



**Ministère de l'enseignement supérieure
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

**Evaluation de la qualité des bétons autoplaçant(BAP)
fibré exposés à haute température aux moyens des
essais non-destructifs (NDT) et essai direct**

Dirigé par :

Pr: RAHMOUNI ZINE EL ABIDINE

Mme : DJEBRI NOURA

Présenté par : AGGOUNE Abd allah

Promotion : 2015/2016.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Je dédie ce travail,

À ma famille : ma mère et mon père, frères et mes sœurs

À mes amis et à tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, je tiens à remercier mon

Promoteur MR: RAHMOUNI. ZINE EL ABIDINE

Mme : DJEBRI NOURA

Pour son aide appréciable, sa disponibilité, et ses conseils

Fructueux qui m'ont facilité la réalisation de ce travail.

Je remercie pareillement l'ensemble des membres du laboratoire

sur tout YAM NA BAKHTI

Je remercie ma famille et tous mes amis

Sommaire

Introduction Générale :.....	1
Chapitre 01	
Introduction:.....	4
I-1- Historique du béton de fibres :.....	4
I-2- Le béton de fibres :.....	5
I-3- Comportement mécanique des bétons renforcés de fibre :.....	6
I-3-1- Résistance à la compression:.....	6
I-3-1-1- Comportement en compression uniaxiale :.....	6
I-3-2- Résistance à la flexion :.....	7
I-3-3- Comportement en traction :.....	8
I-3-4- Comportement en fatigue :.....	9
I-3-4-1- Phénomène de fatigue:.....	9
I-4- Les avantages du béton de fibres :.....	10
I-5- Les fibres :.....	11
I-5-1- DIFFERENTS TYPES DE FIBRES :.....	11
I-5-2- Critère de choix du type de fibres :.....	16
I-5-3- Rôle des fibres:.....	18
I-5-4- Influence du dosage en fibres :.....	19
I-5-4-1- Optimisation rhéologique :.....	19
I-5-4-2- Optimisation mécanique :.....	20
I-6- Bétons autoplaçants fibres :.....	20
I-6-1- Composition des BAPF:.....	20
I-6-2- Formulation des BAPF:.....	20
I-6-3- Influence des fibres sur les propriétés à l'état frais:.....	21
I-6-3-1- Effet sur l'étalement:.....	21
I-6-3-2- Essai de V-funnel:.....	22
I-6-3-3- Essai J-RING:.....	23
I-6-4- Résistance à l'écoulement (relation entre la teneur en fibre et la viscosité plastique):.....	24
I-6-5- Comportement mécanique des bétons autoplaçants fibres :.....	24
I-6-5-1-Comportement à la flexion:.....	24
I-6-5-2- Comportement à la compression et à la traction:.....	25

Sommaire

I-7- Utilisation des BAP fibres dans les structures :	26
Conclusion :	28

Chapitre 02

Introduction :	29
II-1- Historique de béton autoplaçant :	29
II-2-Définition du béton Autoplaçant :	29
II-3- Influence des paramètres de formulation sur les propriétés à l'état frais :	30
II-3-1- Rôle des adjuvants :	30
II-3-2-Volume de pate élevé :	32
II-3-3- Volume de gravillons :	33
II-4- Les principaux constituants des BAP	33
II-4-1- Matériaux de base :	33
II-4-1-1- Le ciment	33
II-4-1-1-1-Les différents types de ciment	34
II-4-1-2- Les granulats :	35
II-4-1-3-L'eau :	35
II-4-2- Additions minérales :	35
II-4-3- Adjuvants chimiques :	36
II-4-3-1- Les superplastifiants :	36
II-4-3-2- Les agents colloïdaux :	37
II-4-4-Autres additions :	38
II-5- Caractérisations des BAP à l'état frais :	38
II-5-1- Mobilité en milieu non confiné (Essai d'étalement) :	39
II-5-2- Mobilité en milieu confine (Essai de la boîte en L)	40
II-5-3-Stabilité (Essai de stabilité au tamis) :	41
II-5-4- Essai de ressuage	41
II-6-Caractérisation des BAP à l'état durci	42
II-6-1- Les essais de compression	42
II-6-2- Les essais de traction par flexion	43
II-6-3 Module d'élasticité :	44

Sommaire

II-7- Différentes types des méthode :.....	45
II-8- Fabrication, transport et mise en place des BAP	46
II-8-1- Fabrication des BAP	47
II-8-2- Transport des BAP	47
II-8-3- Mise en place des BAP	47
II-9- Conclusion	48

Chapitre 03

Introduction.....	49
III-1- Définition de méthodes non destructives.....	49
III-2- Avantages et inconvénients des essais non destructifs.....	50
III-3- Essai d'auscultation sonore : [EN 12504-4].....	50
III-3-1- Principe de l'essai.....	50
III-4- Méthodes de mesure de la vitesse de propagation des ultrasons	51
III-4-1- Mesures en transparence directe.....	51
III-4-2- Mesures en surface.....	51
III-4-3- Mesures en transparence par rayonnement.....	52
III-4-4- Interprétation des résultats mesurés.....	54
III-4-5- Les avantage	55
III-4-6- Les inconvénients.....	56
III-5- Essai sclérométrique : [EN 12398].....	56
III-5-1- Principe de l'essai.....	56
III-5 -2 – Appareillage.....	57
III-5-3 - Exécution des mesures.....	58
III-5-4 - Exploitation des résultats.....	59
III-5-5 - Les avantages.....	59
III-5-6- Les inconvénients.....	60

Sommaire

III-6- La méthode combinée.....	61
III-6-1- Les avantages.....	62
III-6-2- Les inconvénients.....	63
III-7-conclusion	63

Chapitre 04

Introduction.....	64
IV -1-Les matériaux utilisés.....	64
IV -2- Caractéristiques du sable utilisé.....	64
IV -2-1 Analyse granulométrique : norme [NFP18-304].....	64
IV -2-2- Caractéristiques physiques du sable utilisé :.....	67
IV -2-2-1- Masse spécifique (absolue) : [NF P 18-555].....	67
IV -2-2-2- Masse volumique apparente : [NF P 18-555].....	68
IV.2.2.3-Porosité et compacité et indice des vides : [NF P 554].....	69
IV.2.2.4- Equivalent de sable : [NF 18-598].....	70
IV.2.2.5-Teneur en eau : [NF P 18-555].....	72
IV.2.2.6. Degré d'absorption d'eau : [NF P 18-555].....	73
IV -2-3- Caractéristique chimique du sable	73
IV -3- Caractéristique du gravier utilisé :.....	73
IV -3-1- Origine du gravier utilisé	73
IV -3-2- Analyse granulométrique	74
IV -3-3- Les caractéristiques physiques des graviers utilisés :.....	75
IV -3-3-1- Masse volumique apparent : [NF P 18-554].....	75
IV -3-3-2- La masse volumique absolue du gravier	76
IV -3-3-3- Compacité, porosité et l'indice de vide : [NF P 18-554].....	76

Sommaire

IV -3-3-4- Degré d'absorption d'eau (gravier)	76
IV -3-3-5- Teneur en eau du gravier	77
IV -3-4- Les caractéristiques mécanique des graviers utilisés.....	77
IV -3-4-1- Essai de résistance au choc (essai los Angeles) : [NF P 18-573].....	77
IV.3.5.Caractéristiques chimiques des graviers utilisés	79
IV -4- Caractéristiques du ciment utilisé	79
IV -4-1- Caractéristique physique	79
IV.4.2- Caractéristiques chimiques du ciment utilisé [CPJ42.5].....	80
IV.4.3-Les caractéristiques minéralogiques du ciment {CPJ42.5}	80
IV -5- la fibre de verre :.....	80
IV -5-1- Origine de fibre de verre.....	80
IV -5-2- Caractéristiques physiques et chimiques de fibre de verre.....	80
IV-6- Les Adjuvants	82
IV.6.1.Le SUPERIOR 126	82
IV.6.2.CARACTERISTIQUES	82
IV.6.3.DOMAINES D'APPLICATION	82
IV.6.4.DOSAGE	83
IV.6.5.MODE D'EMPLOI	83
IV.7. Le filler utilisé (marbre)	83
IV.7.1. Caractéristiques physiques et chimiques du marbre.....	83
IV.8. L'eau de gâchage	84
IV.8.1.Caractéristiques chimiques de l'eau utilisé	84
IV.9.Conclusion	85

Sommaire

Chapitre 05

Introduction.....	86
V -1- Formulation du béton autoplaçant.....	86
V -1-1- Les compositions des différents bétons.....	87
V -1-2-La composition d'un m ³ de béton	87
V-2- Préparation de mélange	87
V-3- Conservation des éprouvettes.....	88
V-4- Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais	89
V-4-1-Essai d'étalement au cône d'Abrams NFEN12 350-8.....	89
V-4-2- Essai de stabilité au tamis NF EN 12 350-11.....	90
V-4-3- Essai de la boîte en « L » NF EN 12 350-10.....	93
V-4-4-La masse volumique du béton autoplaçant NF EN 12 350-6.....	94
V-5- Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci	94
V-5-1-Essai compression NF EN206-1.....	94
V-5-2- Essai de traction par flexion : NF P18-408.....	96
V-5-3- Mesure de la perte de masse.....	97
V-5-4- Mesure la porosité à l'eau (P _{eau})	97
V-6- Détermination de la résistance par les essais non destructifs	98
V-6- 1- Ultrason [NA EN 12504-4]	98
V-6-2- Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NA EN 12504-2]	99
V-7-Conclusion.....	100

Chapitre 06

VI -1-Introduction :.....	101
VI -2-Presentation des résultats.....	101
VI -2-1- Résultats des essais à l'état frais.....	101
VI -2-2- Résultats des essais à l'état durci.....	104
VI -2-2-1- La résistance mécanique en compression et traction par flexion.....	104
VI -2-2-2 La porosité.....	109

Sommaire

VI -2-2-3-la perte de masse.....	110
VI-2-2-4-Les essais non destructifs	113
VI -2-3- Etude de corrélation	115
VI -2-3-1- la corrélation (Rc) en fonction de (V)	115
VI -2-3-2-la corrélation (Rc) en fonction de (Is)	117
Conclusion Générale.....	119

Liste des tableaux et figures

Liste des tableaux

Tableau I- 1 : Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus Utilisées	16
Tableau I-2– Recommandation concernant l’espacement normalisé des barres afin d’éviter le blocage dans les BAPF	24
Tableau III-1- Appréciation de la compacité du béton. [42].....	54
Tableau IV-1- Analyse granulométrique du sable	66
Tableau IV-2-La masse absolue de sable.....	68
Tableau IV-3- La masse volumique apparente à l’état lâche.....	68
Tableau IV -4- La masse volumique apparente a l’état compact du sable.....	69
Tableau IV-5- Porosité, compacité et indice des vides.....	69
Tableau IV-6-Équivalent de sable.....	71
Tableau IV-7-La classification de la nature sable en fonction d’E.S.....	72
Tableau IV-8-Teneur en eau de sable.....	72
Tableau IV-9- Degré d’absorption d’eau (sable).....	73
Tableau IV-10- Les Caractéristiques chimique du sable.....	73
Tableau IV-11-Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	74
Tableau IV-12- Analyse granulométrique du gravier 8/16.....	74
Tableau IV-13-Masse volumique apparente du gravier.....	75
Tableau IV -14- La masse volumique absolue du gravier.....	76
Tableau IV-15- Porosité, compacité et l’indice des vides.....	76
Tableau IV-16- Degré d’absorption d’eau du gravier.....	77
Tableau IV-17- Teneur en eau des graviers.....	77
Tableau IV-18-Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.....	78
Tableau IV-19- Classification des roches en fonction du coefficient L_A	79
Tableau IV -20-Analyse chimique du gravier.....	80

Liste des tableaux et figures

Tableau IV-21-Caractéristiques physique du CPJ-CEM/42.5.....	80
Tableau IV-22-Les compositions chimiques du CPJ42.5.....	80
Tableau IV-23- Les compositions minéralogiques du CPJ 42.5.....	80
Tableau IV-24- Caractéristiques physiques de la fibre de verre	81
Tableau IV-25- Caractéristiques chimiques de la fibre de verre.....	81
Tableau IV-26-Caractéristique de SUPERIOR 126.....	81
Tableau IV-27-Caractéristiques physiques du marbre.....	84
Tableau IV-28-Caractéristiques chimiques du marbre.....	84
Tableau IV-29- Caractéristiques chimiques de l'eau de gachage.....	85
Tableau V-1: Les compositions d'un 1 m ³ de béton.....	87
Tableau VI -1-Résultats d'essais sur le béton frais.....	101
Tableau VI -2 résultats de résistance compression.....	105
Tableau VI -3-Résultats de résistance a la traction.....	107
Tableau VI-4-Résultats de la porosité.....	109
Tableau VI -5-Résultats de perte de masse en béton autoplaçant témoin (BAP).....	110
Tableau VI -6-Résultats de perte de masse en béton autoplaçant (BAP1).....	110
Tableau VI -7-Résultats de perte de masse en béton autoplaçant (BAP2).....	111
Tableau VI -8-Résultats de perte de masse en béton autoplaçant (BAP3).....	111
Tableau VI -9-Résultats de perte de masse en béton autoplaçant (BAP4).....	111

Liste des tableaux et figures

Liste des figures

Figure I-1 : Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton (sans précautions particulières).....	7
Figure I-2 : Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton.....	7
Figure I -3 : Exemples de comportement en traction uniaxiale, sur éprouvette entaillée.....	8
Figure I-4 : Contribution des fibres dans le comportement à la traction.....	9
Figure I-5 : courbe de Wöhler.....	10
Figure I-5 : Fibre végétale.....	12
Figure I-6 : Fibre polypropylène.....	13
Figure I-7 : Fibre de verre.....	14
Figure I-8 : Fibre métallique.....	15
Figure I-9: Différentes formes géométriques de fibres métalliques.....	17
Figure I-10 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres.....	18
Figure I-11: Principe de couturassions d'une fissure.....	19
Figure I-12 : Effets des fibres sur l'étalement des BAP.....	22
Figure I-13: L'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibres.....	23
Figure I-14 – L'évolution du temps d'écoulement à travers l'essai V-Funnel en fonction du facteur de fibres	23
Figure I-15 : Courbe effort-flèche pour différentes compositions.....	26
Figure I-16 : Comportement à la traction de différentes compositions.....	27
Figure I-17 : Palplanches précontraintes à base de : mortier autoplaçant fibré (a), béton armé ordinaire (b).....	28
Figure II -1- Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.....	30
Figure II -2- Action des superplastifiants- Défloculation des grains de ciment.....	31
Figure II -3-Influence de la qualité du superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton.....	31
Figure II -4 : Actions des superplastifiants.....	37

Liste des tableaux et figures

Figure II -5 : Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow).....	39
Figure II-6 : Essai de la boîte en L (L-box test).....	40
Figure II-7 : Essai de stabilité au tamis.....	41
Figure II-8 : Essai de ressuage.....	42
Figure II-9 : Mesure de la résistance à la compression.....	43
Figure II-10 : Mesure de la résistance à la traction par flexion.....	43
Figure II-11- Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales.....	44
Figure II -12: Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation.....	44
Figure III-1- Mesures en transparence directe.....	51
Figure III-2 - Mesures en surface.....	52
Figure III-3 - Mesures en transparence par rayonnement.....	52
Figure III-4- Points de mesures pour une dalle et un poteau.....	53
Figure III- 5- Détérioration d'un béton par des cycles gel-dégel.....	55
Figure III-6 - Appareille sclérométrique.....	56
Figure III-7 - La résistance probable du béton en fonction de la mesure du recul (Linéaire ou angulaire).....	57
Figure III-8 - composition de scléromètre.....	58
Figure III-9- Mesure sur éprouvette cylindrique (16*32) cm3.....	59
Figure III-10- La relation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement d'un scléromètre utilisé à l'horizontale et à la verticale sur des surfaces de béton sèches et humides.....	60
Figure III-11 - Courbe d'estimation de la résistance à la compression in situ par la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques et l'indice sclérometrique selon U.....	62
Figure IV-1- Matériels utilisé pour l'analyse granulométrique.....	65
Figure IV-2- Courbes granulométriques de sable et gravier 3/8 - 8/16.....	67
Figure IV-3 : Essais d'équivalent de sable.....	70
Figure IV-4- Appareil de l'essai Los Angeles.....	78
Figure IV-5- Fibres de verre.....	81

Liste des tableaux et figures

Figure V-1- Le four.....	88
Figure V-2-Essai au cône d'Abrams.....	89
Figure V-3- Essai d'étalement.....	90
Figure V-4-Essai au tamis.....	91
Figure V-5- Stabilité au tamis.....	92
Figure V-6- Essai de boit L.....	94
Figure V-7- l'appareil de compression.....	95
Figure V-8-Essai de traction par flexion.....	96
Figure V-9-Formule de calcul de la résistance de traction.....	96
Figure V-10-Essai de porosité à l'eau.....	97
Figure V-11-Appareil ultrason.....	98
Figure V-12- Appareil Scléromètre.....	99
Figure VI -1-l'étalement en fonction de type de béton.....	101
Figure VI -2-Le taux de remplissage en fonction de type de béton.....	102
Figure VI -3-L'indice de ségrégation en fonction de type de béton.....	102
Figure VI -4- La masse volumique en fonction de type de béton.....	103
Figure VI -5-la résistance à la compression des différents types de béton en fonction de température.....	106
Figure VI-6-la résistance à la traction en fonction de température.....	108
Figure VI -7-La porosité des différents bétons en fonction de température.....	109
Figure VI -8-La perte de la masse pour les éprouvettes cubiques.....	112
Figure VI -9-La perte de la masse pour les éprouvettes prismatiques.....	112
Figure VI-10-La vitesse des différents bétons en fonction de température.....	113
Figure VI-11-L'indice des différents bétons en fonction de température.....	114
Figure VI -12- La résistance à la compression en fonction de la vitesse d'ultrason de béton BAP Témoin.....	115

Liste des tableaux et figures

Figure VI-13 - La résistance à la compression en fonction de la vitesse d'ultrason des bétons BAP 1 et BAP 2.....	115
Figure VI -14- La résistance à la compression en fonction de la vitesse d'ultrason des bétons BAP 3 et BAP 4.....	116
Figure VI -15- Résistance à la compression (R_c) en fonction de l'indice sclérometrique (I_s) de BAP Témoin.....	117
Figure VI -16- Résistance à la compression (R_c) en fonction de l'indice sclérometrique (I_s) Des bétons BAP 1 et BAP 2.....	117
Figure VI - 17- Résistance à la compression (R_c) en fonction de l'indice sclérometrique (I_s) des bétons BAP 3 et BAP 4.....	118

Résumé:

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton capable, sous l'unique effet de la pesanteur, de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et particulièrement encombrés sans nécessiter pour tout autant des moyens de vibration.

L'utilisation de la fibre de verre dans la composition du béton autoplaçant (BAP) est un travail qui vise d'une part la sauvegarde de l'environnement en réutilisant les déchets et d'autre part la valorisation des matériaux locaux dans le domaine de la construction, de ce fait, la fibre de verre a été introduite dans la composition des BAP suivant deux teneurs 0.1%, 0.15%.

Les matériaux testés sont 5 bétons de résistance courante dont 4 BAP avec fibres et un BAP témoin. Après exposition à des cycles de températures 200, 400 et 600°C des essais mécaniques (résistance à la compression, à la traction par flexion) et les essais non destructifs ont été réalisés. Parallèlement à cela, la détermination de la porosité à l'eau, et la perte de masse.

Les résultats expérimentaux montrent des comportements significatifs entre les BAP avec fibre et BAP témoin. Les essais de résistance à la compression ont permis de distinguer un gain de résistance entre 200 et 400 C°. Ce gain est expliqué par une réhydratation de la matrice cimentaire due à la migration de l'eau à travers les pores pour les BAP.

L'utilisation des méthodes non destructives a permis d'obtenir une corrélation acceptable pour la détermination la résistance du béton in situ déterminé par le scléromètre et des méthodes ultrasoniques de vitesse d'impulsion.

La méthode non destructive donner des résultats fiables. Mais sans connaître les matériaux qui constituants le béton ces résultats restent estimative.

Mots-clés: Béton autoplaçant, Haute température, Propriétés mécaniques, essai non destructif, fibre de verre.

Abstract:

The self compacting concrete (SCC) is a capable concrete, under the unique effect of the weight, to get in place in the framings even most complex and particularly cluttered without requiring for everything as many the vibration means.

The use of the fiber glass in the composition of the self compacting concrete (SCC) is a work that aims the safeguard of the environment on the one hand while reusing the garbage and on the other hand the valorization of the local materials in the domain of the construction, of this fact, the fiber glass has been introduced in the composition of the SCC following tow contents 0.1%, 0.15%.

The tested materials are five concretes of actual resistance which four SCC and WC (Witness concrete), after exposure of temperature cycles 200C°, 400C° and 600°C degrees of mechanical tests (resistance-compression, traction with flexing) and methode non destructif were made, in parallel to this, the water porosity determination, and the mass loss.

The experimental results proves that the significant behavior between the SCC and WC, the resistance-compression tests allows to distinguish a resistance gain inside the radius of 200 and 400°C, this gain is explained through the rehydration of the cement matrix due to the water migration through the pores for the SCC.

The use of nondestructive methods allowed to obtain a correlation acceptable for the determination of the concrete strength determined in situ by the Schmidt hammer and the Ultrasonic Pulse Velocity.

The nondestructive method gives reliable results. But without knowing materials which constituent the concrete these results remain qualitative and non quantitative.

Key words: self compacting concrete, fiber glass, mechanical tests, hight temperature, method nondestructive.

ملخص:

الخرسانة ذاتية الرص (دمك) هي خرسانة قادرة على التوضع تحت تأثير وحيد هو الجاذبية، يمكن تنفيذها حتى في الأشكال الأكثر تعقيدا وازدحاما على وجه الخصوص دون الحاجة إلى الكثير من وسائل الاهتزاز.

استخدام الألياف الزجاجية في تكوين الخرسانة الصب هو العمل الذي يهدف على حد سواء للحفاظ على البيئة من خلال إعادة استخدام النفايات وثانيا استخدام المواد المحلية في مجال البناء. لذلك، تم إدخال الألياف الزجاجية في تكوين الخرسانة بالمستويات التالية 0.1%، 0.15%. هذه الدراسة التجريبية في هذا السياق، وتعمل أساسا على دراسة تأثير دمج الألياف الزجاجية على خصائص الخرسانة في الحالة السائلة و الصلبة.

المواد المختبرة هي 5 خلطات خرسانية، 4 خرسانة ذاتية الرص مليفه و 1 خرسانة ذاتية الرص كشاهد. بعد التعرض لدرجة حرارة 200°، 400° و 600° درجة مئوية تم القيام بالاختبارات الميكانيكية (قوة ضغط وقوة الشد) والطرق اللاتحطيمية. إضافة إلى تحديد المسامية للمياه، وفقدان الكتلة.

تظهر النتائج التجريبية فروق ذات دلالة إحصائية بين الخرسانة ذاتية الرص المليفه وسلوك الخرسانة ذاتية الرص كشاهد دون الياف.

اختبارات المقاومة للضغط تبين إمكانية اكتساب الخرسانة ذاتية الرص للمقاومة بين 200° و 400° درجة مئوية. هذا الاكتساب يمكن أن يفسر بإمالة المصفوفة الإسمنتية بسبب خروج المياه من خلال مسامات الخرسانة ذاتية الرص .

استعمال الطرق اللاتحطيمية سمح لنا بإيجاد علاقة مرضية في تحديد المقاومة الميكانيكية للخرسانة في الموقع باستعمال سرعة انتشار الصوت ورقم الارتداد. بهذا يمكن القول أن الطرق اللاتحطيمية يفترض أن تعطي نتائج فعالة لكن بدون معرفة المواد المكونة للخلطة الخرسانية تبقى هذه النتائج تقديرية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ذاتية الرص، الحرارة العالية، الخواص الميكانيكية. الألياف الزجاجية، الطرق اللاتحطيمية.

Introduction générale :

Le béton est le matériau le plus utilisé dans les constructions à travers le monde. En effet, sa rapidité de fabrication, sa mise en place, son faible cout et ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité ont contribué à accroître son utilisation pour tous les ouvrages, comme des immeubles de bureaux ou d'habitation, des ponts, des centrales nucléaires, ...

Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué mais, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées ont été réalisées qui lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était destiné. Ainsi, les études menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, en particulier avec les bétons à hautes performances (BHP). D'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres (BFM) et les bétons de poudre réactive (BPR). Après la recherche du gain maximum de résistance et de durabilité, une étape supplémentaire a été franchie avec les bétons autoplaçants (BAP). Plus qu'une nouvelle famille de béton, les BAP constituent davantage une nouvelle technologie de construction. Celle-ci visait en effet au départ (fin des années 1980, au Japon) à optimiser la productivité des constructions en béton. Les différents avantages technico-économiques qu'elle présente ont suscité un intérêt grandissant des industriels à travers le monde, aussi bien dans les secteurs de la préfabrication que dans ceux des centrales de béton prêt à l'emploi. Les principaux avantages des BAP sont liés à leur mise en place qui ne nécessite l'apport d'aucune vibration, qu'elle soit interne ou externe. Ces avantages sont d'ordre technico-économique mais également social. Ainsi, l'absence de vibration des BAP engendre une diminution sensible des nuisances sonores ainsi que de la pénibilité du travail et une réduction des délais et des coûts globaux de production. Sa fluidité permet également de couler des milieux fortement ferraillés ou à géométrie complexe. Cette mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une très grande fluidité du matériau mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiants et de fines ou l'emploi d'un agent de viscosité.

