore plus élevées par rapport aux bétons préparés avec le superplastifiant MEDAFLUID40. Cette amélioration des résistances est liée principalement à la meilleure efficacité du superplastifiant du point de vue de compatibilité avec le ciment utilisé, d'une part, ce MEDAFLOW30 disperse mieux l'empilement des grains de ciment que pour les MEDAFLUID40, et d'autre part, les MEDAFLUID40 ont un effet de retardateur de prise ce qui influe sur le bon développement des caractéristiques à l'état frais ou bien durci du béton.

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

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

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les objectifs de ce travail est de confectionner un béton à haute performance (BHP) à base des matériaux locaux, d'étudier l'effet du superplastifiant sur ses propriétés à l'état frais et durci et faire une étude corrélative afin de caractériser le béton physiquement et mécaniquement aux moyens des essais non destructifs.

Le but visé est l'obtention d'un BHP maniable et de bonne résistance. Toutefois, ce niveau de résistance reste toujours difficile à atteindre car la résistance d'un béton dépend du rapport E/L, la quantité du superplastifiant utilisée et notamment la qualité des agrégats employés dans la fabrication des BHP.

Les résultats expérimentaux nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

✓ 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.

✓ Le superplastifiant MEDAFLOW30 donne des résultats meilleurs par rapport au MEDAFLUID40 soit à l'état frais ou durci.

✓ On constate que le dosage optimal pour le superplastifiant MEDAFLOW30 est de **0.5%**, ce choix est basé sur des raisons économiques, car on obtient des résultats très proches à ceux obtenus avec le dosage de **1%**. Pour MEDAFLUID40, le dosage optimal est de **0.5%** aussi, parce que les résultats obtenus sont comparables à ceux des MEDAFLOW30.

✓ Les corrélations constatées dans cette étude sont très satisfaisantes et très encourageants.

✓ La comparaison entre les corrélations constatées dans notre travail, et ceux des littératures présente des écarts plus au moins importants ; cela mis en évidence l'influence des matériaux utilisés sur la fiabilité des résultats obtenus.

Perspectives

Nous proposons que la présente étude peut être complétée dans des travaux futurs par :

✓ L'utilisation d'autres types d'agrégats et autres superplastifiants pour la confection des BHP.

✓ Étude de l'influence de la cure sur les caractéristiques des BHP élaborés à base des matériaux de la région de M'Sila.

✓ Étude de la durabilité de ces bétons à haute performance.

✓ Enrichissement de l'étude corrélative par une évaluation d'autres types de béton (BAP, Béton fibrés,...).

✓ Réalisation des études de caractérisation des bétons aux moyens non destructifs sur des ouvrages existants de la région de M'Sila (Expertise).

Références bibliographiques

- [1] D.BENAMARA et B. MEZGHICH. « Vers un béton de haute performance élaboré de matériaux locaux «BHP» ». Courrier du Savoir – N°10, Avril 2010, pp.09-14.
- [2] H. GAHER. « Analyse de la résistance à la traction indirect et du retrait des bétons à Haute performance». Thèse de magister, USTHB, 2004.
- [3] P-C. AÏTCIN. « Bétons haute performance ». Édition, Eyrolles, Janvier 2001.
- [4] Alaejos Gutierrez P. et Fernandez Canovas M., « The modulus of elasticity of high performance concrete », Materials and structures, vol. 28, n° 184, p. 559-568, 1995.
- [5] De Larrard F., « Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances », Rapport de recherche LCPC, Paris, 1988, p. 335.
- [6] Domone P-L. and Soutsos M-N., « Proprieties of high strength concrete mixes containing PFA and ggbs », Magazine of concrete research, vol. 47, n° 173, p. 355-367, 1995.
- [7] Lang E. et Geiseler J., « Utilisation d'un laitier de hauts fourneaux à teneur importante en laitier » In : Fourth International Symposium on utilization of high-strength-high performance concrete, Paris, 1996, p.213-222.
- [8] De Larrard F., et Tondat P., « Sur la contribution de la topologie du squelette granulaire à la résistance en compression du béton », Materials and structures, vol. 26, p. 505-516, 1993.
- [9] Noumowe Nchambou A., « Effet des hautes températures (200-600) sur les bétons : cas des bétons à hautes performances », Thèse Doct. Ing : INSA-Lyon, juin 1995, p.232.
- [10] Alaejos Gutierrez P. and Fernandez Canovas M., « High performance concrete : requirement for constitutive materials and mix proportioning », ACI Material journal, title n°93-M26, p. 233-241, May-June 1996.
- [11] Dutruel F., « Les BHP et les BTHP, de quoi s'agit-il ? », Journée nationale d'échange d'informations sur les bétons à très hautes performances, organisée par le CERIB, 21 juin 1995, p.8.
- [12] Metha P-K. and Aïtcin P-C., « Microstructure basic of selection of materials and mix proportions for high strength concrete », In : Second International Symposium on high strength concrete, , Detroit : ACI 1990, p.278-308.
- [13] Addis B-J. and Alexandre M-G., « A method of proportioning trial mixes for high strength concrete », In : Second International Symposium on high strength concrete, Detroit : ACI 1990, p.310-321.
- [14] Tanaka Y., Ohta A. and Sugiyama T., « Polycarboxylate-based advanced superplasticizers for high performance concrete », In : International Symposium on the role of admixture in high performance concrete, Edited by J-G. Cabrera and R. RiveraVillareal, Rilem : Monterrey, Mexico, March 21-26 1999, p. 135-140.