L'objectif d'obtenir un béton auto plaçant plus résistant en flexion et en traction fait l'objet de nombreuses recherches, la voie la plus évoquée dans la littérature pour pallier à cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibres dans la formulation

Introduction générale

du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et de macro fissuration. Les fibres avec la capacité de contrôler les fissures jouant le rôle d'absorbeurs d'énergie.

Les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, c'est pour cette raison que depuis longtemps il y a une demande accrue pour des méthodes plus précises et, en même temps, plus souples d'évaluation de la qualité du béton.

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

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

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

Une importante caractéristique des essais non destructifs est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre les changements des propriétés du béton dans le temps.

Les objectifs visés par ce sujet est l'appréhension des différentes techniques d'évaluation de la résistance des bétons autoplaçant (BAP) fibrés exposés à haute température aux moyens des essais non-destructifs et essais direct.

Structure du mémoire :

Notre mémoire est structuré en 6 chapitres comme suit :

1^{er} Chapitre : Le béton de fibres:

- Historique de béton de fibres.
- Le comportement mécanique des bétons de fibres.

2^{ème} Chapitre : Béton autoplaçant :

- Définition de BAP et leurs constituants
- Caractéristiques à l'état frais et durci

3^{ème} Les essais non destructifs du béton:

- Définition
- Type des essais non –destructifs

4^{ème} Chapitre: Caractéristiques des matériaux utilisés :

- ❖ Les matériaux : sable, gravier, ciment, marbre, fibre de verre, adjuvant, eau de gâchage.

5^{ème} Chapitre : Techniques expérimentales des BAP Fibré :

- ❖ Composition de béton
- ❖ Etude de béton à l'état frais et durci

6^{ème} Chapitre : Résultats et Analyses.

- Conclusion générale
- Les références.

Chapitre 01

Le Béton de fibres

Chapitre 01 : béton de fibres.

Introduction:

L'objectif de rendre le béton plus résistant en flexion et en traction suscite encore l'attention de nombreuses recherches. Une des voies explorées dans les années 1980/90 a été de travailler sur l'accroissement de la résistance à la compression du béton. [1] La piste la plus évoquée dans la littérature pour pallier cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibres métalliques dans la formulation du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macro fissuration. Les fibres ont la capacité ainsi de contrôler l'ouverture des fissures, jouant le rôle d'absorbeurs d'énergie [2]. Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, par leur résistance en traction, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée. Pour autant, l'efficacité de la fibre passe par une maîtrise de son orientation. La connaissance précise de l'orientation des fibres serait un facteur qui assurerait le bon dimensionnement des structures, permettant ainsi l'optimisation de la quantité de fibre à prévoir dans la formulation. Sur ce point, le dimensionnement des bétons renforcés de fibres se fonde sur l'hypothèse d'une répartition des fibres aléatoire en orientation et homogène dans la masse [2].

I-1- Historique du béton de fibres :

Une analyse profonde de ce concept nous indique que cette idée est très ancienne et date depuis l'antiquité. En effet les pharaons ont pensé à l'idée des pailles pour renforcer la brique de boue d'après Exode [3,4] comme il est le cas Finlandais utilisant pour la 1ère fois, les fibres d'amiante dans le renforcement des poteries en argile, il y'a de cela 5000 années. [3]

D'autres sources [4,5] ANTOINE, E.N - Mars 1985 et ACI COMMITTEE 554 Mars-Avril 1984 ont indiqué que l'usage de cette technique par le biais de pailles afin de renforcer les briques, tandis que les poils des animaux et les fibres pour renforcer le plâtre et la pâte de ciment. On peut noter aussi la réalisation, au milieu du XX é siècle, d'alliages métalliques avec fibre de carbone.

En 1910, une série d'essais pour améliorer la résistance du béton a été faite par J.PORTER qui a conclu que la présence des fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction.

Par la suite 1911, GRAHAM a établi un brevet sur les bétons de fibres. C'était le premier brevet Américain où il a décrit l'emploi des tranches d'acier comme des renforts

fibreuse dans les matériaux de construction. Un deuxième brevet Américain sur ce sujet a été pris par WEAKLY.

En 1912, qui consiste à l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec l'intermédiaire d'un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton. [6]

En 1920, A. KLEINLOGEL a déposé le premier brevet Allemand qui a décrit la synthèse d'ajouter un volume relativement important, de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usinée (par tournage) comme une masse d'acier.

Quelques années après, en 1938, un autre brevet a été établi par N. ZITEVIC en Grande Bretagne. Son procédé consiste à mélanger avec le béton des petits éléments en fer approximativement avec 100 mm de long et 1.00 mm de diamètre. Ces éléments métalliques sont très semblables aux fibres utilisées aujourd'hui pour armer le béton. Il a conclu qu'il y a une amélioration de la résistance du béton à la compression, à la traction et au cisaillement.

A partir de 1940, plusieurs procédés sont apparus dans de différents pays. Ces procédés recommandent en général l'inclusion des fibres d'acier dans le béton pour améliorer sa performance. Mais on note ici que celui de G.CONSTANTINESCO, en 1943 en Angleterre et en 1954 en U.S.A, mérite une attention particulière.

A partir des années 1970, il s'est produit une sorte de réveil dans le domaine de la technologie des bétons renforcés de fibres d'acier. La confiance acquise dans certaines propriétés spécifiques des bétons renforcés de fibres d'acier augmente de façon permanente par l'utilisation de ces bétons dans des applications industrielles.

Le premier article dans ce concept peut-être attribué à LANKARD et SHEETS. Dans cet article, ils ont confirmé que l'ajout de 1% à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance. [7]

I-2- Le béton de fibres :

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène. Les fibres, selon leur nature ont un comportement contrainte-déformation très différent. Elles peuvent, sous certaines conditions et pour certaines applications ou procédés, remplacer les armatures traditionnelles passives. Les fibres présentent des caractéristiques géométriques et mécaniques intéressantes selon leur nature. Chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques. [8]

I-3- Comportement mécanique des bétons renforcés de fibre :

On se propose d'analyser le comportement mécanique des bétons de fibres tel qu'il est rapporté dans la littérature, à la lumière des mécanismes physiques décrits ci-dessus.

Au préalable, il convient de définir ce qu'on entend par un béton témoin lorsqu'on cherche à le comparer à un béton de fibres [9], la démarche généralement adoptée consiste à fabriquer un béton et à le comparer au même béton auquel on a mélangé des fibres, on conçoit donc qu'on ne compare pas, en termes de maniabilité, ni de résistance, des bétons identiques. Rossi propose donc de comparer des bétons optimisés en termes de maniabilité (donc de compacité) : on formule, d'une part, un béton témoin et, d'autre part, un béton de fibres, tous deux par la méthode Baron - lesage en gardant la même valeur du rapport e/c et les mêmes constituants de la matrice (en nature mais pas en quantité), et on compare des bétons ayant la même maniabilité [10].

I-3-1- Résistance à la compression :

1-3-1-1- Comportement en compression uniaxiale :

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uniaxiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée.

De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité [11].

-Les résultats mis en évidence par différents chercheurs sur l'effet des fibres sur la résistance à la compression du béton renforcé de fibres montrent quelques divergences.

Cependant, ils sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression, dans certains cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime, dans d'autres une légère diminution.

Enfin, il faut rappeler l'influence de l'orientation préférentielle des fibres, ainsi, plusieurs auteurs ont montré que les fibres orientées perpendiculairement à l'axe de la sollicitation reprennent efficacement la fissuration, alors qu'une orientation préférentielle parallèle à l'axe entraîne une baisse de l'effort maximum. [11]

Des essais en compression biaxiale ont montré que le contrôle de la fissuration par les fibres apportait à la fois un gain de ductilité et une augmentation de l'effort maximal appliqué [11].

I-3-2- Résistance à la flexion :

Les essais de flexion qu'on appelle aussi « traction par flexion » ont l'avantage de retranscrire de manière plus réaliste ce qui se passe dans beaucoup d'éléments structuraux [12].

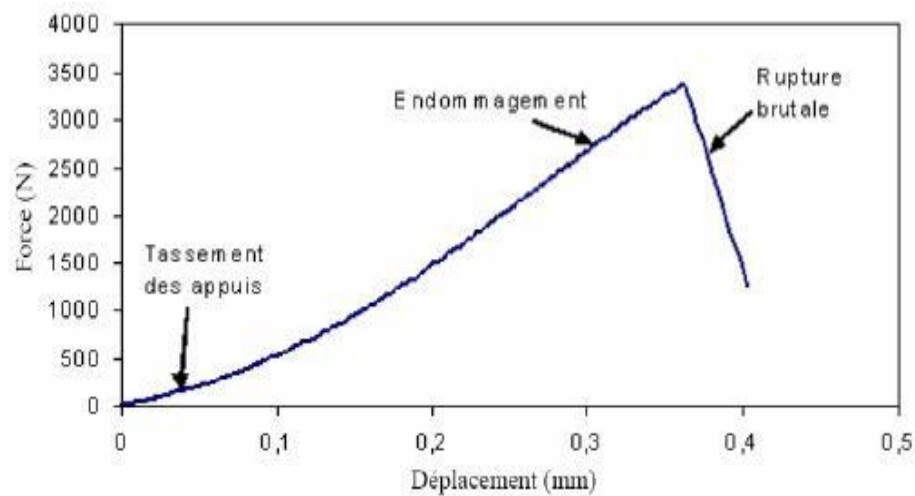


Figure I-1 : Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton (sans précautions particulières) [12].

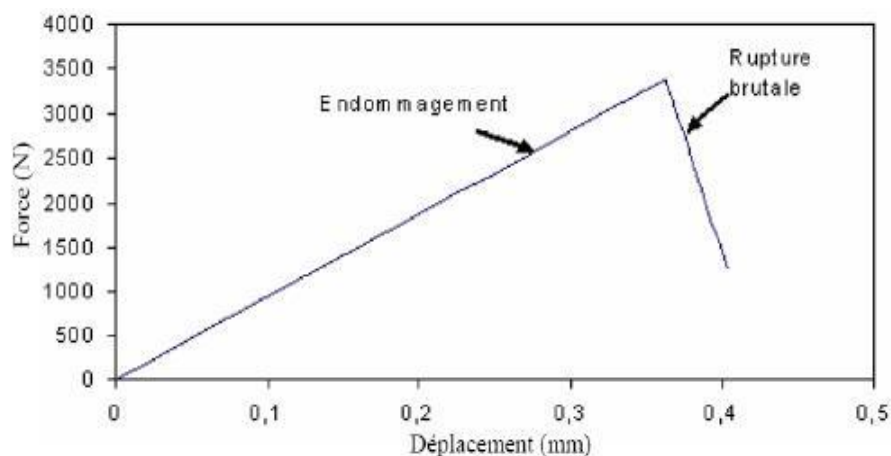


Figure I-2 : Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton [12].

Cette dernière figure représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement pour le béton, obtenue à partir d'essais statiques en flexion 3-points, l'évolution de la charge se déroule en deux phases : dans la première phase, la force augmente linéairement avec le déplacement pour atteindre la charge maximale, cette phase entraîne la propagation de microfissures d'interface et la propagation de microfissures dans la matrice ; dans la deuxième phase une diminution brusque de la charge est observée, conduisant à la rupture de l'éprouvette.

I-3-3- Comportement en traction :

Les fibres sont introduites dans le béton pour compenser la fragilité du matériau en traction par une couture de la macro fissuration.

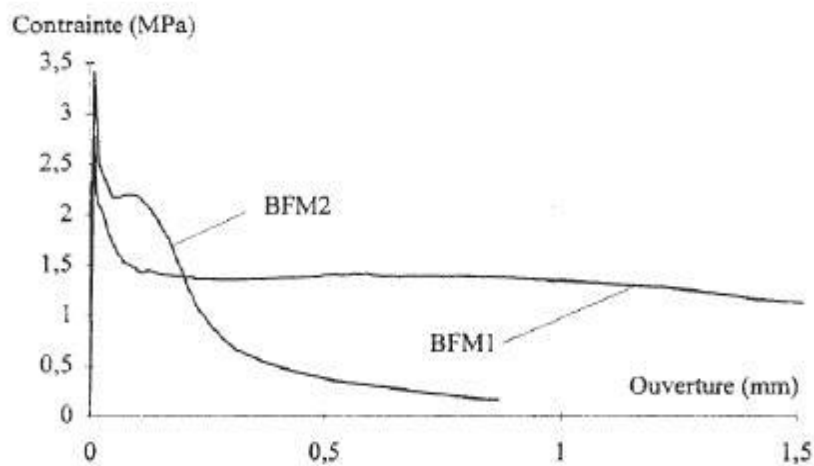


Figure I -3 : Exemples de comportement en traction uniaxiale, sur éprouvette entaillée

Pour une fibre fonctionnant par ancrage de forme (BFM1 : fibres à crochets en acier tréfilé - longueur 60 mm, diamètre 0,8 mm- dosées à 50 kg/m³ ; $f_c = 27,5$ MPa) et une autre par adhérence (BFM2 : fibres rubans en fonte amorphe -longueur 30 mm, largeur 1,7 mm- dosées à 30 kg/m³ ; $f_c = 40$ MPa). [12].

De nombreux auteurs utilisent des essais de traction "indirecte" : l'essai de fendage ou l'essai dit de "module de rupture" (essai de flexion pour lequel on mesure l'effort maximum atteint).

Le problème est qu'on cherche à tirer de ces essais une résistance intrinsèque à la traction, alors qu'ils intègrent un mécanisme de structure, on mesure donc, indirectement,

l'effet de couture des fibres à travers une macro fissure, mais cette mesure est soumise à des effets d'échelle importants.

Les fibres interviennent essentiellement dans la phase post-fissuration assumant un transfert des contraintes à travers la discontinuité du champ des déplacements, avant fissuration, les fibres n'ont aucune ou peu d'influence sur le comportement mécanique, que ce soit à la compression ou à la traction, une fois la fissure ouverte, les fibres par leur action directe restreignent la propagation de la fissure, la **Figure I-4** montre le comportement global d'une éprouvette en béton fibré soumise à la traction directe.

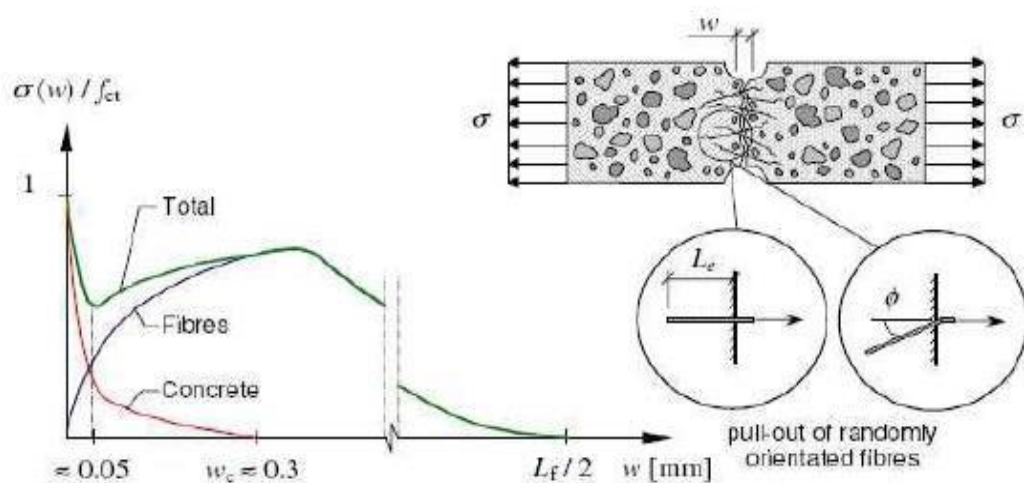


Figure I-4 : Contribution des fibres dans le comportement à la traction [13].

I-3-4- Comportement en fatigue :

I-3-4-1- Phénomène de fatigue :

On entend par phénomène de fatigue, la dégradation progressive d'une structure soumise à des sollicitations fluctuantes ou répétées, qui se traduit par l'apparition et le développement de fissures qui progressent avec le nombre de cycles appliqué, ce processus à caractère irréversible altère les propriétés mécaniques macroscopiques du matériau et peut conduire à la rupture pour un niveau de chargement inférieur à sa résistance statique si le nombre de cycles appliqué est suffisant. [11]

La représentation classique des résultats d'essais de fatigue est la courbe de fatigue ou la courbe de Wöhler (Figure I-5), cette courbe fait correspondre une durée de vie à un niveau de sollicitation exercée, qui peut être une contrainte ou une déformation imposée. [11]

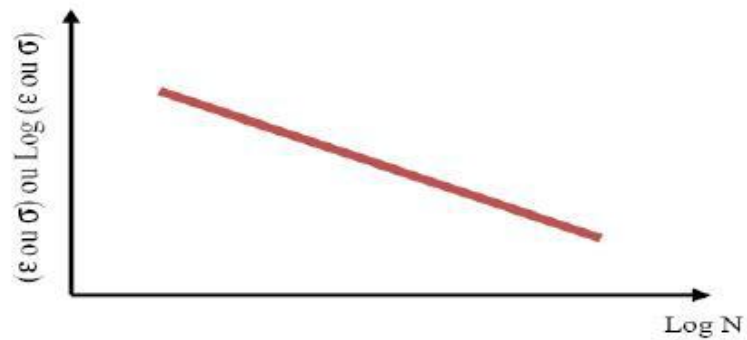


Figure I-5 : courbe de Wöhler

I-4- Les avantages du béton de fibres :

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique.

a) Aspect technique :

L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé.

-Les principaux avantages techniques sont :

- Un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton,
- Une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post fissuration• (résistance résiduelle),
- Une énergie d'absorption élevée,
- Une résistance aux impacts élevée,
- Une résistance à la fatigue élevée,
- Une augmentation de la résistance en cisaillement.

b) Aspect économique :

Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont :

- Une réduction des intervenants sur le chantier, ce qui implique une réduction du coût de mise en place et du temps de construction,
- Une optimisation du dimensionnement [14].

I-5- Les fibres :

Le terme Fibre se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois le diamètre, ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire des structures textiles, par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu. [14].

Dans le rapport sur l'état de l'art publié par le comité 544, de L'American Concrete Institute en 1982 nous pouvons lire : "Les fibres sont produites à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels sous différentes formes et dimensions".

I-5-1-Différents types de fibres :

Les fibres sont ajoutées aux matériaux cimentaires afin d'améliorer leurs caractéristiques à l'état durci, les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle, leur forme (droite, ondulée, aiguille, etc.), leur dimension (macro ou micro-fibre) et aussi par leur propriétés mécaniques, les principales fibres utilisées sont :

a)Fibres naturelles :

➤ Fibres minérales :

Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine ... etc), et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles, les fibres d'amiante autrefois utilisées pour l'isolation, se sont aujourd'hui révélées cancérogènes [9].

➤ Fibres végétales :

La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis, les fibres végétales résistent à la plupart des acides organiques mais sont détruites par les acides minéraux forts, il existe quatre sortes de fibres végétales : les fibres provenant des poils, les fibres de liber, elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction (fibres de bois) [9].



Figure I-5 : Fibre végétale.

b) Fibres synthétiques :

Cette famille regroupe plusieurs types de fibres comme (nylon, polypropylène, polyester ...etc.)

Elles sont apparues à la fin du XIX^{ème} siècle sous le nom de rayonne, elles sont dérivées de la cellulose naturelle, aujourd'hui, la plupart des fibres synthétiques proviennent des produits dérivés du pétrole et de polymères géants dont la structure ressemble à celle des matières plastiques, la première fibre plastique commercialisée avec succès, le Nylon, daté de 1938, depuis, de nombreux synthétiques, dont les fibres acrylique, l'aramide, l'oléfine et le polystyrène sont apparus, ces fibres ont également été étudiées à des fins industrielles très précises, telles que la fabrication des matériaux d'isolation, l'issus pare-balle, les fuselages et ailes d'avion .

c)Fibres artificielles :

Ce type de fibre est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier, il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et d'autre, elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction, nous allons présenter quelques principales fibres utilisées pour renforcer les mortiers et bétons [9].

➤ **Fibres de polypropylène :**

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille de polyoléfines, il est fabriqué depuis 1954 pour l'industrie textile, il a connu une extension croissante dans ce domaine ou il apporte les avantages suivants : bonne résistance à la traction qui peut atteindre 800 MPa, déformabilité élevée.

Ces fibres sont obtenues suivant les processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécanique élevées, l'ajout des fibres de polypropylène au mortier et au béton remonte à 1960 mais ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande Bretagne, ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de panneaux décoratifs, ainsi que l'élaboration de revêtement de façades de plusieurs constructions et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux [9].



Figure I-6 : Fibre polypropylène.

➤ **Fibres de verre :**

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 tours d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 μm , elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12 et 50 mm de long, ils sont regroupés en trois

types : les fibres de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre au borosilicate ,Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes:

- Bonne adhérence avec la matrice,
- Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues.....),
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion,
- Conductivité thermique relativement faible [9].



Figure I-7 : Fibre de verre.

➤ **Fibres métalliques :**

Ce type de fibres, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, à été reste encore l'objet de recherche très importante dans le monde, on ce limite aux fibres d'acier qui sont les plus utilisées dans le domaine de génie civil, en effet les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interrassiale entre fibre et la matrice, les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouent sur l'irrégularité de la surface de la fibre, ce qui les conduits aux nombreuses variété de fibre qui se différencient les unes des autres par leurs diamètre, leur section (rond, carré,, rectangulaire), leur longueur et leur mode d'opération, les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0,1 et 0,7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 mm.

Les fibres métalliques utilisées en dallage industriel sont les plus souvent des fibres tréfilées comportant généralement des fils de 1mm de diamètre, les différentes fibres existantes se différencient les unes des autres par le type d'ancrage actif dans la matrice du

béton, il existe des fibres fabriquées avec un ancrage dit déformable, par exemple des fibres à crochets telles que celle commercialisées par la société Bekaert sous la marque "DRAMIX".

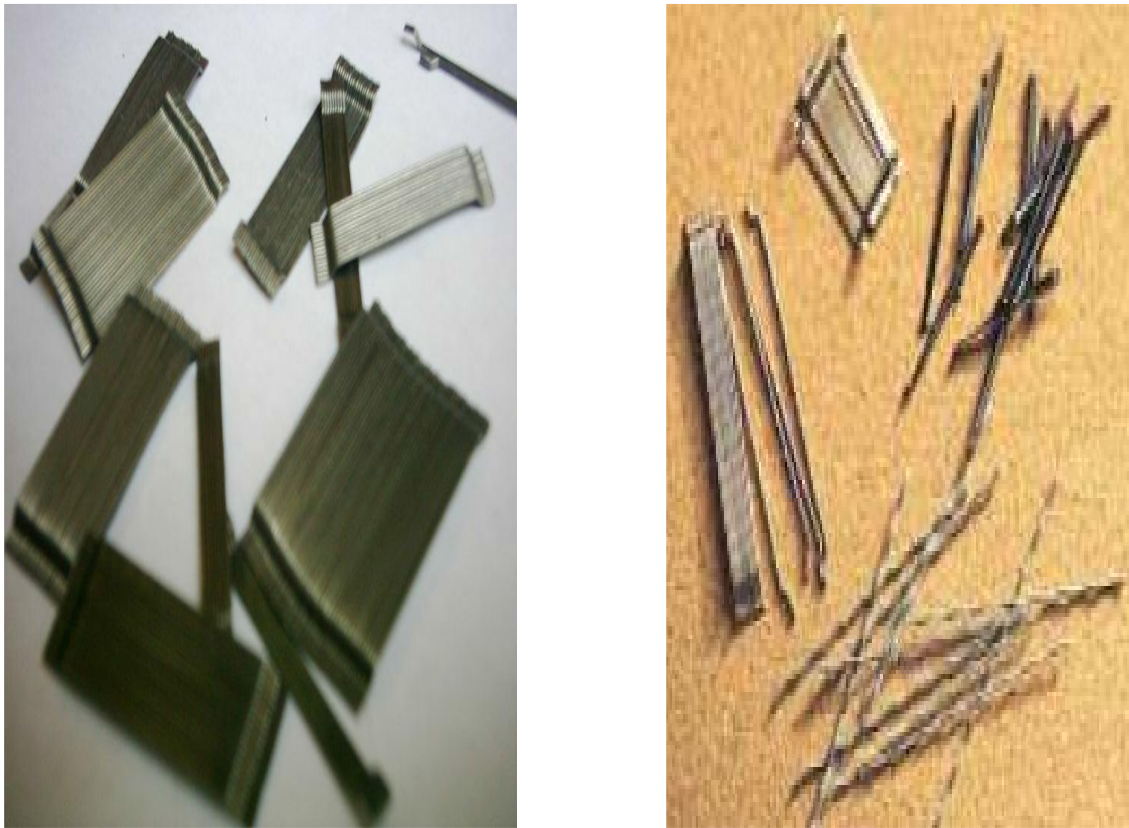


Figure I-8 : Fibre métallique.