- [15] Houst L., Flatt R. Bowen J-P. et al., « New superplasticizers : from research to application » In : Proceedings of International Conference on modern concrete materials : Binders, Additions and admixtures, Edited by Ravindra K., Dhir and Tomas D. Dyer, Dundee, Scotland, UK 1999, p. 446-456.
- [16] Malhorta V-M., « Innovative applications of superplasticizers in concrete-a review », In : International Symposium on the role of admixture in high performance concrete, Edited by J-G. Cabrera and R. Rivera-Villareal, Rilem : Monterrey, Mexico, March 21-26 1999, p. 421-460.
- [17] Uchikawa H., « Function of organic admixture supporting high performance concrete », In : International Symposium on the role of admixture in high performance concrete, Edited by J-G. Cabrera and R. Rivera-Villareal, Rilem : Monterrey, Mexico, March 21-26 1999, p. 69-96.
- [18] Uchikawa H., Hanehara S., Shirasaka T. et al., « Effect of admixture on hydration of cement, adsorptive behavior of admixture and setting of fresh cement paste », Cement and concrete research, vol. 22, n°6, 1992, p. 1115-1129.
- [19] Simard M-A, Nkinamubanzi C. Jolicoeur C. et al., « Calorimetry, rheologie and compressive strength of superplasticizers cement pastes », Cement and concrete research, vol. 23, n°4, 1993, p. 939-950.
- [20] Jolicoeur C., Nkinamubanzi P-C., Simard M-A et al. « Pozzolans and pozzolanic cements », In : The chemistry of cement and concrete, par F-M. Lea, Great Britain : Edward Arnold, 1970, p.414-453.
- [21] Baalbaki M., « Pratical means of estimating superplasticizer dosage : determination the saturation point », In : Superplasticizer-report of the Canadian network center of excellence on high performance concrete , University of Sherbrooke, December 1990, p. 49-50.
- [22] Dreux G., « Nouveau guide du béton », E. Eyrolles, Paris, 1998.
- [23] Aïtcin P-C., « Bétons haute performance », édition Eyrolles, 2001, ISBN 2-212- 01323-X.
- [24] Auperin M., Richard F. et al., « Retrait et fluage des bétons à hautes performances ». Annales. I.T.B.T.P, n° 474, mai 1989.
- [25] Bakker R., « Permeability of blended cement concrete », SP-79, ACI, 1983, Detroit, p.589-605.
- [26] Torrent R-J et Jornet A., « The quality of the concrete of low-medium and highstrength concretes », 1991, ACI SP-126, p. 1147-1161.
- [27] ASTM C 1202-91, « Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration », Annual book of ASTM standards, Section 4.
- [28] Jauberthie R., Temimi M. and Laquerbe M., « Hydrothermal transformation of tobermorite gel to 10 Å tobermorite », Cement and concrete research, vol. 26, n° 9, p. 1335-1339, 1996.
- [29] Nonat A., « Du gâchage jusqu'à l'état durci, ce sont les mêmes liaisons qui sont à l'heure », Journée technique de l'industrie cimentière, 21 janvier 1998, p. 6.