Il existe d'autres types de fibres artificielles qui sont utilisé pour le renforcement des mortiers ou béton tell que, fibres d'amiante, fibres de cellulose.....)

Chaque type de fibres présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : Dimensions (diamètre, longueur...), formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...), résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibres. [9]

Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées sont présenté dans les tableaux suivant :

Fibres	Diamètre (μm)	Long mm	Densité	R_t MPa	E 10^3 MPa	Allongement A la rupture En %	Coeff. De Dilatation (μ / m)	R_{feu} Temps Max $^{\circ}C$
Acier	5 - 500	20 - 80	7.8	1000 - 3000	200	3 - 4	11	1500
Fonte (ruban)	36x2600 de section	50 - 60	7.8	2500	140	1	-	1500
Verre	5 - 20	40 - 70	2.6	1500 - 3000	80	2 - 3.5	9	800
Polypropy lène	10 - 200	25 - 75	0.9	400 - 750	5-10	15 - 25	90	150
Polyester	-	-	1.4	700 - 850	8	11 - 13		
Amiante	0.02 - 20	5	2.5-3.4	3000	8-15	2 - 3	1	1500
Carbone	5 - 9	Varia ble	1.7-2	2000 - 3000	250- 400	0.5 - 1.5	-	400 -1500
Sisale	10 - 50	1.50	1.5		130	3	-	

**Tableau I-1:Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus
Utilisées [15].**

I-5-2- Critère de choix du type de fibres :

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leur nature ou leur géométrie.

La nature, la forme, et les propriétés chimiques, physiques, et mécaniques des fibres choisies dépendent de :

- La qualité a conférée à la matrice cimentaire,
- La compatibilité avec les composantes de la matrice « ciment-granulats »,
- Une bonne adhérence avec la matrice cimentaire,
- Conservation de leurs propriétés dans le temps

Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles, selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients, certaines sont

affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles). [1]

Les fibres en amiante utilisées avec le ciment ont prouvées la bonne tenue, et la durabilité du composite dans le temps ; par contre les fibres de verre leur performance mécanique chute par la réaction de ciment sur le verre (effet des alcalins) malgré que ce problème est solutionné en partie par une mise au point d'un verre à haute teneur en zirconium l'utilisation des fibres de verre est toujours limitée.

Les fibres de nylon et polypropylène sont instables devant l'action des rayons ultraviolets ils doivent être protégés.

La technologie du béton armé a montré que l'acier a une très bonne compatibilité avec le béton :

- Protection par le ciment,
- Bonne adhérence,
- Coefficient de dilatation est presque le même,
- Grande résistance.

Par leurs propriétés et qualités les fibres métalliques sont les plus adaptables et les plus utilisées avec la matrice de béton. [16].

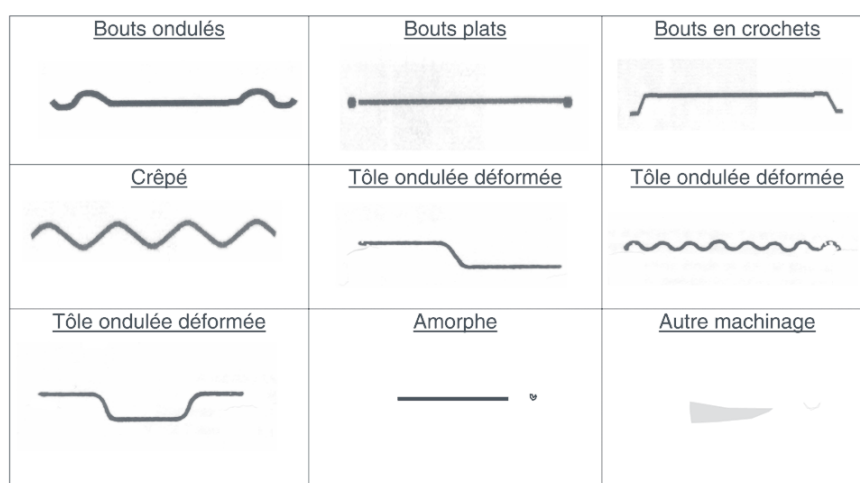


Figure I-9: Différentes formes géométriques de fibres métalliques.

I-5-3- Rôle des fibres :

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité, il a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la **(Figure I-10-a)**.
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes **(Figure I-10-b) [9]**.

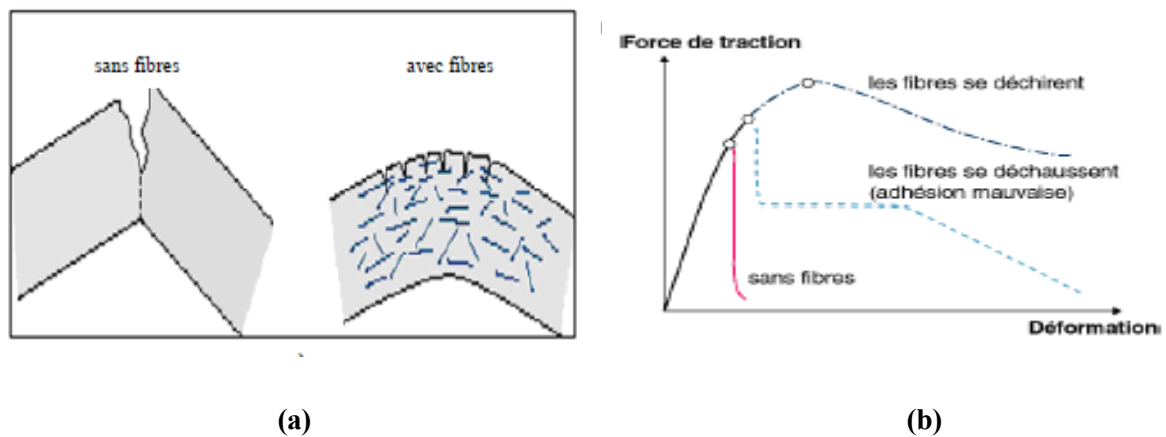


Figure I-10 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres [9].

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer la structure en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation, selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont insérées, les fibres permettent :

- ❖ l'amélioration de la cohésion du béton frais ; par exemple, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire,
- ❖ l'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration,
- ❖ la réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge,
- ❖ la réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur),
- ❖ l'augmentation de la résistance à la traction par flexion,
- ❖ l'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion [9].

Le principe de couturassions des fissures et limitation de leurs ouvertures est comme montré en (**Figure I-11**), les fibres qui traversent la fissure offrent une résistance résiduelle (résistance au-delà de la fissuration), ces fibres se déforment aux extrémités ancrées qui se redressent graduellement avec l'augmentation du chargement au-delà de la charge de fissuration. [17].

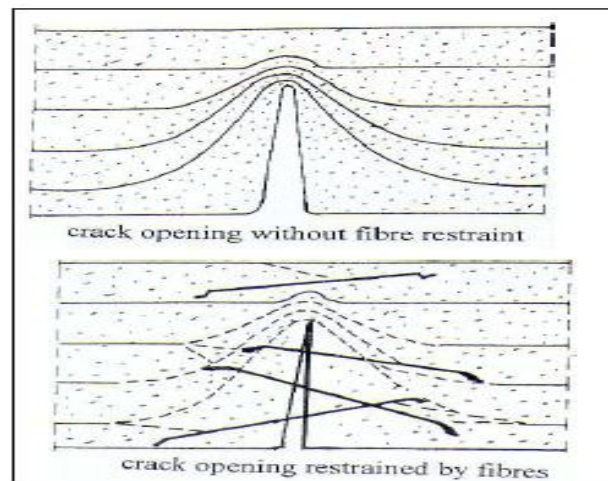


Figure I-11: Principe de couturassions d'une fissure [17].

I -5-4- Influence du dosage en fibres :

I -5-4-1- Optimisation rhéologique :

L'ajout de fibres dans un béton à l'état frais nécessite de nombreuses précautions notamment pour éviter la formation de pelotes et limiter le risque d'une orientation non préférentielle. La durée du malaxage influe sur la répartition des fibres au sein du béton frais. Si elle est trop courte, les fibres ne peuvent pas se répartir de manière homogène. Si elle est trop longue, la répartition peut devenir hétérogène du fait de la ségrégation des fibres.

La maniabilité du béton est diminuée par l'ajout de fibres. Plus la quantité de fibres et leur élanement sera fort, plus l'ouvrabilité du mélange sera affecté.

Il est donc important d'utiliser des fibres de dimensions optimales et d'ajuster la composition de la matrice afin de permettre au béton de conserver une maniabilité suffisante.

Lors de la mise en place dans les moules, il faut limiter l'écoulement qui est responsable de l'orientation préférentielle des fibres dont nous parlerons plus spécifiquement dans le paragraphe suivant.

L'orientation peut aussi être due à la vibration qu'il est important de limiter voir de supprimer en travaillant avec des bétons autoplaçants et à l'effet de paroi, ce dernier étant plus difficile à contourner [18].

I -5-4-2- Optimisation mécanique :

La quantité de fibres dans un béton est une caractéristique prépondérante vis-à-vis du comportement post fissuration. Soit deux fibres, l'une perpendiculaire au plan d'une fissure, l'autre inclinée par rapport à cette fissure.

Si les deux fibres sont suffisamment éloignées l'une de l'autre, elles agissent indépendamment vis-à-vis de la fissure, la fibre perpendiculaire étant plus efficace que la fibre inclinée. Le bilan du couple se résume alors à la somme de leurs actions individuelles. En revanche, si la distance entre les deux fibres est telle que l'action de la fibre qui travaille le mieux conduit, en outre, à confiner la fibre qui fonctionne le moins bien (c'est-à-dire provoquer une étreinte autour de cette fibre), cette dernière verra donc son efficacité vis-à-vis de la fissure accrue. Le bilan devient alors la somme de leurs actions individuelles plus quelque chose qui est la conséquence de leur « entraide », qu'on peut également qualifier de synergie positive.

Au contraire, lorsqu'on rapproche de plus en plus les deux fibres, il arrive un moment où la quantité de pâte de ciment qu'il y a entre elles devient tellement faible que l'enrobage de chaque fibre devient insuffisant (même si l'on augmente la quantité de pâte de ciment avec le pourcentage de fibres pour des raisons de maniabilité) pour assurer un fonctionnement correct de l'interface pâte-fibre.

Les fibres travailleront moins efficacement que si elles avaient travaillé sans interactions. Le bilan est alors la somme de leurs actions individuelles moins un effet qui est la conséquence de leur « promiscuité », qu'on peut également qualifier de synergie négative. A partir de ce seuil, plus on ajoute des fibres, moins elles seront efficaces individuellement, et on assistera, au mieux, à une très faible augmentation des caractéristiques mécaniques et, au pire, à une diminution. [18]

I-6- Bétons autoplaçants fibrés :

I-6-1- Composition des BAPF :

La composition de mélange du béton autoplaçant renforcé de fibres est souvent un compromis entre conditions sur l'état frais et durci : Une diminution soudaine d'ouvrabilité se

produit à un certain contenu de fibre, qui dépend de la composition du mélange et de type de fibre.

Les paramètres touchant sur le comportement du béton dans l'état frais ont été variés dans plusieurs études expérimentales pour trouver leur effet sur les caractéristiques principales du BAPF [19].

I-6-2- Formulation des BAPF :

La conception du mélange est souvent basée sur quelques principes de base : augmenter la teneur en pâte, le dosage en superplastifiant et le contenu des granulats fins à l'allongement et au volume croissant de fibres. ROSSI, HARROUCHE et HOY [19] ont approché la conception du mélange des matrices de béton autoplaçant renforcé de fibres sur une façon plus systématique : ils ont optimisés le squelette granulaire, le contenu et les caractéristiques de la pâte doit être tenue en compte pour lier l'ouvrabilité et la composition du mélange.

La distribution homogène et l'orientation des fibres sont souvent assurées mais rarement étudiées. la condition sur les caractéristiques principales du BAP demeure la même pour les BAPF ; l'obtention des BAPF peut être faite de différents points de : la capacité de remplissage ; le comportement de post-fissuration ; la classe de résistance à la flexion par fendage et les coûts. ROSSI et HARROUCHE ont proposé une méthode de conception pour optimiser le squelette granulaire du béton de tissu renforcé qui a été basé sur la méthode Baron-Lesage.

Ils ont fait toute prétention : d'abord, le béton le plus réalisable est obtenu au cas où le squelette granulaire serait optimisé. En seconde lieu, le premier juge varie indépendamment de la nature ou du volume de la pâte de ciment [19].

I-6-3- Influence des fibres sur les propriétés à l'état frais :

Une étude réalisée par Grunewalda réalisé un programme dédié aux propriétés des BAP fibrés en fonction de la teneur en fibres, du type de fibres (métallique et polypropylène avec différentes géométries) et du rapport massique sable/granulat, pour la composition de référence, le rapport sable/granulats de 40% était utilisé car considéré comme optimal pour la compacité du béton, après les différents essais d'ouvrabilité réalisés sur les différentes compositions des bétons à l'état frais, les conclusions ci-après ont été tirées[9].

I-6-3-1- Effet sur l'étalement :

L'analyse de ces résultats montre que l'étalement diminue lorsque la teneur en fibres augmente, le degré de diminution dépend de la teneur en sable dans composition de référence, on remarque aussi sur la (**Figure I-12-a**) une ovalisation de la galette pour les compositions renforcées de fibres métalliques ayant une grande surface spécifique (ex : Dramix 80/30 PB), ce qui indique que l'étalement est contrecarré par les fibres dans une ou plusieurs directions, en outre, pour certaines compositions (**voir Figure I-12 -b**) avec des fibres plus longues (ex : Dramix 80/60 BN), une ségrégation des granulats et des fibres au centre de la galette a été remarquée, la (**Figure I-12-c**) illustre l'aspect de la galette dans le cas intermédiaire, provoquant ainsi une ovalisation de la galette et une accumulation des particules au milieu (ex : Dramix 65/40 BN)[9].

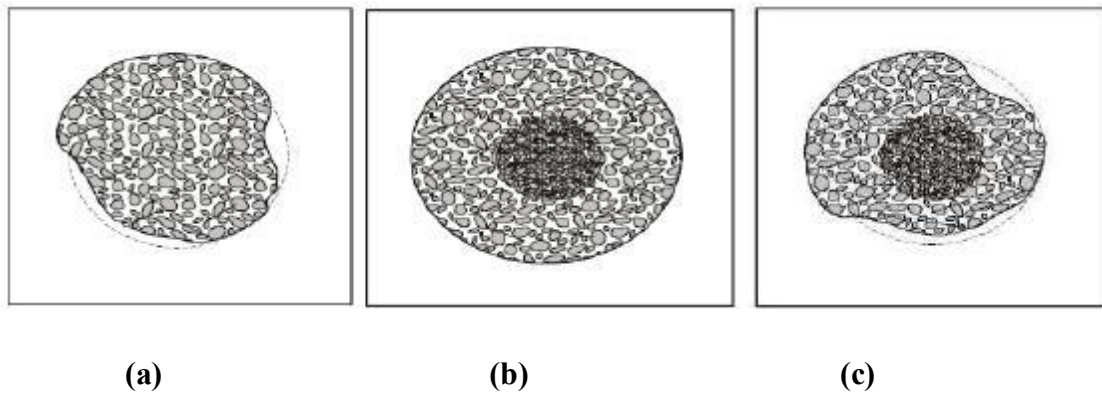


Figure I-12 : Effets des fibres sur l'étalement des BAP [9]

Sachant que l'élançement (L_f/D_f) et le dosage en fibres sont les facteurs majeurs influençant l'ouvrabilité, [20] se sont appuyés sur le facteur fibre défini comme le produit entre la teneur volumique en fibres V_f et l'élançement, la (**Figure I-13**) décrit l'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibres, aucune différence n'a été observée entre l'étalement mesuré directement après malaxage et 1 heure après malaxage, en revanche, une augmentation du facteur de fibre réduit sensiblement l'étalement.

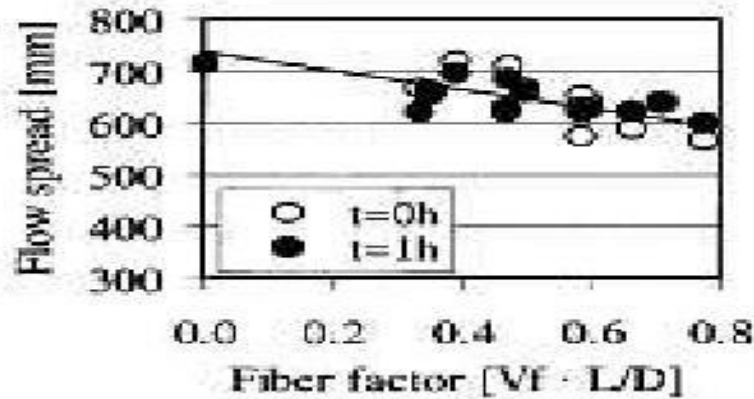


Figure I-13: L'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre [20].

I-6-3-2- Essai de V-funnel :

Les temps d'écoulement à travers l'entonnoir (V-funnel) pour les différentes compositions directement après malaxage sont dans une gamme comprise entre 4,5s et 5,7s. On note une augmentation linéaire du temps d'écoulement en fonction du facteur de fibres. Le comportement à l'écoulement des bétons évalué par l'intermédiaire de cet essai dépend essentiellement de la viscosité ainsi que de la taille du plus gros granulat par rapport aux dimensions de l'ouverture de l'entonnoir. La **Figure- I-14** montre que les temps de passage à travers l'entonnoir à t=1h sont nettement plus élevés qu'à t=0h.

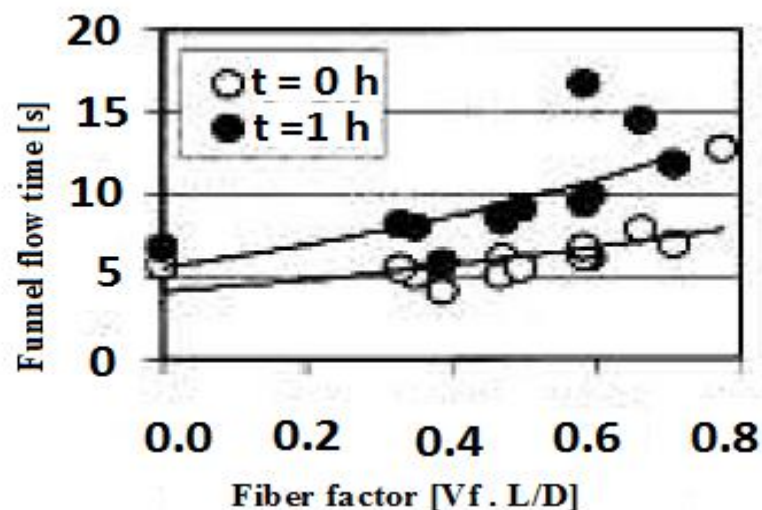


Figure- I-14 – L'évolution du temps d'écoulement à travers l'essai V-Funnel en fonction du facteur de fibres [21].

I-6-3-3- Essai J-RING :

Le J-Ring est un essai d'étalement modifié par les japonais pour évaluer la sensibilité au blocage des bétons fibrés dans le milieu confiné notamment par les armatures. Les fibres affectent de manière significative la capacité de passage par rapport à la composition de référence sans renfort de fibres. L'espace exigé des barres pour le non blocage augmente avec le dosage en fibre.

c/Lf [-]	Lf/df [-]	Max. mf [kg/m ³]
≥ 3	80	30
	65	60
≥ 2	65	30
	45	60
≥ 1,5	45	30

Tableau I-2– Recommandation concernant l'espace normalisé des barres afin d'éviter le blocage dans les BAPF [2].

Avec :

c : espacement entre les barres.

mf : dosage en fibres (kg/m³ de béton).

I-6-4- Résistance à l'écoulement (relation entre la teneur en fibre et la viscosité plastique) :

Grünewald et Walravens 2001b [1] ont constaté que lorsqu'on augmente le dosage en fibres, la porosité interne du squelette granulaire est plus importante et donc la viscosité plastique est plus élevée.

C'est une conséquence du frottement dit « solide » qui favorise la résistance à l'écoulement. Jusqu'à une concentration de fibres métalliques de 1 %, la viscosité plastique accroît avec une pente très faible. Au-delà de cette valeur, cette dernière devient nettement plus grande et l'écoulement du béton frais est quasi nul justifiant ainsi la consistance élevée du milieu. De plus, à taux de fibre donné, cette viscosité est plus importante lorsque les fibres sont longues [17].

I-6-5- Comportement mécanique des bétons autoplaçant fibres :

Les propriétés mécaniques permettant de caractériser un BAP fibré à l'état durci sont les résistances à la compression, à la traction, et à la flexion, les fibres influent directement sur l'ouverture de la fissure et donc sur la rigidité et la ductilité après fissuration, dans cette partie, nous nous limiterons au comportement instantané, le retrait et le fluage peuvent être, considérés comme similaires à ceux des compositions ordinaires, même si cela reste à confirmer compte tenu du peu de recherches menées sur ce sujet [9].

I-6-5-1-Comportement à la flexion :

Une augmentation de la quantité de fibres conduit à une amélioration de la rigidité, et du comportement en flexion des bétons autoplaçants renforcés de fibres.

Les études effectuées sur le comportement mécanique en flexion sous l'influence de deux types de fibres (métalliques de type Fibraflex (FM) 30x1, 6x0, 03 mm et synthétiques de type polypropylène (FS) 50x1, 6x0, 4 mm), les dosages utilisés étaient de 20 kg/m³ pour FM, 9 kg/m³ pour FS et (10 FM + 4,5 FS) kg/m³ pour un fibrage mixte (compositions qui seront plus tard utilisées dans nos essais), les résultats obtenus sont détaillés ci-après.

Les fibres métalliques « FM » qui sont réputées très adhérentes à la matrice ont conduit à une augmentation de la capacité portante néanmoins la résistance résiduelle chute rapidement pour des flèches imposées plus élevées.

Les fibres synthétiques « FS » n'ont pas permis d'augmenter la capacité portante, elles confèrent tout de même au système une résistance résiduelle post-pic maintenue jusqu'à des ouvertures des fissures très larges.

-L'association des deux types de fibres peut donc constituer un compromis efficace pour améliorer la résistance à la flexion des BAP et prolonger le plateau de la capacité portante résiduelle des structures jusqu'aux larges ouvertures des fissures.

-Les BAP semblent conférer une adhérence fibre-matrice supérieure par rapport au béton vibré, que ce soit avec des fibres métalliques ou synthétiques, les (**Figures I-15**) illustrent la différence des comportements entre les différents bétons en flexion en termes de courbe force-flèche [9].

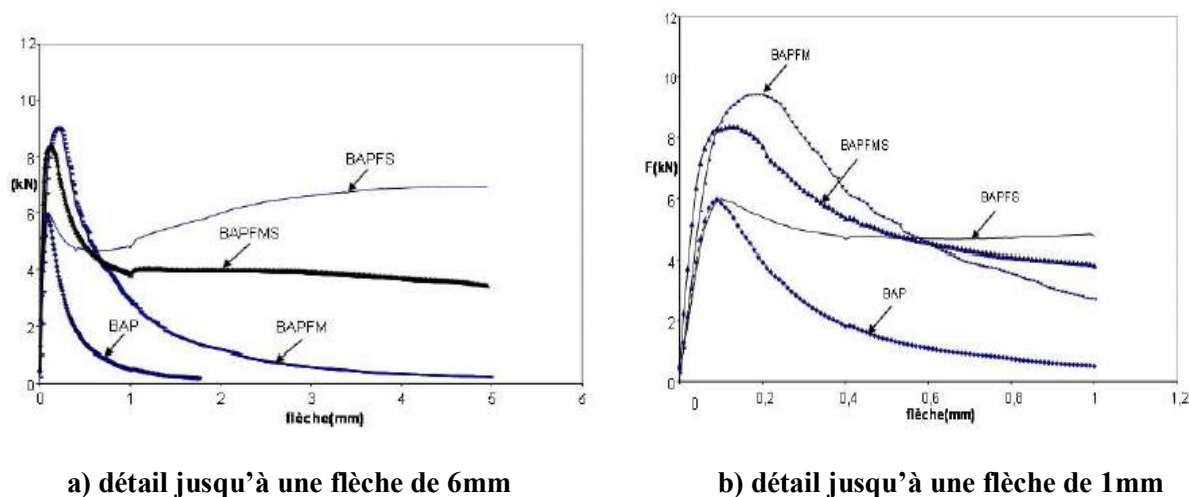


Figure I-15 : Courbe effort-flèche pour différentes compositions [9].

Une étude réalisée par Kawamata et al ont montré que l'augmentation de la longueur et du volume des fibres métalliques améliorerait le comportement à la flexion des bétons, dans cette étude, les conclusions doivent être entendues dans ces limites, l'auteur ayant utilisé des fibres métalliques de longueurs différentes 8, 16, 24 et 32 mm et un dosage volumique maximal en fibres de 1% [9].

I-6-5-2- Comportement à la compression et à la traction :

La résistance à la compression n'était pas significativement sensible à l'adjonction de fibres dans un BAP, la résistance au jeune âge est quelque peu faible, probablement due à un effet retard de l'hydratation des mélanges et/ou des fillers, lié aux adjuvants. Néanmoins, à long terme, la résistance correspond à celle d'un béton ordinaire avec un même rapport E/L.