- [30] Le Roy R., « déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances », Le béton hydraulique, LCPC, Paris, 1982, p. 343.
- [31] De Larrard F. et Malier Y., « Propriétés constructives des bétons à très hautes performances : de la microstructure à la macrostructure », les bétons à très hautes performances : caractérisation, durabilité, application, 2e édition par Y. Malier, presse de l'ENPC, Paris, 1992, p. 129-156.
- [32] De Larrard F., « Prévision des résistances en compression des bétons à hautes performances aux fumées de silice ou une nouvelle jeunesse pour la loi de Féret », Annales I.T.B.T.P, n° 483, mai-1990.
- [33] Pedeches J-M., « Béton à hautes et très hautes performances : propriétés mécaniques et retrait. Aide à la formulation », Annales I.T.B.T.P, n° 525, série bétons 311, p. 1-41, 1994.
- [34] BAEL 91, « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant les états limites », Bulletin officiel, fascicule n° 62, Titre 1, section I du CCTG.
- [35] BPEL 91, « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant les états limites », Bulletin officiel, fascicule n° 62, Titre 1, section II du CCTG.
- [36] Ahmad S-H., « Short term mechanical properties. high performance concrete and application », By S.P. Shah and S-H Ahmad, London, 1994, Melburne, Auckland : Edward Arnold, p. 27-64.
- [37] P.COUSSOT, C. ANCEY. «Rheophysics of pastes and suspensions». EDP Sciences, Paris,300p,1999.
- [38] R.-J, FLATT, N.-S. MARTYS, L. BERGSTROM. «La rhéologie des matériaux cimentaires». Revue Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux, No 867, pp. 48-55, Juin- Juillet 2004.
- [39] J.P. JACOBS et al. «Le béton à haute performance». Bulletin FEBELCEM, 2007
- [40] CIM béton. «Les bétons : formulation fabrication mise en oeuvre».Tome2, 134p.
- [41] Regourd M., « Hydratation du ciment Portland, dans le béton hydraulique », édité par baron J. et Saute Rey R., 1982, Presses de l'école nationale des ponts chaussées, ISBN 2-85978-033-5, p. 193-221.
- [43] Nonat A., « Interaction between chemical evolution and physical evolution », In : the case of tricalcium silicate, Materials and structures, 1994, p. 187-195.
- [50] De Larrard F., « Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances », Rapport de recherche LCPC, Paris, 1988, p. 335.
- [45] Sarkar S-L. and XU A., « Why use mineral admixture in high performance concrete », In : L'Industria Italiana del cemento, October 1996, p. 715-726.

- [46] Wild S., Khatib J-M and Iones A., « Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticized metakaolin concrete », Cement and concrete research, vol. 26, n°10, 1996, p. 1537-1544.
- [47] Yurugi M., Mizobuchi T. and Terauchi T., « Utilization of blast-furnace slag and silica fume for controlling temperature rise in high-strength concrete » In : Proceedings Fourth CANME-ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Edited by V-M. Malhotra. Istanbul, Turkey, 1992, vol. 2, p. 1431- 1450.
- [48] Thomas D-L., Thomas M-D-A. and Ryell J., « Suitability of lead blast-furnace slag as a mineral admixture for concrete » In : Proceedings Sixth CANME-ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Edited by V-M. Malhotra. Bangkok, Thailand, 1998, vol. 1, p. 1041-1056.
- [49] «Solutions béton» - Hors-série - 1 SB-OA 2011-3 p1-7.
- [50] Journée technique «Performances de la fumée de silice», Chambéry, 27 juin 2012 , AFGC.
- [51] Dron R. et Voinovitch I-A., « Activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes », Le béton hydraulique, l'ENPC, Paris, 1982, p. 237-246.
- [52] Alexandre J. et Sebilleau J-L., « Le laitier de haut fourneau », Centre Technique et de Promotion des Laitiers (C.T.P.L), Paris, 1988, p. 340.
- [53] Komar A., « matériaux et éléments de construction », éd. Mir, Moscou, 1978.
- [54] Motureux B. et Harain H., « Comparaison de la réactivité de différentes pouzzolanes », 7ème Congrès International de Chimie des Ciments, vol. 3, p. 110-115, Paris, 1980.
- [56] Benna Y., « Valorisation des sables concassés fillérisés », CNERIB, Alger, 1995.
- [55] Norme AFNOR, « NF P 18-501 », mars 1992.
- [57] Husson S., « Étude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-fibres : Applications aux mortiers », Thèse Doct. Ing : INSA-Lyon, mars 1991, p.166.Adj
- [58] Dreux.G. : Nouveaux guide du béton, Ed . Eyrolles, 1979, 154p.
- [59] Emoto T, Bier T. A : Rheological behaviour as influenced by plasticizers and hydration kinetics, Cement and concrete research ,2007 ,647p.
- [60] Rixom M. R, Mailvaganam N. P : Chemical admixtures for concrete, E & F. N. Spon, Ed., London, 1986.
- [61] EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis (indice de classement P 18-342/A1).
- [62] Hornof, V, Hombek, R : Surface-active Agents based on Propoxylated Lignosulfonate, Journal of Applied Polymer Science, 1990.
- [63] Dawy, Shabaka : Polymer Degradation and Stability, 1998, 455p.