Les résistances à la compression visées à 28 jours ont été atteintes pour tous les types de bétons, avec une très légère diminution des rapports R_{comp}/R_{trac} entre 7 et 28 jours. Cette réduction modérée est probablement due à l'amélioration de l'adhérence des fibres avec

Le béton dans le temps, mécanisme dont dépend fortement la résistance à la traction, les auteurs en ont tiré les principales conclusions ci-après.

Les fibres métalliques réputées très adhérentes agissent dès les plus faibles ouvertures de fissures ; elles confèrent au matériau une résistance apparente en traction améliorée en agissant dès la microfissuration.

- Les fibres synthétiques, glissantes, seront mises en tension plus progressivement et vont ponter les macrofissures en faveur d'une résistance résiduelle à la traction

maintenue ; les deux types de fibres ont des effets complémentaires en agissant sur des niveaux d'ouvertures de fissure différents [9]

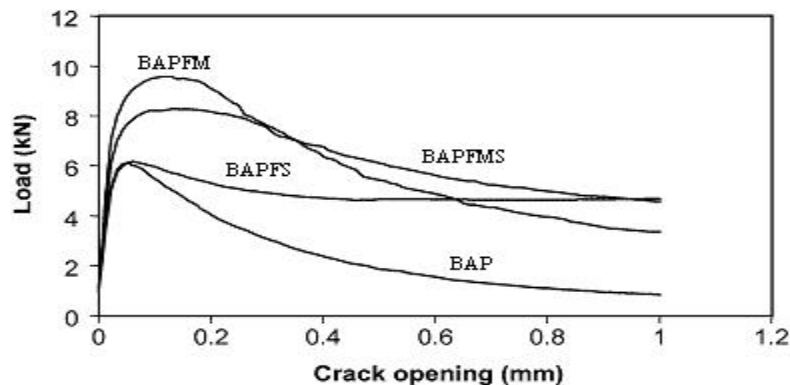


Figure I-16 : Comportement à la traction de différentes compositions [9].

I-7- Utilisation des BAP fibres dans les structures :

Nous allons présenter quelques exemples d'applications des BAP fibrés dans les éléments de structure.

➤ Palplanches :

A l'origine, les palplanches étaient réalisées en bois (maintenant en acier), il s'agissait de pieux faits de planches qu'on enfonçait dans la terre pour former un encaissement dans l'eau. 'Spa béton', un producteur hollandais d'éléments en béton préfabriqués propose aujourd'hui des palplanches en béton, ces éléments sont précontraints et renforcés avec des barres en acier. Comparés à ceux en acier, les éléments en béton sont plus durables et peuvent être employés comme partie portante de la charge d'une structure, des études ont été réalisées à l'université de technologie de Delft avec pour objectif la production de palplanches précontraintes sans armatures classiques, le programme était composé de quatre parties :

- étude préliminaire sur les caractéristiques d'un mortier de haute résistance avec les fibres métalliques ;
- optimisation d'une géométrie de palplanches, en combinant les aspects structural et économique, (le calcul a montré que les palplanches en bétons autoplacants fibrés seraient économiques si le prix de la composition était inférieur à 450 euros/m³) ;
- optimisation d'une composition basée sur l'étude de [Sato et al 2000], développée par [Grünwald et al 2002], satisfaisant tous les critères de conception, (plusieurs essais ont été effectués sur les caractéristiques du mélange optimisé à l'état durci) ;
- faisabilité de la nouvelle palplanche.

La **Figure I-17** permet de comparer les palplanches élaborées à base de béton autoplaçant renforcé de fibres (Dramix OL 13/0,16, $V_f=125$ kg/m³) à celles à base de béton ordinaire : on remarquera une diminution significative de l'épaisseur des éléments fibrés [9].



Figure I-17 : Palplanches précontraintes à base de : mortier autoplaçant fibré (a), béton armé ordinaire (b) [9].

Les palplanches précontraintes en béton autoplaçant renforcé de fibres présentent plusieurs avantages par rapport celles avec un béton standard : le coulage et le remplissage sont facilités, le stockage exige moins d'espace, et un nombre plus élevé d'éléments peut être transporté avec un camion (plus légers et moins encombrants), enfin, la mise en place dans la terre est plus aisée (moins de résistance à l'enfoncement dans le sol) [9].

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons résumé, l'état de connaissance sur l'historique et le comportement mécanique des bétons de fibres, les types, les avantages et désavantages de chaque type de fibres ainsi que l'influence de la présence des fibres dans les béton autoplaçant.

Nous avons présentés aussi quelques recherches sur les bétons autoplaçants avec fibres et leurs effets sur la maniabilité et la résistance.

Chapitre 02

Le Béton autoplaçant

Chapitre 02 : Le béton autoplaçant

Introduction :

Cette partie présente un aperçu détaillé sur le béton autoplaçant en tant que nouveau matériau. Il expose d'abord l'historique de leur développement ainsi que leur définition, ce chapitre fait une synthèse sur la description des constituants entrant dans la fabrication des BAP et les caractéristiques à l'état frais et durci, finalement, il met en relief les innovations et les avantages apportés par les BAP.

II-1- Historique de béton autoplaçant :

Les chercheurs K. OZAWA ET K. MAEKAWA de Université de Kochi (Tokyo) ont développé le premier prototype de BAP pendant l'été de 1988. Ces résultats ont été présentés par K. OZAWA pour la première fois au 2^{ème} Congrès de l'Asie de l'Est et Pacifique sur le Génie Civil et la Construction, tenu en Janvier 1989 à Chiangmai (Thaïlande) . Trois années plus tard, en Mai 1992, au 4^{ème} Congrès International CANMET & ACI à Istanbul, l'intervention du K. Ozawa a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération de béton.[22]

II-2- Définition du béton Autoplaçant :

Ces bétons sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans des coffrages très ferrailés. Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'auto-plaçant que si le matériau durci final présente des propriétés homogènes (pas de ségrégation) et présente de très bonne performance à court et à long terme. [23]

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais. Les critères caractérisant un béton autoplaçant sont :

1- les valeurs cibles d'étalement au cône d'Abrams sont généralement fixés dans la fourchette 60 cm à 75 cm (et pas de ségrégation visible en fin d'essai : auréole de laitance ou amoncellement de gros granulats au centre) ;

2- le taux de passage à la boîte en L doit être supérieur à 0,8.

3- Le béton doit être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée. L'absence de ségrégation visuelle lors de l'essai d'étalement au cône d'Abrams n'est pas suffisante.

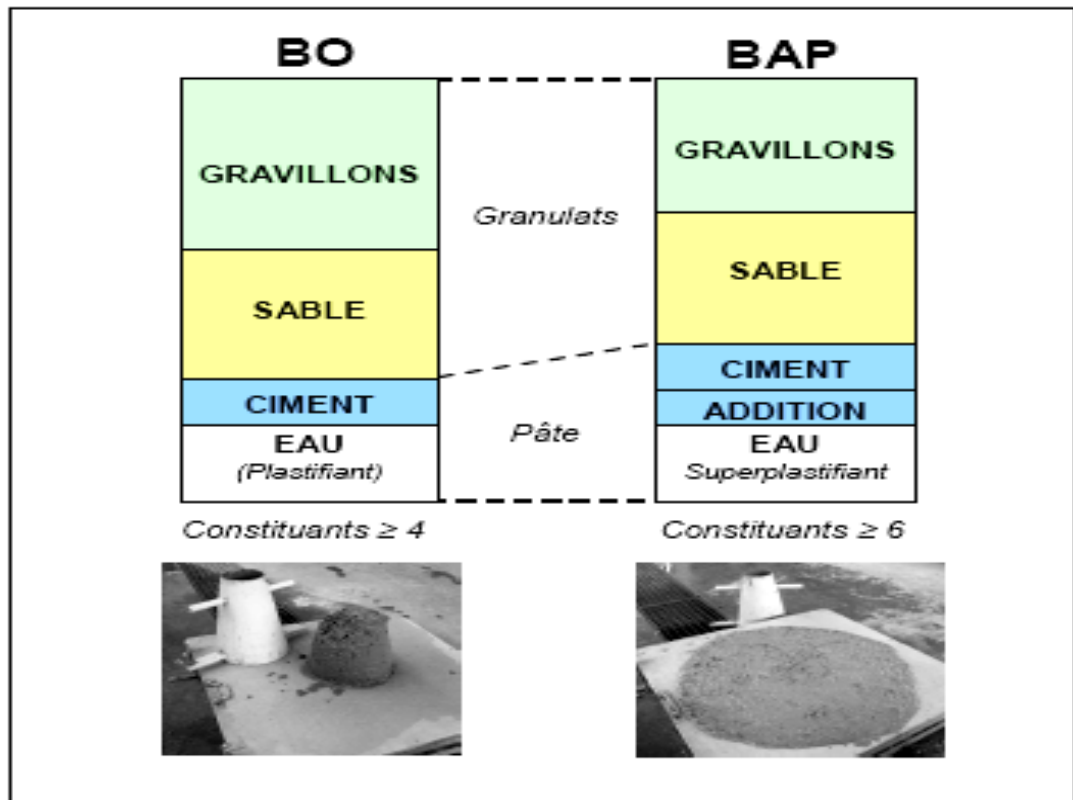


Figure II -1- Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP. [26]

II-3- Influence des paramètres de formulation sur les propriétés à l'état frais :

II-3-1- Rôle des adjuvants :

➤ Utilisation de superplastifiant :

L'apparition des bétons autoplaçant et des bétons à Hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants(SP). L'action principale des superplastifiants est de dé floclé les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (**Figure II- 2**). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles [24].

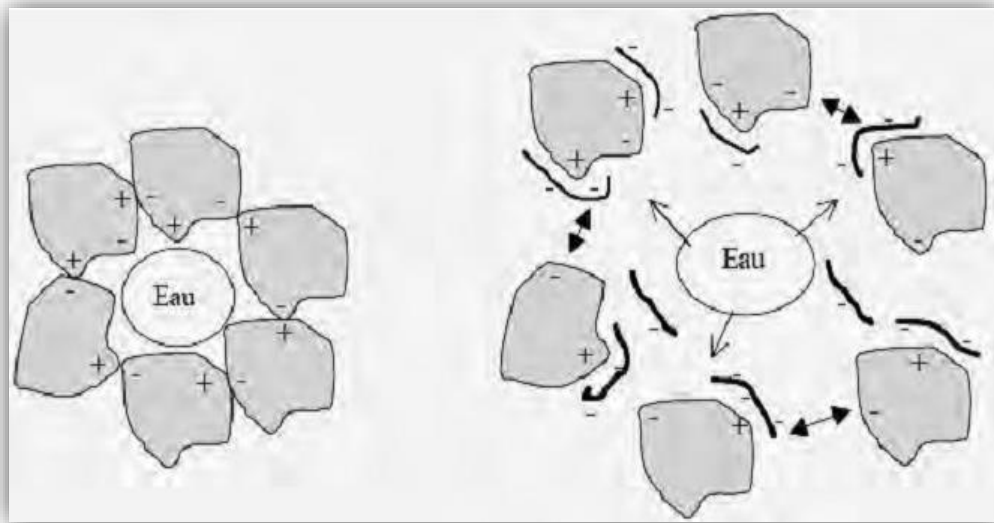


Figure II -2- Action des superplastifiants- Défloculation des grains de ciment [26]

-L'ajout d'un superplastifiant aide à augmenter la fluidité. La Figure -II -3- montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en superplastifiants [27].

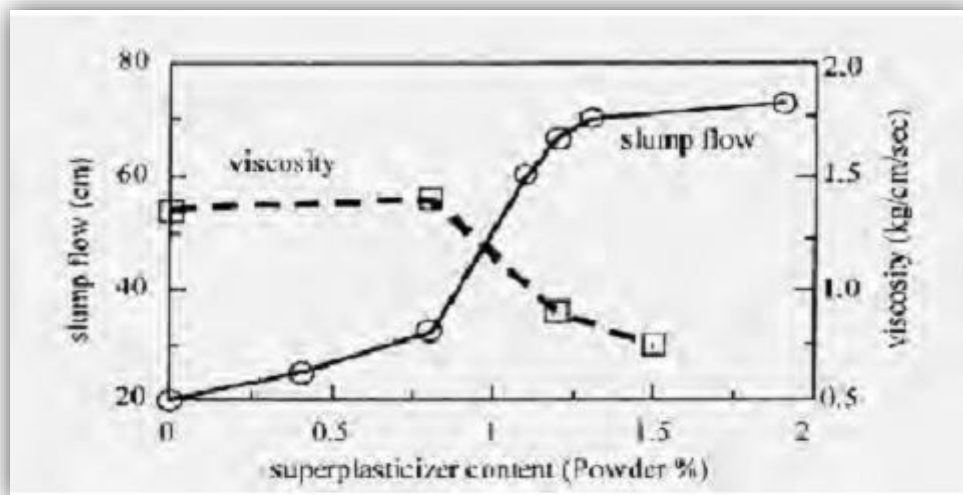


Figure -II -3-Influence de la qualité du superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [26]

Flatt et Houst [26] définissent l'action des superplastifiants en trois mécanismes :

- Une partie est adsorbée,
- Une partie est consommée par les réactions avec les hydrates,
- Une partie, en excès, reste en solution.

Ces auteurs [26] montrent qu'une couche de gel ou de monosulfo-aluminate (AFm) peut se former autour du ciment ce qui augmente la surface que doit recouvrir le superplastifiant pour disperser les grains. Donc, plus le ciment est réactif plus la quantité de polymère à ajouter sera importante.

Sugamata et al. [26] ont étudié l'influence de différents superplastifiants et de leurs dosages sur le maintien rhéologique dans le temps d'un mortier. Leurs résultats montrent que l'augmentation du dosage de superplastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur.

Cette caractéristique est maintenant bien connue. Il s'agit du dosage à saturation, c'est-à-dire le dosage au-dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la fluidité du mélange. Actuellement, les superplastifiants sont donc utilisés à un dosage proche du dosage à saturation. Différents auteurs [26] ont montré que le moment d'introduction du superplastifiant lors du malaxage joue un rôle sur le dosage à saturation. Si l'introduction est retardée, le dosage à saturation est plus faible, i.e. il est obtenu pour une plus faible quantité de superplastifiants. Ceci est en accord avec ce que nous avons vu, car si l'hydratation du ciment est amorcée alors la consommation du superplastifiants par les hydrates sera moins importante [26]. Ainsi, le fait de retarder son introduction, permet au superplastifiant d'être plus efficace et d'obtenir des mélanges plus fluides que s'il avait été introduit en début de malaxage.

Les BAP contiennent des superplastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation [26]) peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Il est possible d'utiliser un plastifiant en synergie avec un superplastifiant.

II-3-2- Volume de pâte élevé :

Les formules de bétons auto nivelant actuellement réalisées au Japon et au Canada se caractérisent par un fort dosage en liant. En effet, ces bétons ont souvent des teneurs en liant supérieures à 500 Kg/m³ [26]. De plus les chercheurs japonais et canadiens ont montré l'intérêt et d'utiliser des fortes teneurs en additions minérales (laitiers, cendres volantes, fumées de silice, additions calcaires, etc.) afin d'obtenir à la fois une grande fluidité et une bonne stabilité du béton [26].

Les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons. C'est pourquoi, les BAP contiennent un volume de pâte (ciment + additions +

adjuvants + eau efficace + air) important, typiquement de 330 à 400 l.m³, dont le rôle est d'écartier les granulats les uns des autres. Le volume de pâte dans un BAP représente 35 à 45 % du volume total, alors que dans un béton traditionnel il est de 20 à 35 % [26], et qu'un superplastifiant est employé pour fluidifier la pâte.

II-3-3- Volume de gravillons :

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP.

Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP. [26]

Tous ces paramètres de formulations conduisent à des compositions différentes des BV. Les BAP présentent à la fois une grande fluidité, l'utilisation de superplastifiants ainsi qu'un volume de pâte importante.

II-4- Les principaux constituants des BAP :

Les constituants des BAP peuvent être assez différents de ceux des BO. Ils peuvent différer tant par leurs proportions que par leur choix. Étant donné le mode de mise en place des BAP, les constituants entrant dans la fabrication du BAP, selon leur utilisation, en trois catégories ; les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques.

II-4-1- Matériaux de base :

Les granulats, le ciment et l'eau forment les éléments de base de tous types de béton. Ils sont qualifiés ainsi puisqu'ils sont historiquement les seuls constituants des bétons de nos ancêtres et parce qu'ils ont toujours les plus grosses proportions relatives dans le mélange de BAP.

II-4-1-1- Le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le

processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20% [26]

Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de cette cuisson (clinkérisation) sont :

- Le silicate tricalcique, 3CaO.SiO₂, que l'on écrit C₃S ;
- Le silicate bicalcique, 2CaO.SiO₂, que l'on écrit C₂S ;
- L'aluminate tricalcique, 3CaO.Al₂O₃, que l'on écrit C₃A ;
- L'alumino ferrite tetracalcique, 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃, que l'on écrit C₄AF.

Suivant la carrière d'origine et les performances recherchées, le clinker est constitué de 62 % à 67 % de chaux combinée (CaO), de 19 % à 25 % de silice (SiO₂), de 2 % à 9 % d'alumine (Al₂O₃), et de 1% à 5 % d'oxyde de fer (Fe₂O₃).

Le ciment peut être constitué aussi de laitier de haut fourneau (S), de pouzzolane naturelle (Z), de cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W), de fumée de silice (D), de calcaire (L), de schistes calcinés (T), de constituants secondaires, de sulfate de calcium (gypse, hélihydrates, anhydrite) et d'additifs.[26]

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton auto plaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts. [26]

II-4-1-1-1-Les différents types de ciment :

Les ciments constitués de clinker et de constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principale. Ils sont notés CME et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) : [26]

CEM I: Ciment Portland (CPA).

CEM II : Ciment Portland composé (CPJ).

CEM III : Ciment de haut-fourneau (CHF).

CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).

CEM V : Ciment composé (CLC).

II-4-1-2- Les granulats :

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0mm et 40mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. [26]

Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés, obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières.

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

Pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton autoplaçant utilise généralement des granulats roulés de rivières et un apport de fines (par exemple des fillers calcaires) plus importants.

Du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée, en général le rapport granulats/sable exprimé en masse est de 1 dans un BAP. Le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé augmente lorsque le D max augmente. Ainsi, le D max des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm. [26]

II-4-1-3-L'eau :

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [26] :

- 2 g/l pour les bétons à haute résistance ;
- 5 g/l pour les bétons à faibles résistances.

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au delà de :

- 15 g/l pour les bétons à haute résistance ;
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances.

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de superplastifiants. [26]

II-4-2- Additions minérales :

L'emploi des pouzzolanes minérales pour faire des mortiers et des bétons est connu depuis l'Antiquité. Ces pouzzolanes désignent un grand nombre d'additions minérales aux

origines diverses, mais qui présentent tous, le fait d'être fins et de réagir en présence d'eau et de chaux. De nos jours, des quantités considérables de plusieurs types de ces additions continuent d'être utilisées.

Nous présentons ci-dessous les différentes additions minérales éventuelles qu'on peut incorporer dans les compositions des BAP :

1. Les fillers calcaires
2. Les pouzzolanes naturelles
3. Le laitier de haut fourneau
4. La fumée de silice
5. Les cendres volantes,...

II-4-3- Adjuvants chimiques :

Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques qui, incorporés dans les bétons à des dosés précises du poids de ciment et selon leur plage d'utilisation indiquée par le fournisseur. Leur introduction dans le mélange engendre des phénomènes physico-chimiques très complexes et ils ont pour but d'améliorer les propriétés des bétons à l'état frais ou à l'état durci. [26]

II-4-3-1- Les superplastifiants :

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2% environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. Le béton est un matériau composite poreux constitué de ciment, de granulats et d'eau et ses propriétés mécaniques finales dépendent très étroitement de la quantité d'eau introduite lors du gâchage. L'utilisation de super plastifiants nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation. [26]

Les superplastifiants permettent de répondre à deux types d'applications, selon que l'utilisateur travaille dans le domaine de la préfabrication ou du béton prêt à l'emploi. Dans le premier cas, il aura besoin d'un béton qui acquiert des propriétés mécaniques importantes de façon très rapide afin de procéder au démoulage dans les délais les plus brefs et en même temps d'un béton assez fluide pour avoir une mise en place convenable dans les moules. Dans le deuxième type d'utilisation, le béton devra pouvoir être transporté sur des parcours plus ou moins longs et présenter de bonnes propriétés de mise en œuvre sur le site de construction sans que les performances mécaniques ne soient affectées. [26]

Il apparaît donc que les bétons modernes doivent satisfaire à la fois aux exigences de résistance et de maniabilité. Il s'agit de deux caractéristiques apparemment inconciliables puisque sans l'ajout de super plastifiant, l'augmentation des résistances ne s'obtient qu'avec une réduction d'eau. Or, une réduction d'eau diminue la fluidité. Un gain de maniabilité ne peut être obtenu qu'en augmentant la quantité d'eau de gâchage et donc au détriment des résistances finales du matériau. [26]

L'utilisation de superplastifiants dont l'action est schématisée sur (Figure II -4) permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau.

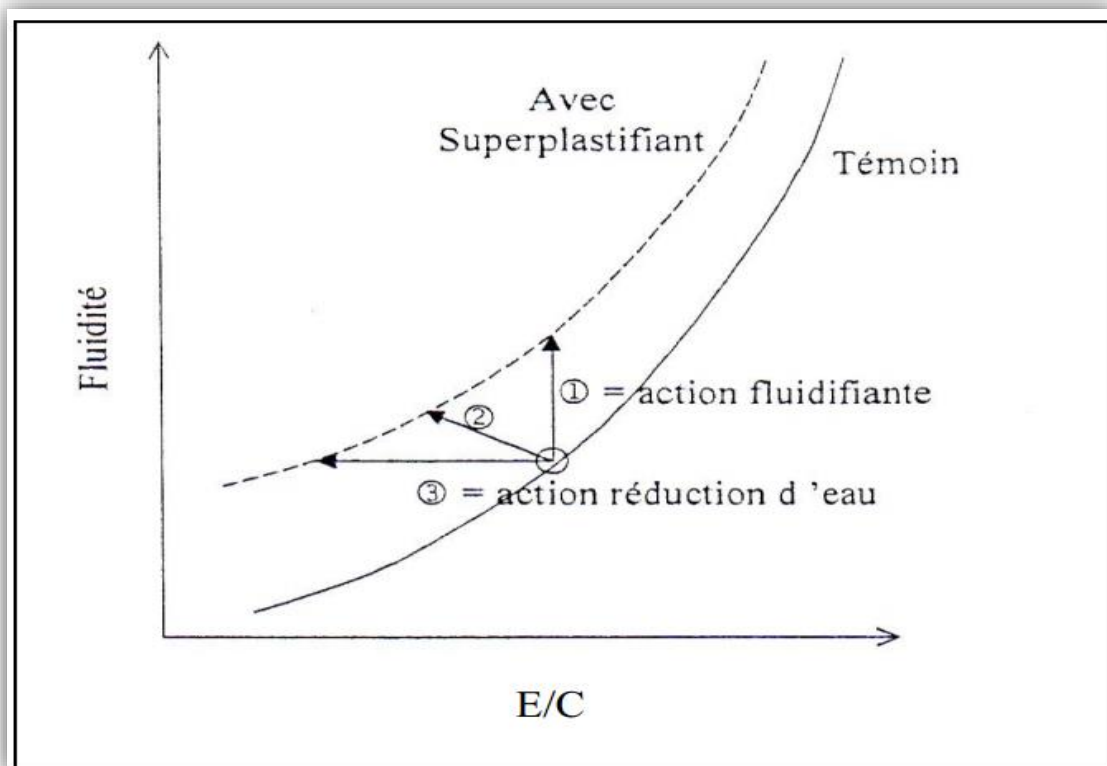


Figure II -4 : Actions des superplastifiants [26]

- 1 – augmentation de la fluidité (teneur en eau égale)
- 2 – diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité
- 3 – diminution de la teneur en eau (à fluidité égale).

II-4-3-2- Les agents colloïdaux :

En 1977, des agents colloïdaux améliorant la viscosité et la stabilité du béton ont été développés en Allemagne. Ces adjuvants, se présentant généralement sous forme de poudre, sont fréquemment utilisés pour empêcher le délavement à l'état frais des bétons

coulés sous l'eau, comme agent de pompage, et pour améliorer la cohésion de mélange des BAP.

Leur utilisation commence à être populaire, mais ils sont actuellement relativement chers comparés aux autres adjuvants.

La plupart des agents colloïdaux sont composés d'éther de cellulose ou de polymères de type acrylique qui sont solubles dans l'eau [B.NECIRA]. Ils sont classés selon leur origine en trois catégories [HOLCIM] :

a. Polymères naturels : Ils comprennent des gommes naturelles, des protéines de certaines plantes et l'amidon.

b. Polymères semi-synthétiques : Ils comprennent des dérivés de l'amidon, des dérivés de l'éther de cellulose comme l'hydroxyle de cellulose, l'hydroxyle de méthyle de propyle de cellulose et le méthyle carboxyle de cellulose, ainsi qu'un électrolyte comme de l'alignone de sodium.

c. Polymères synthétiques : Ils comprennent de l'éthylène comme de l'oxyde de polyéthylène et de vinyle comme l'alcool de polyvinyle.

Le mécanisme d'action des agents colloïdaux est fonction du type et de la concentration des polymères. Il peut être décomposé en trois phases [F.JACOBS AND F.HUNKELER] :

1. Adsorption : Les longues chaînes de polymères adhèrent à la périphérie des molécules d'eau par un phénomène d'adsorption et fixation d'une partie de l'eau.

La quantité d'eau adsorbée dépend de la longueur des polymères et de leur surface spécifique.

2. Association : Les molécules des chaînes de polymères adjacentes peuvent développer entre elles des forces d'attraction qui bloquent les mouvements de l'eau et provoquent la formation d'un gel qui augmente conséquemment la viscosité.

3. Entrelacement : Les chaînes de polymère peuvent s'entrelacer et s'emmêler spécialement dans des mélanges à forte concentration d'agent colloïdal. Cet entrelacement augmente la viscosité.

II-4-4-Autres additions :

En plus des additions minérales indispensables caractérisant la composition de la pâte de ciment du BAP, les additions inertes suivantes sont aussi parfois utilisées:

- les pigments pour la coloration d'éléments architectoniques
- les fibres d'acier comme armature constructive
- les fibres de polyéthylène (fibres PE) pour améliorer la résistance au feu
- les fibres de polyéthylène ne (fibres PP) pour empêcher les fissures de retrait plastique.

II-5- Caractérisations des BAP à l'état frais :

En France, trois essais de caractérisation des bétons autoplaçant à l'état frais ont été recommandés par l'Association Française de Génie Civil « AFGC » en juin 2000. [25] Initialement provisoires, ces recommandations sont devenues par la suite des essais de référence pour valider une formule de BAP.

L'ouvrabilité des bétons autoplaçant se décompose en trois caractéristiques ;

- La mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement) ;
- La mobilité en milieu confiné (décrit par la boîte en L) ;
- La stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage).

II-5-1- Mobilité en milieu non confiné (Essai d'étalement) :

L'essai d'étalement s'est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser, il permet de mesurer la consistance d'un béton. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (**Figure-II-5**). Cependant l'affaissement étant toujours supérieur à 25 cm, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute, ainsi que le temps nécessaire à l'obtention du diamètre d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Une observation permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai réalisable sur chantier ne nécessite qu'un petit échantillon de béton. Une valeur de 60 à 75 cm est en général visée pour obtenir un BAP. [25]

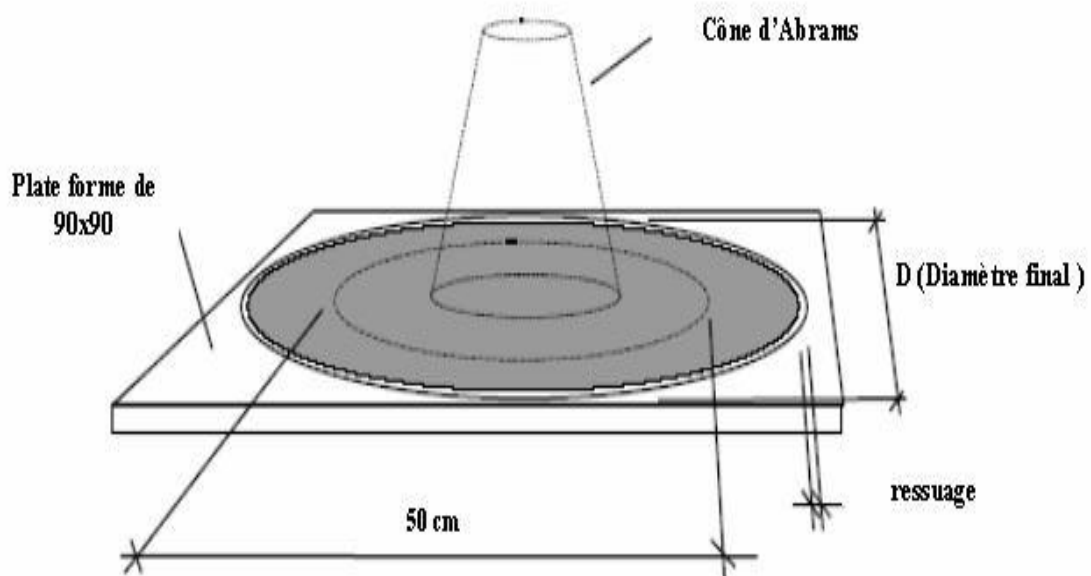


Figure -II -5 : Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow)

Des observations complémentaires peuvent aider à appréhender certaines propriétés à l'état frais des bétons autoplaçant :

- Un ressuage peut être détecté si de l'eau est présente en grande quantité sur les bords de la galette,
- En traçant à la truelle des lignes dans la « galette », on peut vérifier si le béton se referme bien, ce qui est synonyme de bon comportement,
- La fluidité du béton peut être évaluée en mesurant les temps de passage du béton aux diamètres 50 et 60 cm durant un écoulement au cône,
- Une forme bombée de la « galette » traduit un effet de voute, ce qui peut nuire à l'homogénéité du béton.

Toutes ces indications sont plus ou moins subjectives mais aident le formulation expérimenté à effectuer certaines corrections en vue d'obtenir un béton qui correspond plus à ses attentes.

II-5-2- Mobilité en milieu confiné (Essai de la boîte en L) :

Tout comme l'essai à l'anneau Japonais, cet essai permet de caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique.

La partie verticale du L (**Figure-II-6**) est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres Ø 14) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre deux barres).

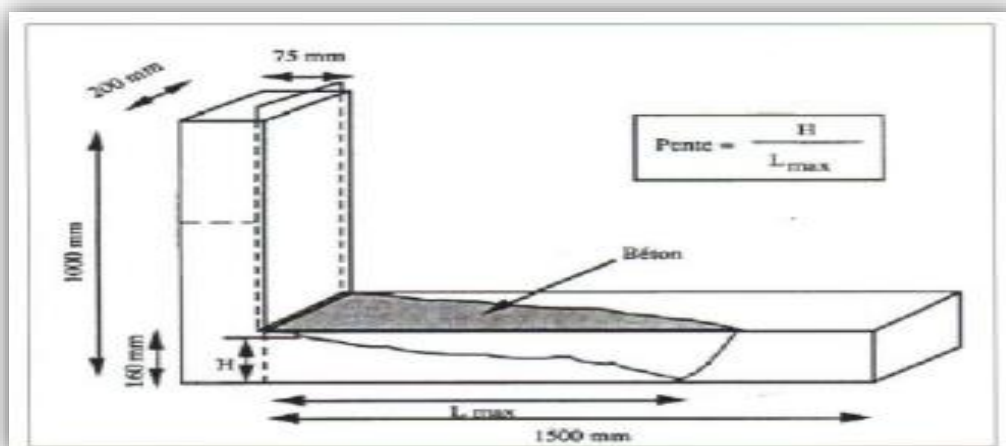


Figure-II-6 : Essai de la boîte en L (L-box test)

Pour que le béton autoplaçant soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs H/L_{max}) doit être supérieur à 0,8. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton. [25]

II-5-3-Stabilité (Essai de stabilité au tamis) :

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (**Figure -II-7**).

Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier [27]

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (**P**laitance) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes : [25]

- $0\% \leq \% \text{ P laitance} \leq 15\%$: stabilité satisfaisante,
- $15\% < \% \text{ P laitance} \leq 30\%$: stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ,
- $\% \text{ P laitance} > 30\%$: stabilité très mauvaise : ségrégation systématique, béton inutilisable.



Figure-II-7 : Essai de stabilité au tamis

II-5-4- Essai de ressuage :

Le ressuage est un type spécial de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables. [28]

Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une mince pellicule d'eau à la surface du béton. Selon les conditions météorologiques, on assiste à une compétition entre le débit d'eau ressuée et le débit d'eau évaporée. Si ce dernier est plus faible, le phénomène de ressuage est visible, sinon, la surface du béton au lieu d'être brillante, devient mate. La quantité d'eau ressuée sera de toute façon égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée. [28]

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié développé au LCPC (**Figure-II-8**). Le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloréthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer [26]. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit.

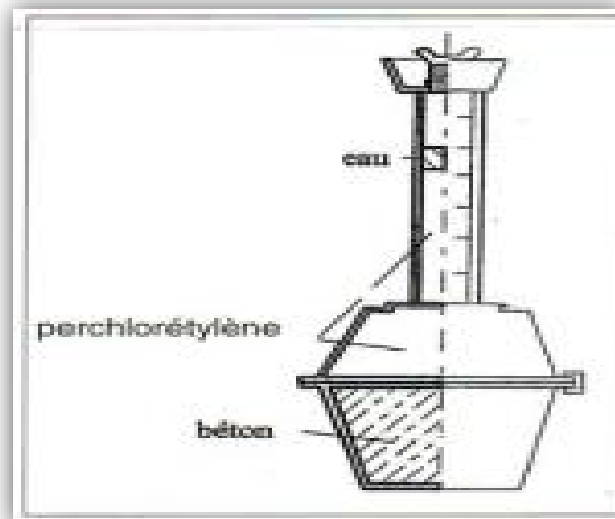


Figure -II-8 : Essai de ressuage

II-6-Caractérisation des BAP à l'état durci :

Le béton doit être soumis à différents essais mécaniques de caractérisation :

- Les essais de compression ;
- Les essais de traction par flexion ;

II-6-1- Les essais de compression :

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm conformément aux prescriptions de la norme .Ce test fournit la force de compression [N] qui génère la rupture de l'échantillon (**Figure-II- 9**). La contrainte de

compression à la rupture [Pa] est déduite de cette force en divisant par la surface de la section sollicitée. [29]



Figure -II-9 : Mesure de la résistance à la compression

II-6-2- Les essais de traction par flexion :

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages (**Figure-II-10**). Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont propre uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions 7x7x28 cm.

La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante : $\sigma = Mf.a/2I$, avec le moment de flexion :

$M_f = F.L/4$, où F est la charge de rupture, L la portée, I l'inertie de flexion, et a le côté du prisme. [29]



Figure -II-10 : Mesure de la résistance à la traction par flexion

II-6-3 Module d'élasticité :

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une baisse quantité de gros granulats on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{cj} / 3$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré.[30]

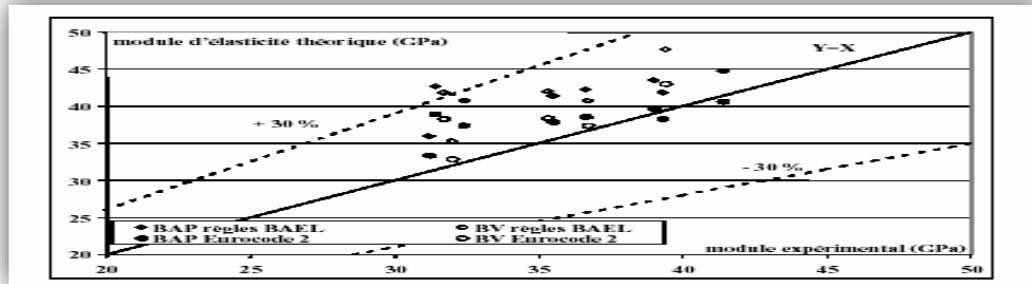


Figure: II-11- Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [30].

Certains auteurs ont trouvé que le module élastique de BAP coïncide bien avec celui de BV avec des propriétés similaires quand la résistance est constante, les mêmes résultats trouvés par.

Par contre, le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV donc le BAP est plus rigide.

[Jacob et Hunkeler 99] ont trouvés qu'avec une résistance donnée le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV, ce comportement est dû à la petite dimension de grains de BAP et la quantité élevée de pâte de ciment. En effet, dans un béton formulé avec des granulats classiques, le module de la matrice (6000-25000 MPa) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats E_g (60000 à 100000 MPa).[30]

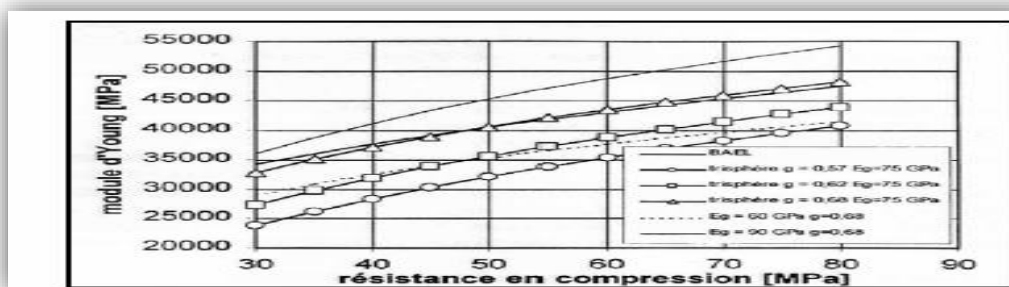


Figure -II -12: Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [30].

II-7- Différentes types des méthodes :**A)- Méthode japonaise : [30]**

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kōchi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût en genre sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

1. Dosage des gravillons: Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m³. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

2. Dosage du sable: Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

3. Dosage du liant : La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

4. Dosage de l'eau et du super plastifiant : Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

B)- Méthode Suédoise: proposée par :

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par [Tangtermsirikul et al, 1995]. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées. Les fines, l'eau et le superplastifiants sont ajustés

par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat. [31]

C)- Méthode Française :

Méthode française (LCPC) : proposée par [De Larrard et al, 1994] : Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- les distributions granulaires
- les proportions du mélange
- la compacité propre
- la densité apparente

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- la proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple)
- le dosage, à saturation, du super plastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- le besoin en eau de ce mélange (en présence du super plastifiant) est déterminé
- les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.10^4 La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/ phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiants est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes. [30]

II-8- Fabrication, transport et mise en place des BAP :**II-8-1- Fabrication des BAP :**

En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP. Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celles recommandées pour les bétons vibrés, en les adaptant aux conditions locales dans chaque cas particulier.

L'intensité et le temps de malaxage ainsi que l'ordre d'introduction des constituants sont des facteurs qui influent fortement sur l'homogénéité du béton, sur l'effet optimal des additions et des adjuvants, c'est la raison pour laquelle on fixe le temps de malaxage à 120 secondes, cette moyenne peut être ajustée selon l'efficacité du malaxeur [32]

II-8-2- Transport des BAP :

En raison de sa fluidité élevée, le béton autoplaçant doit être transporté en camion malaxeur. Comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres :

le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température.

Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier.

Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé pour assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. En revanche tout ajout d'eau est à proscrire [32].

II-8-3- Mise en place des BAP :

Par rapport au béton vibré la mise en place du béton autoplaçant est grandement facilitée, elle peut être réalisée par une seule personne et selon trois méthodes différentes :

La première méthode est celle utilisée pour les bétons ordinaires vibrés, la mise en place se fait à l'aide d'une goulotte. Pour limiter le phénomène de ségrégation favorisé par ce procédé il convient de fixer la hauteur de chute maximale du béton à 5m.

La deuxième méthode consiste à utiliser un tube plongeur immergé dans le béton frais, dans la partie inférieure du coffrage.

La mise en place des BAP peut se faire par pompage, par cette troisième méthode il y a réduction du bullage et obtention de parements lisses.

Pour réussir les ouvrages en béton autoplaçant il est capital d'appliquer scrupuleusement les recommandations de fabrication, de transport et de mise en œuvre [32].

II-9- Conclusion :

Il existe à ce jour plusieurs méthodes de formulation du béton autoplaçant, et la plus part de ces formules sont conçues actuellement de manière empirique, suivant les caractères à l'état frais on peut juger la formulation acceptable ou non.

A cet effet l'[AFGC], a émis des recommandations qui se limitent en trois essais : mesure d'étalement ; essai de la boîte en « L » ; et l'essai de stabilité au tamis.

Chapitre 03

Essais non destructifs du béton

Chapitre 03 : Les essais non destructifs**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. [40]

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. [41]

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. [40]

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-1- Définition de méthodes non destructives :

Ils représentent des méthodes de reconnaissances couramment appliquées aux ouvrages. Comme leur nom l'indique, il s'agit de mesures n'endommageant pas les éléments de structure. Ces essais ont la particularité d'être rapides et faciles à mettre en oeuvre. [42]

Les Contrôles Non Destructifs sont un ensemble de méthodes qui permettent l'évaluation de l'état d'intégrité d'un matériau, de structures, ou d'ensembles mécaniques, sans les dégrader.

Ils peuvent être appliqués pratiquement à tous les stades de vie d'un élément:

- Production ;
- Utilisation ;
- Étude de vieillissement ;

- Maintenance. [43]

III-2- 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 on peut obtenir 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 économiques et moins coûteuses que celles destructives.

Le désavantage essentiel de ces essais non destructifs est que les résultats obtenus ne sont pas à 100% fiables, car plusieurs facteurs influencent ces derniers tel que la composition du béton et ses constituants, l'état de la surface testée, la façon de la mesure, la présence ou non des armatures, l'humidité et autres. [41]

III-3- Essai d'auscultation sonique : [EN 12504-4]

La mesure de la vitesse des ondes dans le béton est classiquement utilisée aussi bien en laboratoire que sur les ouvrages. Cette méthode est également normalisée par les normes Françaises (EN 12504-4) et américaines (ASTM-C597-02), et il existe des appareils commerciaux complets permettant de réaliser ce type de mesures. [43]

Le principe général est de mesurer la vitesse de l'onde mécanique se propageant dans le béton.

On utilise pour cela une paire de transducteurs, l'un servant de source et l'autre le récepteur. Cette méthode permet principalement de détecter :

- Une non uniformité des propriétés de la structure ;
- Des grosses fissures ou des vides résultants par exemple de « nids de cailloux » ;
- La détérioration due au feu, au gel ou à des agressions chimiques... [45]
- Elle peut également être utilisée pour déterminer les modules d'élasticité ou

les coefficients de Poisson des structures, à partir des relations. [45]

Cependant, la vitesse mesurée dépend également de beaucoup d'autres paramètres du béton comme les hétérogénéités, la teneur en eau, les conditions de cure, la température, la présence de microfissures, etc., les valeurs obtenues peuvent être très différentes de celles obtenues par l'essai destructif de compression en laboratoire. [46]

III-3-1- 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 ultrason (T). [41]

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

$$V = L/T$$

III-4- Méthodes de mesure de la vitesse de propagation des ultrasons :

III-4-1- Mesures en transparence directe :

Utilisées dans le cas des éprouvettes ou de poteaux ou dans certaines poutres, les transducteurs (émetteur et récepteur) sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester.[39]



Figure-III-1- Mesures en transparence directe.

III-4-2- Mesures en surface :

Utilisées sur tous les éléments de structure et sur éprouvettes, plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur.

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

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

Après avoir porté graphiquement les temps et les distances, on trace la droite moyenne de ces différents points dont la pente correspond à la valeur de la vitesse du son dans le milieu considéré. [41]

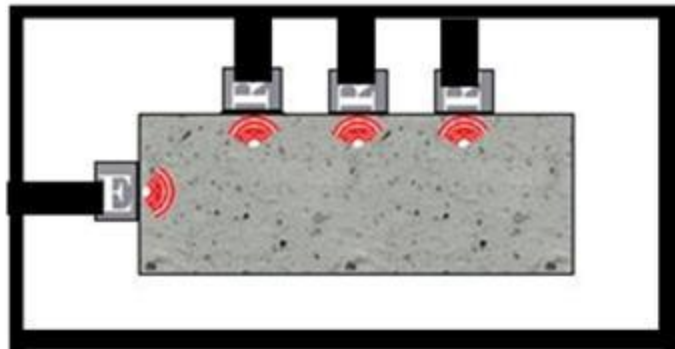


Figure III-2 - Mesures en surface.

III-4-3- Mesures en transparence par rayonnement :

Cette méthode consiste à placer l'émetteur en un point fixe, et sur la face opposée ou perpendiculaire, on déplace à intervalle constant le récepteur sur une ligne. [41]

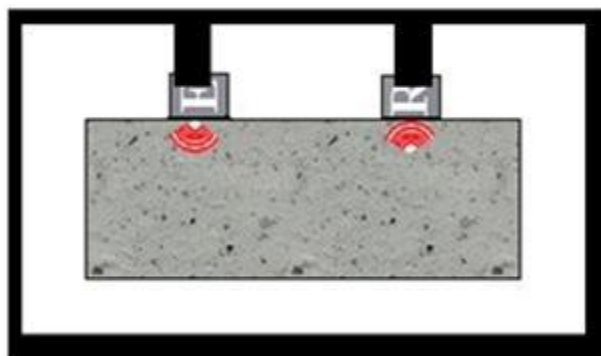


Figure III-3 - Mesures en transparence par rayonnement.

a- Mode opératoire en transparence directe :

Dans ce travail, nous avons effectué les mesures en transparence directe sur des éprouvettes (10*20) cm³ en béton, donc en va présenter le mode opératoire de cette technique de mesure directe.

* Préparation de l'élément :

Pour qu'il y ait un contact parfait entre le béton et les transducteurs, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire dit « couplant » entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester.

Les matériaux d'interposition sont la vaseline, 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. [41]

*** Longueur minimal de parcours :**

La distance minimale séparant les transducteurs doit être supérieure ou égale à quatre fois la dimension du plus gros granulats de béton. [47]

*** Points de mesures :**

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage testé. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, ...) les points de mesures sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0.5 m, le cas des petits éléments (poteaux, poutres...). les mesures se font en six points, (voir figures ci-dessous). [41] Chaque mesure doit être répétée trois fois repositionnant les transducteurs avec, si cela est possible. [47]

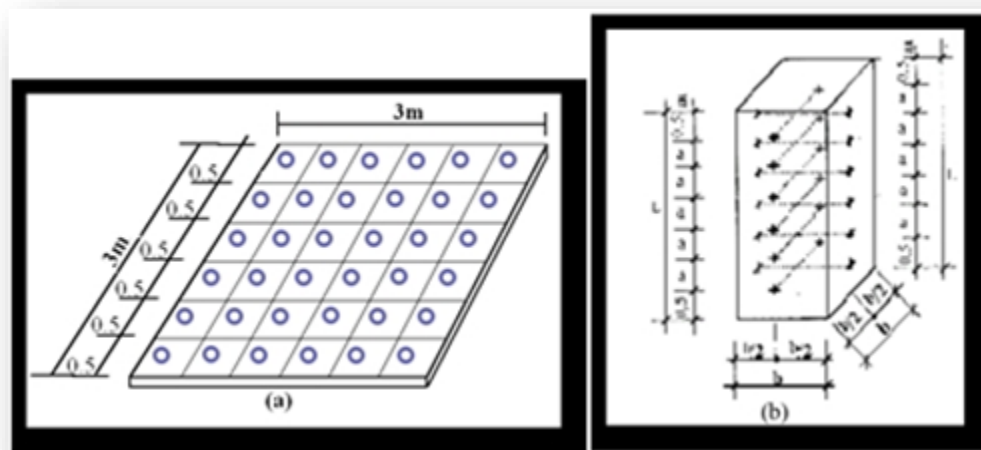


Figure -III-4- Points de mesures pour une dalle et un poteau. [47]

(a) : un panneau (exemple : une dalle de 3 x 3 m²)

(b) : un petit élément (exemple : en poteau de section $b \times b$ et de hauteur h)

b- Influence des armatures :

La vitesse de propagation mesurée sur du béton armé, à proximité des armatures, est souvent plus élevée que celle que l'on mesure dans un béton de masse de même composition.

En effet, la vitesse de propagation dans l'acier est de 1,2 à 1,9 fois celle que l'on mesure dans du béton non armé.

Dans certains cas, la première impulsion qui arrive au transducteur s'est propagée en partie dans l'acier et en partie dans le béton.

L'accroissement apparent de la vitesse de propagation dépend de la proximité

des armatures par rapport à l'emplacement des points de mesure, de la section et de nombre des armatures, de leur positionnement.

c- Influence des conditions d'essai :

* Etat de surface :

Le point ou la zone d'application des transducteurs ne doit pas être dégradée.

Un décapage préalable à sera éventuellement réalisé.

Dans le cas d'emploi de transducteurs plan, la surface de contact du béton doit être lisse. Un ponçage préalable à l'essai sera éventuellement réalisé. [47]

* Humidité et température du béton :

Les comparaisons de valeurs obtenues ne peuvent se faire que dans des conditions d'humidité ou de température du béton très voisines.

On a pu constater des écarts de temps de propagation sur un même béton sec ou saturé.

On peut être confronté à ce problème dans le cas notamment des mesures en surface. [47]

III-4-4- Interprétation des résultats mesurés :

Lorsque de grands écarts de vitesse de propagation sont découverts sans causes apparentes dans l'ouvrage, il y a lieu de soupçonner que le béton est défectueux ou altéré.

Par ailleurs, une grande vitesse de propagation est synonyme de bonne compacité du béton.

Le **tableau III-1-** donne des informations sur la compacité en fonction de la vitesse de propagation. vitesse de cette impulsion dans le béton d'enrobage. [41]

Compacité	Vitesse de propagation (m/s)
Excellente	Supérieure à 4000
Bonne	3200-4000
Douteuse	2500-3200
Mauvaise	1700-2500
Très mauvaise	Inférieure à 1700

Tableau III-1- Appréciation de la compacité du béton. [42]

Des études réalisées par le laboratoire RILEM (Réunion Internationale des laboratoires et Expert des Matériaux) ont montré que la corrélation avec la résistance à la compression a pour forme :

$$R_c = a. e^{(b.v)}$$

Avec **a** et **b** des coefficients dépendant de la nature des granulats utilisés et **V** la vitesse de propagation.