- [64] Platel .D : « Impact de l'architecture macromoléculaire des polymères sur les propriétés physico-chimiques des coulis de ciment » ; thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie 2005.
- [65] Neville M : Propriétés des bétons, traduction CRIB, p. 229-253, Editions Eyrolles, 2000.
- [66] Bessa.B : «Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers» ; thèse de doctorat de l'université de mentouri constantine, 2004.
- [67] T.Nawa, H.Ichiboji et M.Kinoshita : Influence of temperature on fluidity of cement paste containing superplasticizers with polyethylene oxide graft chains. International conference CANMET, Nice France, 2000.
- [68] E. Karmazsin : Cinétique et mécanismes d'hydratation des sulfates de calcium semihydrates, INSA Lyon, 1978.
- [69] C.M. Hirsch : « Untersuchugen zur wechselwirkung zwischen polymeren fliessmitteln und zementen bzw. mineralphasen der frühen zementhydratation », technischen universität, München, 2005.
- [70] Boussant.J : Growth of ettringite in diffusion controlled conditions. Influence of additives on the crystal morphology, Proceedings of the eleventh international conference on cement microscopy, p. 185, New Orleans, Louisiana, 10-13 April 1989.
- [71] DUPAIN. R, LANCHON.R et SAINT-ARROMAN .J.C : Granulats, sols, ciments et bétons, édition Casteilla 1995, 236p.
- [72] www. <http://fskb.ch/fr/beton/39>, «adjuvants-et-additions» ASGB - Association Suisse de l'industrie des Gravieres et du Béton.
- [73] CIM béton, Fiche technique édité par le centre d'information sur le ciment et ses applications « les adjuvants », Tome 3, Paris, 2008.
- [74] Techniques de l'ingénieur : «généralités sur les adjuvants», 10 févr. 1993.
- [75] Richard et Cheyrezy.M : Les bétons de poudres réactives, Annales ITBTP. Série béton 320,1995.
- [76] www.cetemco.ma, «atelier de formation sur les adjuvants dans les bétons et mortiers de ciment» Centre des Techniques et Matériaux de Construction, mai 2011.
- [77] www.synad.fr «Les Adjuvants pour Béton» ,2009.
- [78] www.sika.fr:« Adjuvants pour bétons et mortiers»,2005.
- [79] Sous la direction de Larrard .F: construire en béton, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 2000.

- [80] Baron.J : Chapitre 27, Les retraits de la pâte de ciment, béton hydraulique : connaissance et pratique Presses de l'école nationale des ponts et chaussées,1982, 485p.
- [81] Cormon.P: Bétons légers d'aujourd'hui, Ed. Eyrolles, Paris,1973.
- [82] Chanvillard. G : Connaissances générale sur le matériau béton, Ed. Aléas,1999.
- [83] BAALBAKIM : The influence of delayed addition of water reducer on the proprieties of normal density concrete,Second CANEMT/ACI international symposium on advances in concrete technology, Las Vegas, juin 1995
- [84] ACITCIN.P et BARON .J : Chapitre 4,les adjuvants normalisés pour béton,2002.
- [85] NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Adjuvants pour béton Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage. (Indice de classement : P 18- 342/A1).
- [86] Pertov .N : «Effets combinés de différents facteurs sur l'expansion des bétons causée par la formation différée de l'étringite».Thèse de doctorat à l'Université Mentouri Constantine ,2003.
- [87] www.google.com/patents «Weblike novel products made of a thermoplastic and cellulose fibers, their preparation and their use», 6 mars 1984.
- [88] EMILE.O : Technologie de construction, TomeI, Entreprise moderne d'Édition, Paris, 1997,88p.
- [89] LAPLANTE .P et CATHERINE : Chapitre 4,démarche et conseils pratiques quant au choix des adjuvants .
- [90] TOUKAL Abd Ennour, « influence du taux de chargement sur la caractérisation non destructif du béton par ultrason » Mémoire de Master, Université de M'hamed BOUGARA de BOUMERDACE.
- [91] C.N.E.R.I.B, « Cycle de formation 2004 ».
- [92] Djebri Noura (l'évaluation de la qualité du béton in situ) Mémoire de magister, Biskra 2006, pp06-76.
- [93] CHEKROUNMathieu, «Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface»Thèse de Doctorat,École Centrale de Nantes.
- [94] BREYSSE.D et ABRAHAM.O, « Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en bétons » Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [95] « Mesure de dureté de surface par rebondissement à l'aide d'un scléromètre », P18 , 9 9
- [96] PIERRE-CLAUDE AITCIN est Professeur à l'Université de Sherbrooke "Bétons haute performance" Editions Eyrolles 2001.