De même, deux relations ont été établies entre la vitesse de propagation et le module d'élasticité dynamique du béton :
$$Ed = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \gamma \cdot v^2$$

V: Représente la vitesse des ondes (Km/s).

γ : La masse volumique du béton (kg/m³).

ν : Coefficient de poisson du béton, dont la valeur est de 0,15 pour un béton de haute résistance et de 0,3 pour un béton de faible résistance.

Ed: module d'élasticité dynamique (MPa).

En peut ensuite établir la relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression par la relation suivante [42 ,47] :

$$Rc = 16,7e^{\left(\frac{ed}{122500}\right)} .$$

III-4-5- Les avantage :

- Facilite la détermination de l'homogénéité et l'uniformité du béton.
- Donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton.
- Utilisé pour détecter la fissuration, les vides, les nids de caïeux et les détériorations dues au gel ou de feu.
- utilisé pour évaluer la résistance du béton à très jeune âge 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.
- Utilisé pour suivre les changements microstructuraux dans un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel/dégel. [33]

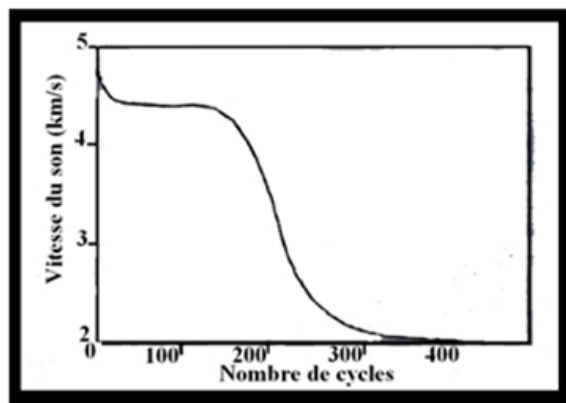


Figure III- 5- Détérioration d'un béton par des cycles gel-dégel.

III-4-6- 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. [33]

III-5- Essai sclérométrique : [EN 12398]

Le scléromètre est un appareil relativement simple d'utilisation, il est destiné à mesurer, indirectement, la résistance à la compression du béton à partir de la mesure de sa dureté superficielle. Il existe une relation empirique de corrélation entre cette résistance et un indice dit " indice sclérométrique " et qui consiste à traduire la dureté du béton. [34]



Figure -III-6 - Appareille sclérométrique.

III-5-1- Principe de l'essai :

La tige du scléromètre étant appuyée contre la surface à tester, le ressort est comprimé.

Quand la tige est complètement enfoncée dans le scléromètre, une masse se déclenche automatiquement, venant la frapper, et par là, la surface à tester. La tige réagit et retransmet à la masse le rebondissement. Le béton est d'autant dur et compact, que le rebondissement est important.

Sur un cadran gradué, un curseur lié à la masse (rebondie) indique le point maximal atteint. On peut alors lire directement la valeur de l'indice sclérométrique.

Une fois l'indice reporté sur un abaque de transformation la valeur de la résistance à la compression est obtenue et ce, en tenant compte de l'inclinaison de l'appareil. [34 , 35].

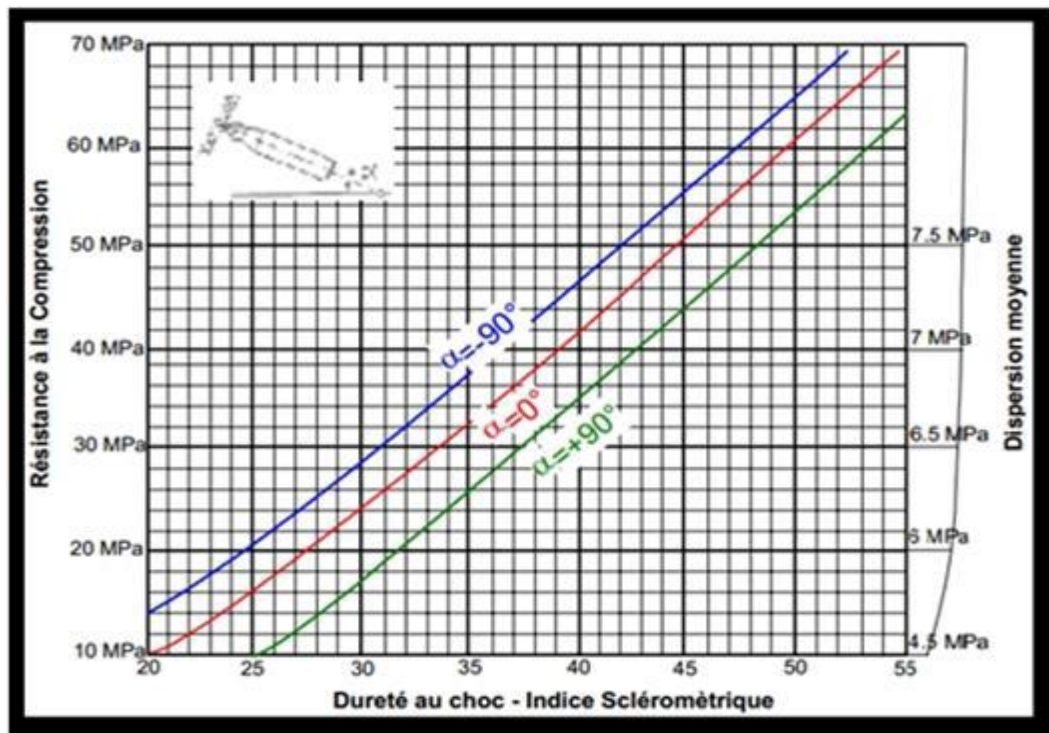


Figure III-7 - La résistance probable du béton en fonction de la mesure du recul (Linéaire ou angulaire). [34]

III-5 -2 - Appareillage :

a- Scléromètre :

L'appareille est composé par les éléments suivants :

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

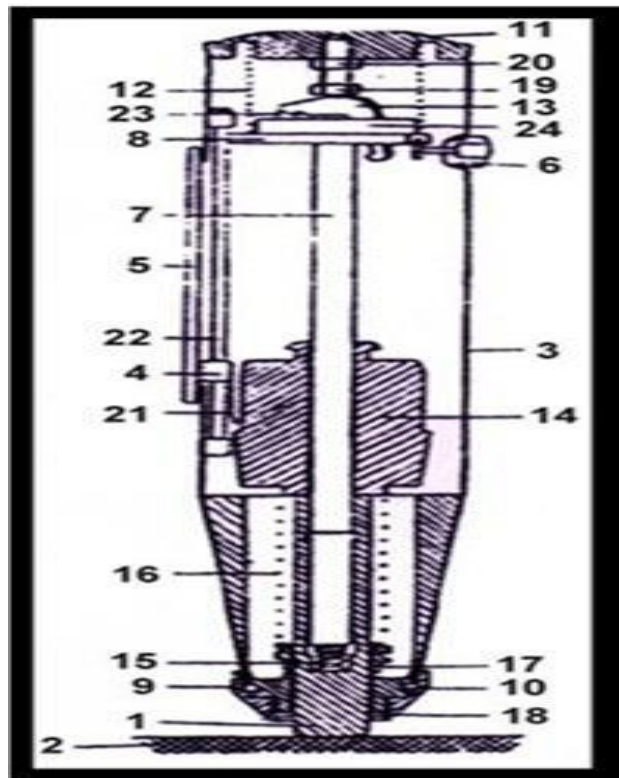


Figure -III-8 - composition de scléromètre.

b- Pierre à polir :

Pierre à base de matière abrasive de texture à graine moyens telle que, par exemple, carbure de silicium aggloméré, son rôle est la préparation de la surface testée.[34,35]

III-5-3 - Exécution des mesures :

La surface de l'ouvrage à tester est divisée en zones d'au moins 400 cm² chacune. Il est nécessaire de faire une série de 27 mesures sur chaque zone d'essai. La distance entre deux mesures est de 3 cm au moins, et aucune mesure n'est effectuée à moins de 3 cm des bords de la surface testée.

Cette moyenne, reportée sur l'abaque qui tient compte de la position de l'appareil, ou sur un tableau, donne les valeurs minimum et maximum de la résistance à la compression du béton.

a- Mesures sur éprouvettes :

Les éprouvettes doivent être de forme cylindrique de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm, ils doivent être maintenus entre les plateaux d'une presse hydraulique, sous une contrainte de 0,5 MPa.

Il est relevé 27 mesures réparties sur trois génératrices en 27 points distincts et distante entre eux de 30 mm, d'où aucune mesure ne doit être située à moins de 40 mm des faces planes de l'éprouvette.

Dans tous les cas de conservation, les mesures au scléromètre ne peuvent être effectuées qu'après un délai d'au moins 48 h, après leur sortie de l'ambiance de conservation [34].

On fait ensuite la moyenne de ces 27 mesures. Les valeurs qui correspondent à des anomalies doivent être éliminées.

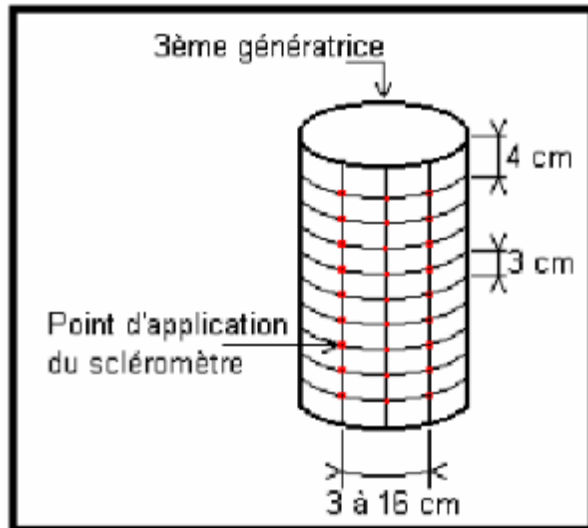


Figure III-9- Mesure sur éprouvette cylindrique (16*32) cm³. [36]

b- Mesures sur ouvrage :

Tout surface rugueuse, poreuse, écaillée, humide ou zone de nid de Caillaux doivent être traité ou évité. [34 ,35]

III-5-4 - Exploitation des résultats :

Des études ont montré que la formule en question peut prendre la forme :

$$R_c = a (I_s)^2 + b (I_s) + c$$

Avec :

a, **b** et **c** : des coefficients dépendant de la nature des granulats,

I_s : étant l'indice sclérométrique,

R_c : la résistance à la compression.

III-5-5 - Les avantages :

C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide.

Utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués.

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). [33]

III-5-6- 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.

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 : partie 202 : 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) ou la carbonatation (qui augmente cet indice).

Les résultats sont influencés par des facteurs tels que l'égalité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette, le degré d'humidité du béton, le type de ciment et de gros granulats et le degré de carbonatation de la surface. [33]

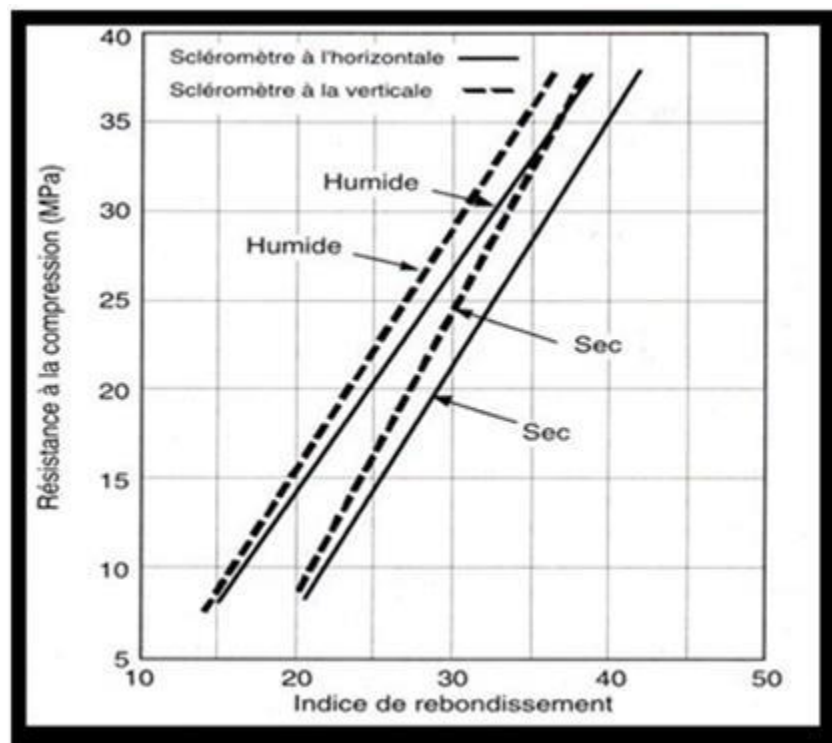


Figure III-10- La relation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement d'un scléromètre utilisé à l'horizontale et à la verticale sur des surfaces de béton sèches et humides. [44]

III-6- La méthode combinée :

Dans certains cas en combine les deux méthodes, essais sclérométrique et auscultation sonique, ce qui permet en suite l'établissement de la résistance mécanique de l'élément testé.

[37]

Ces techniques ont été évoluées au cours des dernières années en particulier dans le cas de l'évaluation construction.

Toutes les méthodes disponibles pour l'évaluation du béton in-situ sont limitées, leur fiabilité est souvent mise en doute, et la combinaison de deux ou plusieurs des techniques est en train de devenir une solution à tous ces problèmes.

La combinaison de plusieurs techniques d'essais non destructifs est souvent mise en manière empirique, en combinant deux techniques les plus souvent utilisées pour améliorer la fiabilité de l'estimation de la résistance à la compression du béton; le principe est basé sur les corrélations entre les mesures observées et la propriété désirée.

La résistance à la compression du béton est généralement la propriété la plus prisés. Ceci a conduit au développement d'une méthode qui combine l'indice sclérométrique et la vitesse de propagation ultrasonore.

L'objectif de ces tests combinés est d'évaluer la résistance à la compression du béton coulé sur place, la meilleure approche est généralement de développer une relation de corrélation entre la vitesse d'ultrason, l'indice sclérométrique et la résistance à compression d'échantillon normalisée de laboratoire, dans certains cas les échantillon ne sont pas disponibles, alors un nombre de carottes doivent être prisés pour établir cette relation.

La méthode normalisée combinée plus largement utilisée est la méthode mise au point par (SonReb RILEM).[37]

L'amélioration de la fiabilité des mesures s'explique par la prise en compte l'effet contradictoire des facteurs de variabilité de certaines propriétés de chacune des deux techniques (impulsion ultrasonique de la vitesse et le scléromètre). [38]

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 :

$$R_c = \frac{I_s}{(3.46 + 0.0235 * I_s + 0.56 * v)^2}$$

Avec :

I_s : l'indice sclérometique.

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

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

On constate donc que cette méthode fait intervenir les résultats de deux méthodes

différentes. En revanche, elle ne peut être appliquée que si l'indice sclérométrique est sensiblement précis. [42,34]

Ces méthodes sont particulièrement avantageuses lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires. Par exemple, lorsqu'une augmentation du taux d'humidité elle provoque une augmentation de la vitesse de son, mais diminue l'indice de rebondissement enregistré avec l'essai au scléromètre Bellander (1977) montré sur la **Figure III-11**.

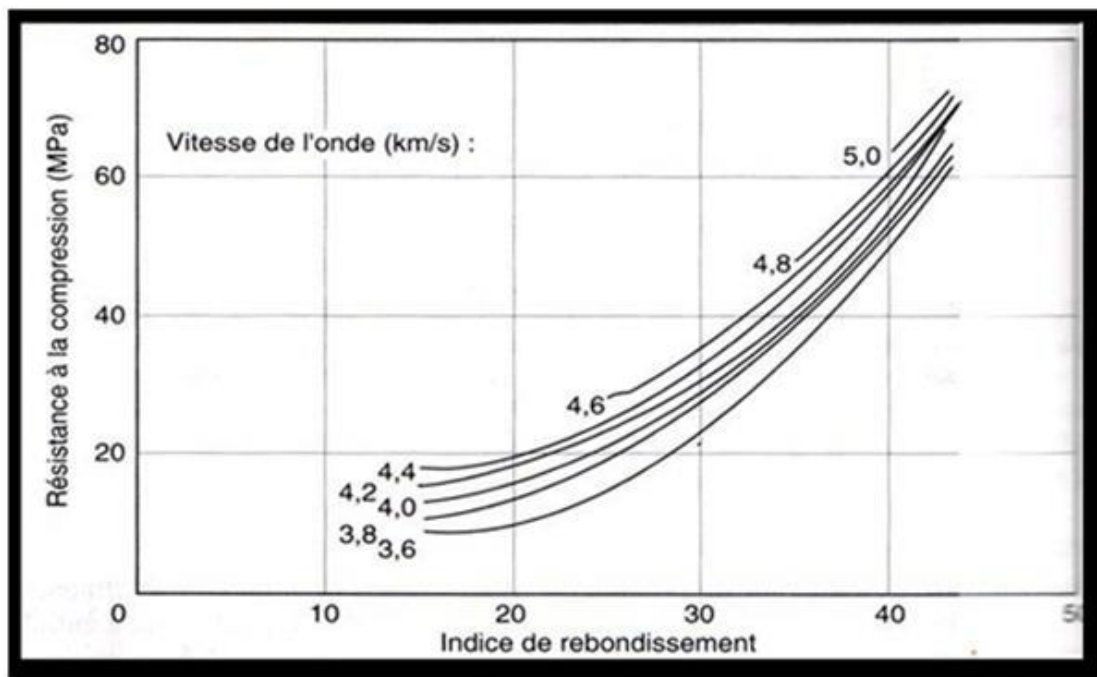


Figure III-11 - Courbe d'estimation de la résistance à la compression in situ par la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques et l'indice sclérométrique selon U. Bellander (1977). [36]

III-6-1- 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. [33]

III-6-2- Les inconvénients :

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. [33]

III-7-conclusion :

Dans ce chapitre nous allons résumer des différentes techniques d'évaluation de la résistance du béton aux moyens des essais non-destructifs.

Chapitre 04

Caractéristiques des matériaux utilisés et composition du béton

Chapitre 04 : Caractéristiques des matériaux utilisés et composition du béton

Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre les différents qualités et caractéristiques des matériaux locaux utilisés, pour la confection du béton, les essais ont été exécutés au laboratoire de génie civil à l'université de M'Sila.

IV-1- Les matériaux utilisés sont :

- Le sable d'origine siliceux provenant de OUED MAITER de Boussaâda «M'Sila »
- Deux fractions de gravier concassé (3/8,8/16) l'origine calcaire COSSIDER à (EL ECHE) BBA.
- Ciment Cpj42.5 et provenant de la cimenterie Lafarge de Hammam Dalaa «M'Sila»
- L'adjuvant : SUPERIOR 126 super plastifiants provenant de la société TEKNA CHEM Setif.
- Fibres de Verre
- L'ajout : le filler (farine de marbre de fraction 0,08mm)
- L'eau de gâchage et de conservation : eau potable du laboratoire.

IV-2- Caractéristiques du sable utilisé :

Nous allons décrire physiquement le sable utilisé, les caractéristiques sont déterminées expérimentalement selon les normes françaises AFNOR.

IV-2-1 Analyse granulométrique : norme [NFP18-304]

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon, la distribution en poids des particules d'un granulat suivant leur dimension permet de déterminer sa continuité.



Figure IV-1- Matériels utilisés pour l'analyse granulométrique

Mode opératoire :

- Prélever une masse de 2 Kg de matériau (sable sec).
- Peser chaque tamis à vide, soit m_i la masse du tamis.
- Constituer une colonne de tamis propre et sec dont l'ouverture des mailles de haut en bas (exprimer en mm) [5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,125-0,08-fond].
- Verser le sable sur la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique pendant 5 minutes.
- Peser chacun des tamis.
- On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1% entre deux séquences de vibration de la tamiseuse.
- A la fin de tamisage peser les refus en matière retenue par chaque tamis à 1g près, soit M_i : la masse de tamis (i) + le sable.
- Calculer la différence entre M_i et m_i (tamis de plus grandes mailles correspond au refus partiel R_1 de tamis 1).
- Reprendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur.
- Ajouter le refus obtenu sur le second tamis à R_1 , soit R_2 la masse de refus m de tamis 2 ($R_2 = R_1 + \text{refus partiel sur tamis 2}$)
- Pour suivre la même opération avec la reste des tamis pour obtenir les masses des différents refus cumules R_3, R_4, \dots, R_n le tamisât est calculé par la relation :

$$T = 100 - R_c \quad (R_c : \text{refus cumulé en \%} \quad T : \text{tamisât en\%})$$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	00	00	00	100
2,5	11	11	0.55	99.45
1,25	112	123	6.15	93.85
0,63	238	361	18.05	81.95
0,315	681	1042	52.1	47.9
0,16	903	1945	97.25	2.75
0,08	41	1986	99,3	0,7
Fond	11	1997	100	0,15

Tableau IV-1- Analyse granulométrique du sable

Module de finesse : C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumules des tamis de mailles : [0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 et 5mm] sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$M_f = \sum R_c / 100$$

Ou : R_c : refus cumulé

$$M_f = 1.73$$

Les normes soviétiques spécifient de M_f des sables comme suit :

- Sables gros $M_f > 2.5$
- Sables moyen $2 < M_f < 2.5$
- Sables fin $1.5 < M_f < 2$
- Sables très fin $1 < M_f < 1.5$

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

$$M_f = 1.73 > 1.5$$

- Le sable utilisé est considéré comme un sable fin.

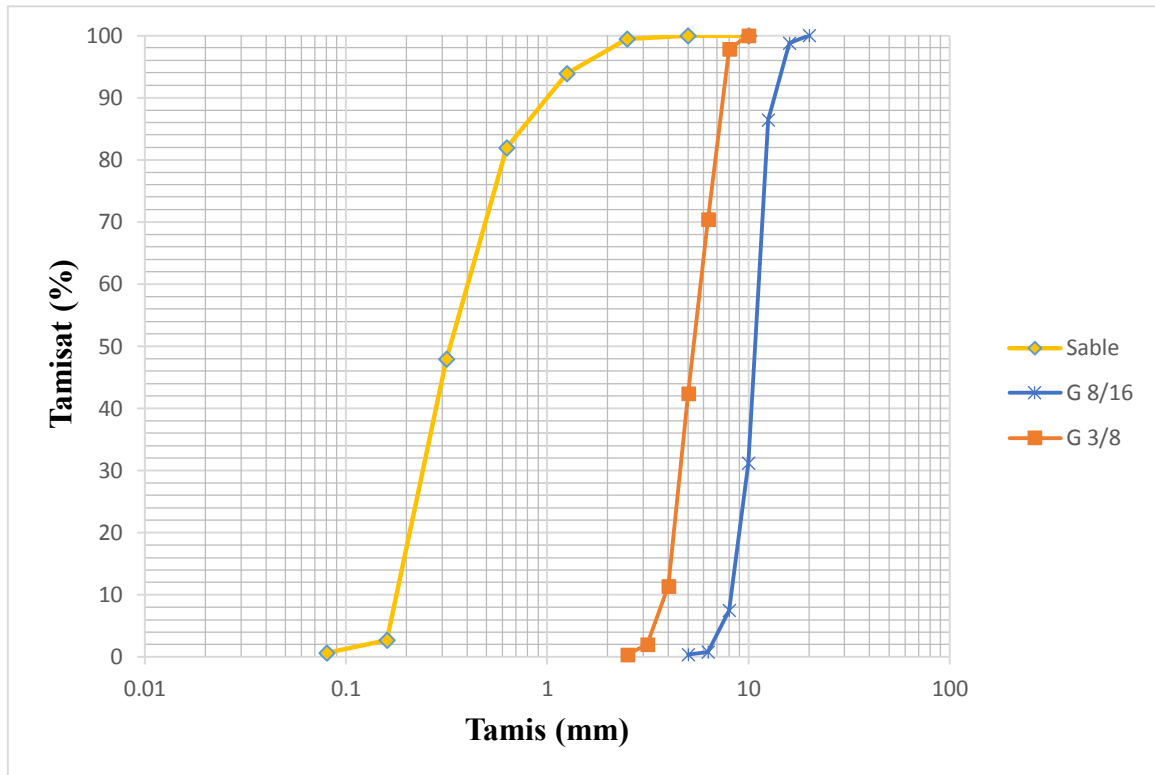


Figure IV-2- Courbes granulométriques de sable et gravier 3/8 - 8/16

IV-2-2- Caractéristiques physiques du sable utilisé :

IV-2-2-1- Masse spécifique (absolue) : [NF P 18-555]

Il s'agit de connaître le poids de l'unité de volume du matériau étudié suppose

Mode opératoire :

La masse volumique absolue du sable est déterminée à l'aide d'un récipient de 100 cm³ on prend 3 échantillons de masse de 300g.

On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000 ml et on verse d'eau, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange (sable+eau), soit (v) ce volume.