[97] BOUDINA.R et LOURADIA.A, « 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 de Master, Centre Universitaire de B. B. Arreridj. Algérie, 2012

[98] BELGUENDOUZE et al, «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

[99] S.HANNACHI and M.N.GUETTECHE, « Application of the combined method for evaluating the compressive strength of concrete on site. » Journal of Civil Engineering, Scientific Research,2012.

ملخص :

إن استخدام المميغات في صناعة الخرسانة تحسن بشكل كبير في الانسيابية و الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية، و تنتج عنها خرسانة جديدة تعرف بالخرسانة عالية الأداء .
في هذا العمل سوف ندرس نوع و نسبة المضافات على خصائص الانسيابية ، الفيزيائية و الميكانيكية للخرسانة عالية الأداء باستعمال مواد محلية و كذلك على الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية بالطرق غير التحطمية لإنشاء علاقات رياضية بين القيم المحصلة في التجارب ، و لهذا أستخدمنا نوعين من الاضافات (MEDAFLOW 30) و (MEDAFLUID 40) بنسب (0% ، 0.5% ، 1% ، 1.5%) .
أظهرت الدراسة أن زيادة في نسب كميات (MEDAFLUID 40) ، تنتج عنه زيادة الميوعة و المسامية و امتصاص الماء ، انخفاض المقاومة الميكانيكية بالنسبة لماء/رابط ثابت ، على العكس بالنسبة ل (MEDAFLOW 30) فقد أعطانا نتائج مرضية للغاية العلاقات المحصل عليها في هذه الدراسة تساعد في تقييم الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للخرسانة عالية الأداء مع نسب أخطاء مقبولة.

كلمات مفتاحية : خرسانة عالية الأداء ، المميغات ، خصائص الفيزيائية و الميكانيكية ، الطرق الغير التحطمية ، العلاقات .

Résumé :

L'utilisation des superplastifiants dans la confection des bétons améliore beaucoup les performances rhéologiques, physiques et mécaniques de ces derniers, et donne la naissance à de nouvelles gammes de béton tel que les bétons à haute performance (BHP).

Dans ce travail on va étudier l'effet du type et de pourcentage d'adjuvant sur les propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques des BHP fabriqués à base des matériaux locaux, ainsi que, leur caractérisation physico-mécanique aux moyens des essais non destructifs afin d'établir des corrélations mathématiques reliant les grandeurs mesurée à ceux estimées. Pour cela, on a utilisé deux types de superplastifiant (MEDAFLUID 40 et MEDAFLOW 30) avec des pourcentages variant de 0, 0.5, 1, et 1.5%.

L'étude nous a montré que l'augmentation du dosages de superplastifiants (MEDAFLUID40), conduit à l'augmentation de l'ouvrabilité, la porosité et l'absorption d'eau avec la diminution de la résistance mécanique pour un rapport E/L constant, contrairement au superplastifiant (MEDAFLOW30) qui donne des résultats très satisfaisantes ; les corrélations établie dans cette étude va permettre d'évaluer les caractéristiques physiques et mécaniques des BHP étudiée avec des erreurs acceptables.

Mots clés : Béton à haute performance, superplastifiant, propriétés physiques et mécaniques, essais non destructifs, corrélations.

Abstract:

The use of superplastiziers in the concretes composition improves much rheological, physical and mechanical performances of the latter and gives the birth novel concrete ranges such as high-performance concretes (HPC). This work is aiming to study the effect of the type and the percentage of admixture on the proprieties such the rheology, physical appearances and the mechanical response of the HPC made with the local materials, Also, their physico-mechanical characterization in the means of the non-destructive test methods. This in order to establish mathematical correlations relating the measured to those estimated. For this objective, we used two types of superplastiziers (MEDAFLUID 40 and MEDAFLOW 30) at percentages of 0, 0.5, 1, and 1.5 %.

The results obtained from the present study showed that the increase of dosages of superplastiziers (MEDAFLUID40), led to the increase of the workability, the porosity and the absorption of water with the decrease of the mechanical resistance for a constant ratio E/L, contrary to the superplastizier (MEDAFLOW30) which gave results very satisfactory results; the correlations established in this study allow to estimate the physical and mechanical characteristics of the HPC studied with acceptable errors.

Keywords: high-performance Concrete HPC, superplastizier, physical and mechanical properties, non-destructive tests, correlations.