Donc le volume occupé par le sable c'est :

$$\text{Volume de sable} = V_1 = V - V_e \quad / V_e = 200 \text{ cm}^3$$

La masse volumique absolue du sable est calculée par la formule :

$$P_s = M/V_1 \quad M = 300 \text{ g}$$

Résultats obtenus :

Essais	M(g)	V _e (ml)	V	ρ (g/cm ³)
1	300	200	319.5	2.51
2	300	200	319	
3	300	200	319	

Tableau IV-2-La masse absolue de sable

IV-2-2-2- Masse volumique apparente : [NF P 18-555]

A- Masse volumique a l'état lâche :

On déterminé la masse volumique apparent du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 2.5 l

On emplit l'entonnoir avec du sable sec

En pèse le récipient vide de capacité de 0.9 l, soit M₁ ce poids

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

On nivelle la surface du sable et on pèse le tout, soit M₂ ce poids

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

$$\gamma_{app} = (M_2 - M_1) / V_R \quad (V_R = \text{volume de récipient})$$

Essais	M ₁ (g)	M ₂ (g)	γ _{app} (g/cm ³)	γ _{moy} (g/cm ³)
1	117	1402	1.42	1.413
2	117	1386	1.41	
3	117	1391	1.41	

Tableau IV-3- La masse volumique apparente à l'état lâche

B-Masse volumique à l'état compact :

C'est la masse du matériau par unité de volume après compactage compris les vides restant entre les grains. Elle est souvent supérieure à la masse volumique à l'état lâche.

Mode opératoire :

Même procédure que celle de l'état lâche. Après remplissage du récipient et le compactage par tassement à 30 secousses manuelle, jusqu'au remplissage du récipient après on nivelle ce dernier et on le pèse, soit M_2 la masse de l'ensemble (sable+récipient)

La masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivant :

$$\gamma_c = (M_2 - M_1) / V_r$$

M_1 : la masse de récipient vide

M_2 : la masse de récipient plus le sable

V_r : volume du récipient

Essais	M_1 (g)	M_2 (g)	ρ_c (g/cm ³)	ρ_{moy} (g/cm ³)
1	115	1454	1.487	1.484
2	115	1451	1.484	
3	115	1450	1.483	

Tableau IV -4- La masse volumique apparente a l'état compact du sable

IV-2-2-3-Porosité et compacité et indice des vides : [NF P 554]

Pour le sable de Boussaâda.

A/ la porosité par la formule :

$$P = (1 - \rho_{app} / \rho_{abs}) \cdot 100\%$$

B/ la compacité par la formule :

$$C = \rho_{app} / \rho_{abs} = 1 - P$$

C/ l'indice des vides par la formule :

$$E = P / C$$

Porosité P(%)		Compacité C(%)		L'indice des vides E	
Lâche	Compact	Lâche	compact	Lâche	compact
43.70	40.87	56.30	59.13	0.77	0.69

Tableau IV-5- Porosité, compacité et indice des vides

IV-2-2-4- Equivalent de sable : [NF 18-598]

Selon la norme NF18-598 qui décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

Cet essai nous permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses contenues dans le sable et la poussière nuisibles et des éléments argileux qui diminuent la qualité des bétons et provoque des gonflements de retraits.

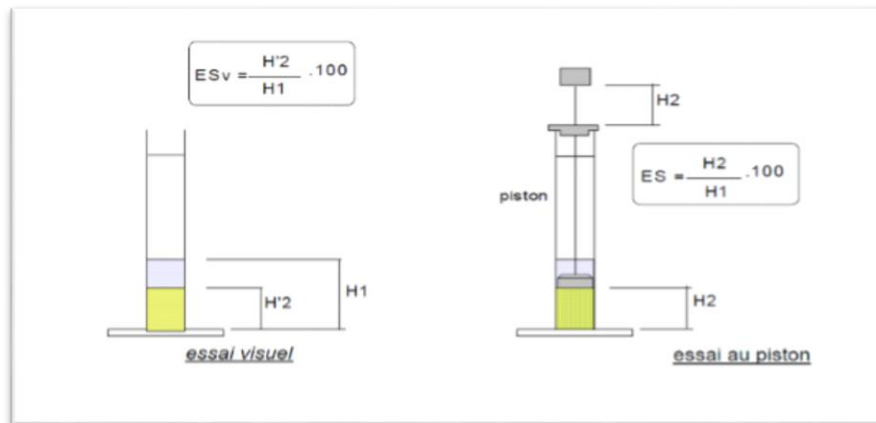


Figure IV-3 : Essais d'équivalent de sable

Mode opératoire :

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500g)
- Prendre une pesée de 120g
- Remplir l'éprouvette de solution lavant jusqu'au premier repère
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise la prise d'essai dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main à fin de chasser les bulles d'air
- Laisser reposer pendant 10 minutes
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de cours horizontale en 30 secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique
- Retirer le bouchon, le rincer avec la solution lavant au dessus de l'éprouvette, rincée ensuite les parois de cette dernière
- Faire seconder le tube lavant dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage, cette opération a pour but de laver de sable et de faire montrer les éléments fins et argileux

➤ Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution lavant atteigne le 2^{ème} repère, laisser ensuite reposer pendant 20 minutes

A. Equivalent de sable visuel : (E.S.V)

➤ après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculant jusqu'au le fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette.

➤ Mesurer également avec le réglet la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

On a : $h_2 < h_1$ **E.S.V = $(h_2 / h_1) * 100$ (%)**

h_2 : la hauteur du sable

B. Equivalent de sable piston : (E.S.P)

➤ Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, cet instant bloquer le manchon du piston, et sortir celui-ci de l'éprouvette.

➤ Introduire le règle dans l'encoche du piston jusqu'à ce que de zéro vienne buter contre la face intérieur de la tête du piston, soit h_2' la hauteur lue et correspondant à la hauteur de le partie sédimentée.

E.S.P = $(h_2' / h_1) * 100$ (%)

On a : h_1 : la hauteur du sable + floculat h_2' : la hauteur du sable ($h_2' < h_1$)

Essais	h_1 (cm)	h_2 (cm)	E.S.V(%)	h_2' (cm)	E.S.P(%)
1	10.8	8.5	78.70	8	74.07
2	10.6	8.4	79.24	8.5	76.41
3	10.4	8.2	78.84	8.3	79.81

Tableau IV-6-Équivalent de sable

$(E.S.V)_{moy} = 78.92\%$

$(E.S.P)_{moy} = 76.76\%$

C'est un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses .

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
E.S < 65	E.S < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
65 < E.S < 75	65 < E.S < 70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
75 < E.S < 85	70 < E.S < 80	Sables propre a faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité
E.S > 85	E.S > 80	Sable très propre : l'absence totale de fine argileuses risque d'entraîne d'un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par augmentation du dosage en eau

Tableau IV-7-La classification de la nature sable en fonction d' E.S

IV-2-2-5-Teneur en eau : [NF P 18-555]

Le sable a la capacité de retenir une grande quantité d'eau. Si son humidité est comprise entre 0 et 3% on le considère comme un sable sec

Mode opératoire :

- Peser un échantillon de sable humide, soit M_h son poids.
- Mettre le sable dans l'étuve a une température de 100°C environ, et cela pour 24h
- Peser l'échantillon de nouveau, soit M_s son poids

$$W = [(M_h - M_s) * 100] / M_s (\%)$$

Ou : M_s : poids du sable sec en (g)

M_h : poids du sable humide en (g)

Essais	M_h (g)	M_s (g)	W(%)	W_{moy} (%)
1	300	298.6	0.46	0.39
2	300	298.8	0.40	
3	300	299	0.33	

Tableau IV-8-Teneur en eau de sable

IV-2-2-6- Degré d'absorption d'eau : [NF P 18-555]

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorption et de retenir l'eau. Elle est définie par la formule suivante.

$$A = [(m_2 - m_1) / m_1] / 100$$

Essais	m ₁ (g)	m ₂ (g)	A(%)	A _{moy} (%)
1	300	305	1.66	1.99
2	300	306	2	
3	300	307	2.33	

Tableau IV-9- Degré d'absorption d'eau (sable)

IV-2-3- Caractéristique chimique du sable :

La composition chimique de (OUED MAITRE) est établie en mars 2009, à la cimenterie LAFARGE (M'sila). Elle est donnée au **Tableau IV-10**

Eléments	Symboles	Teneur en (%)
Silice	SiO₂	86.95
Chaux	CaO	6.33
Oxyde de ferrique	Fe₂O₃	0.90
Alumine	Al₂O₃	1.92
Oxyde de magnésium	MgO	0.53
Pente de fer	P.A.F	2.81
Sulfate	SO₃	0.44

Tableau IV-10- Les Caractéristiques chimique du sable

Commentaire :

Noter sable est un sable pur à haute teneur en silice.

IV -3- Caractéristique du gravier utilisé :**IV-3-1- Origine du gravier utilisé :**

Notre gravier utilisé pour la confection du béton est obtenue par concassage de la roche par COSSIDER.

Les fractions des graviers utilisés sont :

➤ Fraction 3/8

Fraction 8/16

IV-3-2- Analyse granulométrique :

Le même essai d'analyse granulométrique de sable :

➤ Fraction 3/8

➤ $M_{G3/8}=1.5$ kg

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
8	32	32	2.133	97.866
6,3	411	443	29.533	70.466
5	420	863	57.533	42.466
4	465	1328	88.533	11.466
3,15	141	1469	97.933	2.0666
2,5	25	1494	99.6	0.4
Fond	6	1500	100	0

Tableau IV-11-Analyse granulométrique du gravier 3/8

➤ Fraction 8/16

➤ $M_{G8/16}= 2$ kg

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
16	25.4	25.4	1.269	98.731
12.5	246.1	271.5	13.569	86.431
10	1104.9	1376.4	68.789	31.211
8	474.2	1850.6	92.48	7.512
6.3	133.2	1983.8	99.14	0.855
5	9.3	1993.1	99.61	0.390
Fond	7.2	2000	99.97	0.030

Tableau IV-12- Analyse granulométrique du gravier 8/16

IV -3-3- Les caractéristiques physiques des graviers utilisés :**IV -3-3-1- Masse volumique apparent : [NF P 18-554]**

Le principe de cette mesure s'agit de remplir un récipient de volume intérieur connu et de peser la quantité de granulats correspondant.

Mode opératoire :

Verser le granulat dans le récipient choisi et le disposer sous tassement par couches horizontales successives.

Araser la couche supérieur du granulat a l'aide d'une réglette que d'on anime la masse volumique est déterminée par la formule suivante :

$$\gamma = (M_2 - M_1) / V$$

Ou :

V : volume du récipient

M₂ : poids de l'ensemble (granulat + récipient)

M₁ : poids de récipient

Gravier	Essais	M ₁ (Kg)	M ₂ (Kg)	γ(Kg/L)	γ _{moy} (Kg/L)
3/8 V=7L	1	2.922	12.306	1.340	1.359
	2	2.922	12.545	1.370	
	3	2.922	12.491	1.367	
8/16 V=10L	1	3.491	17.200	1.371	1.367
	2	3.491	17.110	1.361	
	3	3.491	17.195	1.370	

Tableau IV-13-Masse volumique apparente du gravier

IV -3-3-2- La masse volumique absolue du gravier :

Le mode opératoire est le même effectué pour le sable, et les résultats sont regroupés dans le (Tableau IV-14)

Gravier	Essais	M(g)	V _e (cm)	V (cm)	ρ (g/cm ³)	ρ _{moy} (g/cm ³)
3/8	1	400	400	560	2.5	2.53
	2	400	400	560	2.5	
	3	400	400	555	2.58	
8/16	1	400	400	550	2.66	2.6
	2	400	400	555	2.58	
	3	400	400	555	2.58	

Tableau IV -14- La masse volumique absolue du gravier

IV -3-3-3- Compacité, porosité et l'indice de vide : [NF P 18-554]

Le mode opératoire est semblable a celui effectuée pour le sable on calcule la porosité selon la formule :

A/ la porosité est donnée par la formule :

$$\rho = (1 - \gamma_g / \rho_g) * 100\%$$

B/ la compacité est donnée par la formule :

$$C = \gamma_g / \rho_g = 1 - \rho$$

C/l'indice des vides est donnée par la formule :

$$E = \rho / (1 - \rho) = \rho / c$$

Fraction du gravier	Porosité P(%)	Compacité C(%)	L'indice des vides E
3/8	46.28	53.72	0.86
8/16	47.42	52.58	0.90

Tableau IV-15- Porosité, compacité et l'indice des vides

IV -3-3-4- Degré d'absorption d'eau (gravier) :

Gravier	M ₁ (g)	M ₂ (g)	A(%)	A _{moy} (%)
3/8	600	607.1	1.18	1.197
	600	606.5	1.08	
	600	608	1.33	
8/16	600	609.5	1.58	1.582
	600	609	1.5	
	600	610	1.66	

Tableau IV-16- Degré d'absorption d'eau du gravier

IV -3-3-5- Teneur en eau du gravier :

Gravier	M _h (g)	M _g (g)	W(%)	W _{moy} (%)
3/8	500	497	0.6	0.60
	500	496	0.8	
	500	498	0.4	
8/16	500	496	0.8	0.73
	500	497	0.6	
	500	496	0.8	

Tableau IV-17- Teneur en eau des graviers

IV -3-4- Les caractéristiques mécanique des graviers utilisés :

Ce sont des essais importants pour les granulats routiers. En effet, le passage répété de véhicules conduit émousser, à polir progressivement les granulats et ainsi à diminuer l'adhérence des pneumatique sur la chaussée.

Ces caractéristiques permettent également d'estimer la qualité des granulats utilisés dans la confection des bétons.

IV -3-4-1- Essai de résistance au choc (essai los Angeles) : [NF P 18-573]

Comme l'essai précédent, cet essai renseigne sur la dureté des roches se basant sur un coefficient, appelé coefficient Los Angeles(LA), et sur le principe de d'effritement par abrasion.



Figure IV-4- Appareil de l'essai Los Angeles.

Principe de l'essai :

L'essai consiste à mesurer la masse (M) d'éléments inférieurs à 1.6mm, produits par la fragmentation du matériau (diamètres compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations.

Formulation :

Si (M) est la masse du matériau soumis à l'essai et (m) la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation aux chocs s'explique par le coefficient los Angeles L_A : $L_A = (m/M) * 100$

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

Gravier	Masse initiale M (kg)	Masse m (kg)	Coeff de los angeles LA (%)
3/8	5	1.165	23.30
8/16	5	1.258	25.16

Tableau IV-18- Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé

Classification :

Un tableau de classification à été déjà tracé. Il permet de classer les roches en fonction du coefficient Los Angeles.

Coefficient L_A	Nature de los Angeles L_A
<20	Très dure
20à25	Dure
25à30	Assez dure
30à40	Mis dure
40à50	Tendre
<50	Très tendre

Tableau IV-19- Classification des roches en fonction du coefficient L_A **Commentaire :**

Le gravier (3/8) : C'est un gravier dur ($L_A=23.20\%$) ($20 < L_A < 25$) et gradué.

Le gravier (8/16) : c'est un gravier assez dur ($L_A=25.16\%$) ($25 < L_A < 30$), se trouve dans l'intervalle des graviers admissible

Gravier 8/16 : $25 < L_A < 30$ Assez dure

Gravier 3/8 : $20 < L_A < 25$ dure

IV-3-5-Caractéristiques chimiques des graviers utilisés :

La composition chimique du gravier de carrier COSSIDER est établie en Mars 2004, à la cimenterie ACC de M'Sila. Elle est donnée au tableau IV.20

Elément	S_iO_2	AL_2O_3	C_aO	$F_{e2}O_3$	M_gO	SO_3	K_2O	Na_2O
Teneur(%)	40.65	8.87	40.56	3.25	3.65	0.79	0.65	0.01

Tableau IV -20-Analyse chimique du gravier

IV -4- Caractéristiques du ciment utilisé :

Le ciment utilisé dans cette recherche est portland composé de classe 42.5 provient de la cimenterie Lafarge de M'sila .

IV -4-1- Caractéristique physique :

		unité	Valeur
Masse volumique absolue		g/cm ³	3.1
Consistance normale		%	25%
La finesse (blaine)		Cm ³ /g	3000-3200
Le chatelier	A froid	Mm	00
	A chaud		2
Temps de prise	Début	min	2 :30
	Fin		3.30
Résistance a la compression	2 jours	MPa	18
	7 jours		32
	28 jours		Plus de 42.5

Tableau IV-21-Caractéristiques physique du CPJ-CEM/42.5**IV-4-2- Caractéristiques chimiques du ciment utilisé [CPJ42.5] :**

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	So ₃	Na ₂ O
Teneur %	20.7	4.75	62.92	3.75	1.90	1.98	0.09

Tableau IV-22-Les compositions chimiques du CPJ42.5

La composition chimique est établie par laboratoire de cimenterie Lafarge de M'sila

IV-4-3-Les caractéristiques minéralogiques du ciment [CPJ42.5] :

Selon la méthode de **bogue**, **La composition** minéralogique de ciment CPJ42.5 donnée :

Eléments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneur %	59	14	6	100

Tableau IV-23- Les compositions minéralogiques du CPJ 42.5**IV -5- la fibre de verre :**

IV-5-1- Origine de fibre de verre: d'origine de société MAGHREB PIPE M'Sila.

IV-5-2-Caractéristiques physiques et chimiques de fibre de verre :

Les caractéristiques physiques et chimiques de la fibre de verre sont présentées par les tableaux suivants :

Caractéristiques	Valeur
Coefficient de dilatation 10^{-6} K^{-1})	5,0
Masse Spécifique (g/cm^3)	2,6
Résistance à la traction (MPa)	3400
Conductivité thermique : W/km	0,9

Tableau IV-24- Caractéristiques physiques de la fibre de verre

Elément	% la masse
SiO ₂	3-55
Al ₂ O ₃	14-15
CaO	17-22
MgO	5
K ₂ ONaO ₂	<1
B ₂ O ₃	6-8

Tableau IV-25- Caractéristiques chimiques de la fibre de verre.



Figure IV-5- Fibres de verre

IV-6- Les Adjuvants :

Les adjuvants sont des produits incorporés au moment du malaxage du béton à un dosage inférieur à 5% en masse du poids de ciment pour modifier ou améliorer les propriétés du mélange à l'état frais et ou du durci, (norme EN 934-2)

Dans notre sujet de recherche, nous avons utilisé un type des adjuvants fabriqués par la société **TEKNA CHEM** à zone d'activité 6^{ème} tranche-Sétif (wilaya de Sétif) à savoir **SUPERIOR 126** de **TEKNA CHEM** (super-plastifiant).

IV-6-1-Le SUPERIOR 126 :**IV-6-1-A/description :**

SUPERIOR 126 est un adjuvant super plastifiant à base de poly-carboxylates de nouvelle génération, qui permet de réaliser des bétons très fluides avec des rapports E/C très réduit. Il est compatible avec la majorité des ciments. Par son action dispersante et la bonne synergie de ses composants il confère au béton un maintien prolongé de l'ouvrabilité avec des bonnes caractéristiques de compacité, résistances mécaniques et chimiques.

Forme	Couleur	PH à 20°C	Densité	chlorure	Extrait sec
Liquide	Brune	5.5	1.130 ±0.03	< 0.1%	40%

Tableau IV-26-Caractéristique de SUPERIOR 126

IV-6-2-CARACTERISTIQUES :

Le **SUPERIOR 126** est particulièrement recommandé pour la fabrication de béton à faible rapport E/C à très long maintien d'ouvrabilité et aux performances mécaniques élevées à jeune âge avec réduction des retraits et l'obtention de résistances finales élevée. Il donne une excellente imperméabilité et une grande résistance à l'agression chimique.

Le produit peut être formulé pour un long maintien de l'ouvrabilité avec des résistances élevées à la compression et flexion à 28 jours, et une diminution du retrait hygrométrique, avec une excellente finition esthétique et meilleure durabilité.

Le **SUPERIOR 126** est donc adapté à l'industrie du béton prêt à l'emploi et aux chantiers de génie civil.

IV-6-3-DOMAINES D'APPLICATION :

- Béton à très long maintien d'ouvrabilité.
- Fondations profondes (parois moulés, pieux ...)
- Pompages longues distances.
- Bétons de bâtiment.
- Béton de génie – civil (ouvrages d'art, tunnels).
- Béton à faible rapport E/C.

IV-6-4-DOSAGE :

- Le dosage de **SUPERIOR 126** varie entre 0.6 à 2 % du poids de ciment.
- Le dosage optimal est déterminé en fonction des caractéristiques désirées, selon la composition du béton.
- **SUPERIOR 126**, présente un léger effet retardateur, quand le dosage est supérieur à 1.2%
- Pour un dosage supérieur à 1.5% il est conseillé de contacter l'ingénieur conseil de la région .
- Pour des bétons particulièrement compacts avec des réductions élevées du rapport E/C , le dosage du **SUPERIOR 126** peut aller jusqu'à 2% du poids du ciment .
- Pour un béton structural, faire des tests initiaux.

IV-6-5-MODE D'EMPLOI :

L'addition du **SUPERIOR 126** ne doit jamais se faire sur un béton sec (c'est-à-dire avant l'ajout de l'eau). Il sera absorbé par les agrégats et le sable d'où son inefficacité avec le ciment.

Il est conseillé d'ajouter le **SUPERIOR 126** après l'ajout des composants du béton et environ 90% de l'eau de gâchage nécessaire.

Terminer le mélange en ajoutant graduellement l'eau restant (10%) jusqu'à l'obtention de la consistance désirée. les dosages sont évalués au poids du ciment.

IV-7- Le filler utilisé (marbre) :

Le marbre est une roche métamorphique dérivant par écrasement, élévation de température de roche calcaire composé de calcite et de couleur blanche à l'état pur.

IV-7-1-Caractéristiques physiques et chimiques du marbre :

Caractéristiques physiques de ce filler (marbre) sont présentées au tableau :

Propriété physiques	Fine marbre
Masse volumique apparent (g/cm^3)	0.83
Densité	2.67
Surface spécifique blain (cm^2/g)	448

Tableau IV-27-Caractéristiques physiques du marbre

Composition chimique est établie en 12 avril 2010 à la cimenterie Lafarge de M'Sila. Elle donnée par le tableau suivant :

Analyse chimique	Fines marbre
SiO_2	1.47
CaO	55.3
MgO	0.01
Fe_2O_3	0.14
Al_2O_3	0.35
Na_2O_3	0.12
K_2O	0.04
So_3	0.01
Pert de feu	42.56

Tableau IV-28-Caractéristiques chimiques du marbre

IV-8- L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisé est une eau potable du laboratoire de génie civil.

IV-8-1-Caractéristiques chimiques de l'eau utilisée :

La composition chimique d'eau du laboratoire de département de génie civil est établie en 10/05/2005, au laboratoire de chimie (M'Sila). Elle est donnée par :

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

Tableau IV-29- Caractéristiques chimiques de l'eau de gachage.

IV-9-Conclusion :

Le quatrième chapitre est destiné à la caractérisation des matériaux locaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques, et mécaniques (Ciment, poudre de marbre, superplastifiant, fibres, sable et gravier.) pour la confection du béton, les essais ont été exécutés au laboratoire de génie civil à l'université de M'sila.

Suivant les résultats obtenus, après caractérisation des différents constituants à savoir (sable, gravier, ciment, fillers), nous tirons qu'on peut utiliser ces derniers dans les bétons en général et les BAP en particulier.

Chapitre 05
Techniques expérimentales
des BAP

Chapitre 05 : Technique expérimentale

Introduction:

Les connaissances acquises depuis l'apparition des BAP et la meilleure maîtrise de toutes les étapes (formulation, fabrication, mise en œuvre et contrôle) sont suffisantes pour permettre l'utilisation de ces bétons dans de nombreuses applications. Certains points restent cependant à améliorer pour en étendre l'emploi.

Le comportement d'un BAP à l'état frais se différencie notablement de celui d'un béton ordinaire. Son ouvrabilité se décline classiquement suivant: sa mobilité en milieu non confiné, sa mobilité en milieu confiné et sa stabilité.

Nous avons choisi de présenter différemment les caractéristiques des BAP et d'aborder la complexité du matériau selon ses trois principales caractéristiques:

- la fluidité
- l'homogénéité
- la robustesse.

En plus de la capacité. à se compacter de lui-même, les propriétés les plus importantes pour la mise en œuvre du BAP sont la fluidité, la viscosité, et la résistance envers la ségrégation.

Il existe de nombreux procédés pour effectuer le contrôle de ces propriétés sur béton frais. Ils vont du complexe et coûteux rhéomètre à béton, jusqu'au simple cône servant la mesure de l'étalement (Slump Flow).

V -1- Formulation du béton autoplaçant :

Pour la formulation du béton auto plaçant nous n'avons pas suivi une formulation classique.

Nous avons respecté les conditions nécessaires permettant de garantir l'autoplaçabilité tout en se basant sur des compositions proposées dans la littérature spécialisée.

Il s'agit de choisir les proportions des constituants dans 1m^3 de béton en ayant comme données les paramètres suivants :

- ◆ Un rapport $G/S = 1$.
- ◆ Un rapport $E/C = 0.5$
- ◆ Un dosage en ciment plutôt élevé $C = 400\text{ kg /m}^3$
- ◆ Un pourcentage déterminé en ajouts (superplastifiant, les fillers).

V -1-1- Les compositions des différents bétons:

BAP : béton autoplaçant témoin sans fibre.

BAP1 : béton autoplaçant avec 0,1% de fibre de verre de 5cm de longueur.

BAP2 : béton autoplaçant avec 0,15% de fibre de verre de 5cm de longueur.

BAP3 : béton autoplaçant avec 0,1% de fibre de verre de 2.5cm de longueur.

BAP4 : béton autoplaçant avec 0,15% de fibre de verre de 2.5cm de longueur.

V -1-2-La composition d'un m³ de béton :

	BAP (kg/m³)
Sable	800
Gravier 3/8	416
Gravier 8/16	400
Ciment	400
Eau	200
Super plastifiant	8.8
Filler (marbre)	40

Tableau V-1: Les compositions d'un m³ de béton

V-2- Préparation de mélange :

La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie.

Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé.

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

- _ Vérifier en premier le nombre et l'état des moules prismatique cubique nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- _ Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- _ Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, si non les sécher préalablement dans l'étuve.
- _ Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le superplastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.
- _ Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, marbre) et les introduire dans le malaxeur.
- _ Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec.

- _ Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première un quart de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant).
 - _ Ajouter la trois quart d'eau graduellement.
 - _ Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
 - _ Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration.
- Pour les BAP avec les fibres en effectuer les mêmes étapes de préparation puis on ajoute la quantité des fibres en pluies avec malaxage de 4 min.

V-3- Conservation des éprouvettes :

Après le gâchage pour un béton BAP témoin ou pour un BAP avec les fibres, les moules sont conservés dans une pièce à température ambiante, et démoulés après 24h.

Une fois démoulées, pour assurer un bon mûrissement du béton, les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau à une température de 20°C, ceci permet d'éviter les pertes d'eau, et de garantir le déroulement normal du processus d'hydratation du ciment.

Finalement les éprouvettes ont été exposées à une température élevée variant de 20C°, 200C°, 400C° et 600C° avec une vitesse de la montée en température de 10C°/min et un maintien de température dans le four à moufle pendant 1heure.

Le procédé expérimental appliqué repose sur chargement thermique puis mécanique



Figure -V-1- Le four

V-4- Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais :

Dans la suite du document seront présentés les essais proposés par L'AFGC qui servent actuellement de référence à défaut d'être normalisés. Les résultats de ces essais permettent de donner une vision qualitative pour les BAP.

Trois principaux essais permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP :

1-Mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams).

2-Mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L).

3-Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis).

V-4-1-Essai d'étalement au cône d'Abrams [NFEN12 350-8]:

La fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement ou slump flow). Des valeurs cibles de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP. La valeur cible d'étalement doit être définie en fonction des caractéristiques de la formulation et des conditions et méthodes de mise en œuvre. Cet essai caractérise la mobilité du BAP en milieu non confiné. Il permet en particulier de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier.

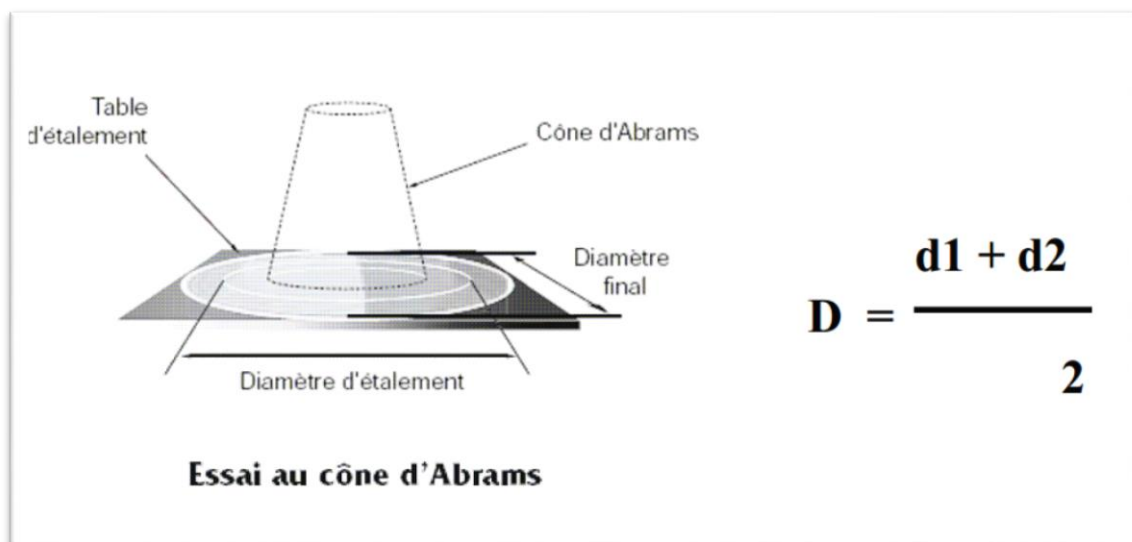


Figure –V-2-Essai au cône d'Abrams

➤ **Objet d'étalement (slump flow) :**

- L'essai d'étalement ou slump flow est utilisé pour caractériser la fluidité du béton.

➤ **Matériel nécessaire :**

- Plateau équipé en partie supérieure d'une plaque métallique plane (type table DIN) constituant un carré d'au moins 90 cm de côté
- Cône d'Abrams disposant d'un empattement à sa base afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur.
- Mètre ou règle de 90 cm.

➤ **Mode opératoire :**

- S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon).
- Placer et centrer le cône d'Abrams sur le plateau.
- Prélever un échantillon de béton représentatif.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône.
- Retirer l'entonnoir, araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.
- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesuré (au centimètre le plus proche) le diamètre final (D final) sur deux côtés perpendiculaires.
- Noter le résultat des deux valeurs. Exemple : ((68/70cm)). Si les deux valeurs différentes de plus de 5 cm, l'essai doit être invalidé et reconduit.
- Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenue, en arrondissant au centimètre supérieur.



Figure –V-3- Essai d'étalement

V-4-2- Essai de stabilité au tamis [NF EN 12 350-11]:

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de béton (2 litres) sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm.

Le pourcentage en poids de laitance ayant traversé le tamis par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 % et 20 %.



Figure -V-4-Essai au tamis.

➤ **Objet de l'essai :**

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçant vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier.

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.

➤ **Matériel utilisé :**

- Seau de 10 L + couvercle
- Tamis 5 mm diamètre 315 mm + fond
- Bascule : précision minimale 20 g, portée minimale 20kg



Figure V-5- Stabilité au tamis.

➤ **Mode opératoire :**

- Echantillonnage :
- En laboratoire : Malaxer, verser directement 10 litres de béton dans le seau.
- Temps d'attente entre l'arrêt du malaxeur et le prélèvement <30s.
- Sur chantier, BPE amené par camion malaxeur : Malaxer à grande vitesse pendant 1 minute.
- Remplir le seau avec 10 litres de béton directement depuis la goulotte du camion.
- Sur chantier avec centrale, mise en œuvre à la benne : Prélever 10 L de béton en tête de benne à la main écope pour remplir le seau.
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation.
- Attendre 15 mn.
- Peser le fond et le tamis à vide.
- Peser le fond seul.
- Poser tamis+fond sur la bascule.
- Faire la tare.
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire de ressuage à la surface du seau après les 15mn.
- Verser sur le tamis un poids de béton égal à 4,8 kg - tolérance ± 0.2 kg ; verser ce béton au centre du tamis : hauteur de chute du béton de 50 cm ± 5 cm.
- Noter le poids réel lu de l'échantillon.
- Attendre 2 mn.

- Faire la tare.

Peser le fond avec la laitance :

- On a : $P_{\text{laitances}} = P_{\text{fond}} + \text{laitance} - P_{\text{fond}}$
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon.
- $\delta = (P_{\text{laitance}}/P_{\text{échantillon}}) \cdot 100$

Critères d'acceptabilité :

Les critères qui suivent sont particulièrement adaptés aux applications de béton autoplaçant en éléments verticaux. La mesure de pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton autoplaçant de la façon :

- $0\% \leq \%P_{\text{laitance}} \leq 15\%$ **stabilité satisfaisante.**
- $15\% < \%P_{\text{laitance}} \leq 30\%$ **stabilité critique** (essai de ségrégation à réaliser in situ).
- $\%P_{\text{laitance}} > 30$ **stabilité très mauvaise** (ségrégation systématiquement, béton inutilisable). Par ailleurs, la détection d'eau de ressuage lors de l'essai n'est pas acceptable.

Cela induit des risques de tassement, de délavage du parement et d'altération de la perméabilité.

V-4-3- Essai de la boîte en « L » [NF EN 12 350-10]:

La cohésion armée peut se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures. La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte, puis en levant une trappe à laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre et le diamètre des du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans la partie verticale (H1) et horizontale (H2). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage H2/H1. Une valeur de ce rapport supérieur à 0.8 traduit un bon écoulement.

Objectif de la boîte en L :

La boîte en L permet de tester la mobilité de béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.



Figure –V-6- Essai de boit L.

Mode opératoire :

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte en L à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2 (**figure –V-6**) et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H2/H1.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation.

A noter que les temps nécessaires pour des écoulements horizontaux respectifs de 20 cm et 40 cm (à matérialiser sur le fond de la boîte en L) peuvent être mesurés pour estimer la viscosité du béton.

V-4-4-La masse volumique du béton autoplaçant [NF EN 12 350-6]:

Voir été essuyées ou nettoyées, les éprouvettes sont pesées avec une erreur inférieure à 1/1000. La masse volumique est alors calculée en divisant sa le volume de l'éprouvette.

C'est-à-dire : $\rho = M/V$.

La masse volumique exprimée en kg/dm³ car-la densité.

V-5- Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci :**V-5-1-Essai compression [NF EN206-1] :****But de l'essai :**

- Le but et de déterminer la résistance à la compression du béton.

- L'essai se fait sur une éprouvette cylindrique de dimensions normalisées et d'élançement de 2. ($H = 2 \varnothing$) ou éprouvette cubique 10x10x10. Les dimensions les plus utilisées sont : $H = 32 \text{ cm}$ $\varnothing = 16 \text{ cm}$.

Principe de l'essai :

- Après malaxage, on remplit en béton un moule cylindrique normalisé, le remplissage du moule se fera en 3 couches bien vibrées chacune.
- L'éprouvette sera immergée dans un bac d'eau pour durcir à une température moyenne de 20 C° .
- Le démoulage se fera après un 24 heures. Généralement, la résistance est déterminée à 28 jours.

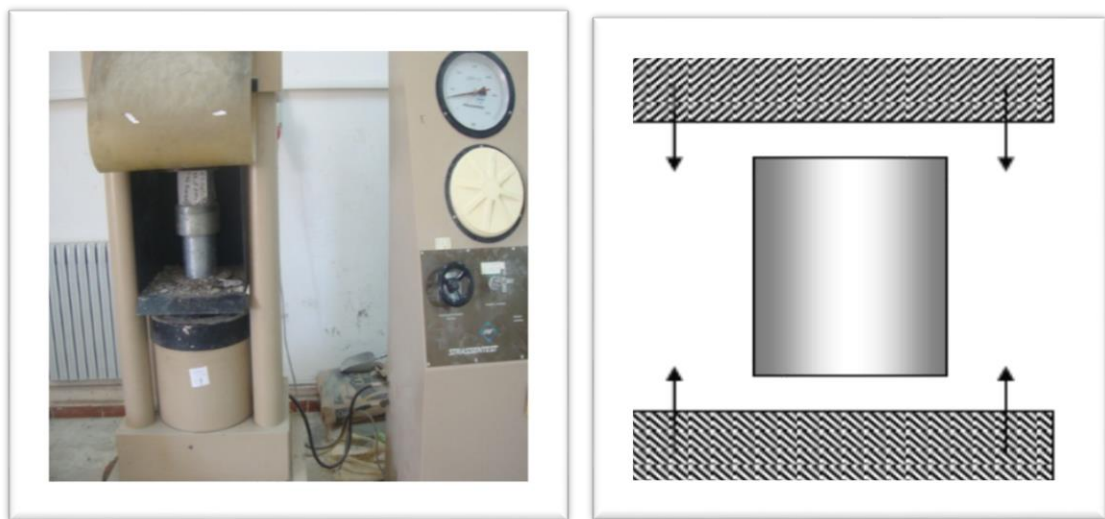


Figure –V-7- l'appareil de compression.

Conduite de l'essai :

- Ce temps écoulé, on retire le moule et on fait passer l'éprouvette à la presse permet la lecture de la force qui s'exerce sur les facettes latérales du cylindre de béton.
- Eprouvette sera placée entre les deux mâchoires de la machine et on élèvera une seule lecture. Celle de la force correspondant à la rupture de l'échantillon. Soit F cette lecture.

Calculs :

La résistance sera: $G = \frac{F}{S}$

- S : section de l'éprouvette : 100 cm^2 .
- F : force au moment de la rupture.

Et essai se fait également sur les roches que l'on doit tailler au préalable sous forme de cubes d'arête égale à 10 cm.

V-5-2- Essai de traction par flexion : [NF P18-408]

But de l'essai :

Cet essai a aussi pour but de déterminer la résistance à la traction du béton. C'est un essai de traction par flexion qui consiste à écraser un prisme (7x7x28) de béton placé horizontalement entre deux plateaux d'une presse.



Figure -V-8-Essai de traction par flexion

Conduite de l'essai :

Lors d'un essai de flexion trois points, la poutre de béton est soumise dans sa partie supérieure à des contraintes de compression et dans sa partie inférieure à des contraintes de traction. Compte tenu que le béton résiste beaucoup moins à la traction qu'à la compression (dans un rapport de 10) l'éprouvette va se rompre dès que le béton aura atteint sa limite en traction. La contrainte limite qui découle d'un calcul classique de résistance des matériaux en élasticité est σ_{ff} (contrainte de traction par flexion). Le matériau béton n'ayant pas un comportement élastique au voisinage de la rupture, il convient d'apporter au calcul de la résistance en traction du béton σ_t un terme correctif de 0,6 ($\sigma_t = 0,6 \sigma_{ff}$)

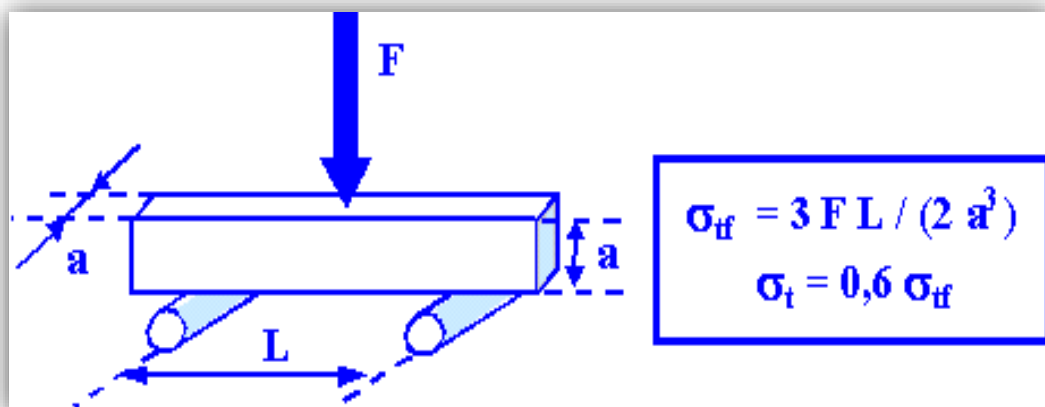


Figure V-9-Formule de calcul de la résistance de traction

V-5-3- Mesure de la perte de masse :

Cette partie d'étude a eu pour but d'évaluer les quantités de l'eau libre présente dans les matériaux testés. Elle permet également d'observer les cinétiques du processus de séchage et de déshydratation des BAP. Les mesures sont réalisées sur les cinq bétons avant et après l'essai d'échauffement stationnaire. Les pesés ont été effectués avec une balance de résolution 0,1g.

$$\text{PERT DE MASSE } (\Delta M) = \frac{(M_0 - M_1)}{M_0} * 100\%$$

V-5-4- Mesure la porosité à l'eau (P_{eau}) : [NF P 18 459]

Pesée hydrostatique M_{eau} = masse en grammes pesée sous l'eau

Pesée dans l'air de l'éprouvette saturée d'eau M_{sat}

Séchage à T°=105C° jusqu'à masse constante (2 pesées espacées de 24 h ne s'écartent pas plus de 0.05%)

Pesée dans l'air de l'éprouvette sèche M_{sec}

Calcul de la porosité accessible à l'eau :

$$\text{Peau} = \frac{\text{Msat} - \text{Msec}}{\text{Msat} - \text{Meau}} \times 100$$

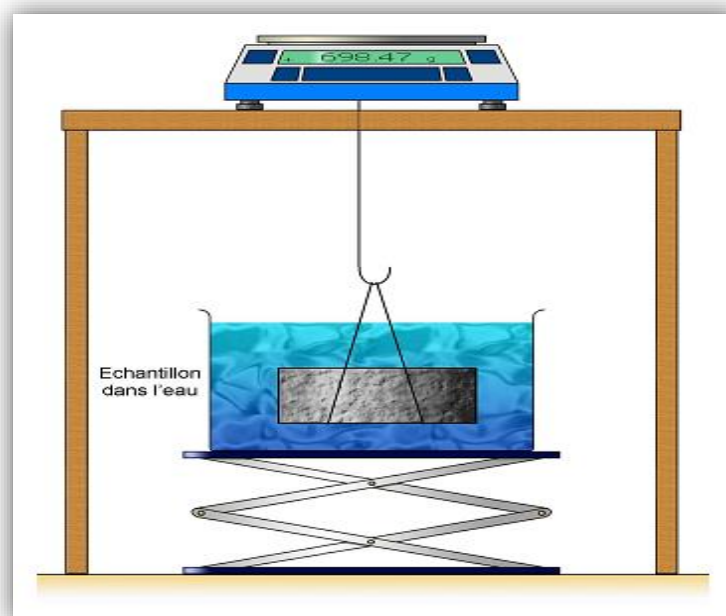


Figure –V-10-Essai de porosité à l'eau

V-6- Détermination de la résistance par les essais non destructifs :

Le béton est l'un des matériaux les plus importants dans tous les domaines de la construction, leur résistance a été considérée comme la qualité essentielle. Le contrôle de la résistance des bétons est un problème de première importance pour les constructeurs, ils développent des méthodes et des matériels pour s'appuyer uniquement sur les essais non destructifs (ultrason, scléromètre).

V-6- 1- Ultrason [NA EN 12504-4] :**a-Principe d'essai :**

La méthode consiste à mesurer la vitesse de propagation d'ultrasons traversant le béton à l'aide d'un générateur et d'un récepteur, les essais peuvent être effectués sur des éprouvettes en laboratoire ou sur ouvrage.



Figure -V-11-Appareil ultrason.

b- Principe de fonctionnement :

L'appareil ultrason permet de mesurer le temps de passage des ondes ultrasoniques longitudinales à travers le béton, ce temps indiqué par un affichage digital.

L'appareil ultrason se compose de l'instrumentation électrique caractérisée par :

- Un affichage digitale ou on peut lire le temps de propagation des ondes mesurées (μs).
- Deux sondes : un émetteur et l'autre un récepteur de fréquence.
- Deux câbles pour le branchement des ondes.
- Une éprouvette cylindrique pour l'étalonnage ($42.5.\mu\text{s}$).
- Un alimentaire en charge (batterie).

On branche les deux sondes aux bornes de l'appareil à l'aide d'un câble.

On fait l'étalonnage de l'appareil, on enduit les deux faces de l'éprouvette étalonnée de vaseline.

On déduit la vitesse égale à (d/t) exprimé le plus souvent en (Km/s).

V-6-2- Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NA EN 12504-2] :

a-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 sclérometique).

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



Figure V-12- Appareil Scléromètre.

Mode opératoire :

On place l'éprouvette entre les plateaux de la presse et on applique la vitesse Constante (0.5 MPa) jusqu'à la charge de KN, puis on fait l'essai sclérometique horizontal coups.

La distance entre les points d'essai doit être au moins de (mm), pour éviter l'influence du compactage superficiel du béton.

Pour chaque zone d'essai, on établit la moyenne des lectures au scléromètre après l'élimination des valeurs très faible au très fortes.

Pour calculer la moyenne on a :

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{n}$$

S : dureté au choc d'élément.

Si : dureté de la zone de l'élément.

n : nombre de zone d'essai sur l'élément.

V-7-Conclusion :

Dans ce chapitre nous allons résumer les essais réalisés sur le béton autoplaçant fibré à l'état frais (l'étalement, boîte en (L), stabilité au tamis) et à l'état durci (résistance à la compression, résistance à la traction, porosité, la perte de masse et les essais non destructifs).

Chapitre 06

Résultats et analyses

Chapitre 06 : Les résultats

VI -1-Introduction :

Le but de notre travail est l'évaluation de la qualité de béton autoplaçant fibré exposé à haut température au moyen des essais non destructifs et essai direct :

VI -2-Presentation des résultats:

A partir des mélanges obtenus, il faut procéder à différents essais afin de caractériser les BAP confectionnés. Pour cela, nous utilisons les tests recommandés par l'AFGC.

VI -2-1- Résultats des essais à l'état frais:

Les résultats des bétons à l'état frais sont représentés au tableau suivant :

Type de béton	L'étalement (mm)	Stabilité de tamis (%)	Boite en L H2/H1	Masses volumiques de béton (kg/m^3)
BAP	710	12.3	0.833	2.335
BAP1	540	10.6	0.80	2.376
BAP2	530	9.4	0.76	2.375
BAP3	580	11.2	0.79	2.435
BAP4	560	10.2	0.78	2.479

Tableau VI -1-Résultats d'essais sur le béton frais

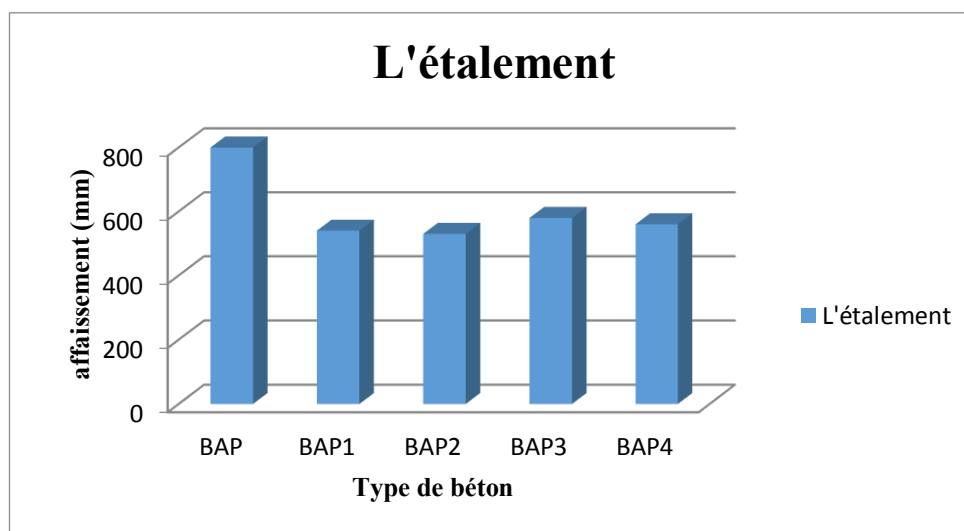


Figure VI -1-l'étalement en fonction de type de béton

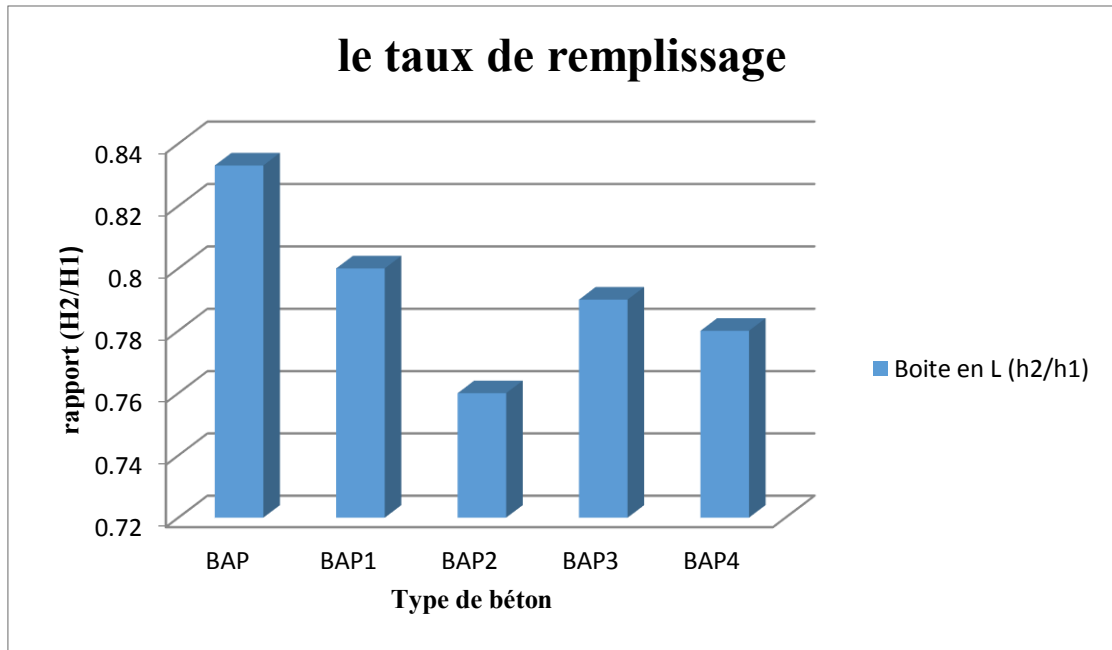


Figure VI -2-Le taux de remplissage en fonction de type de béton

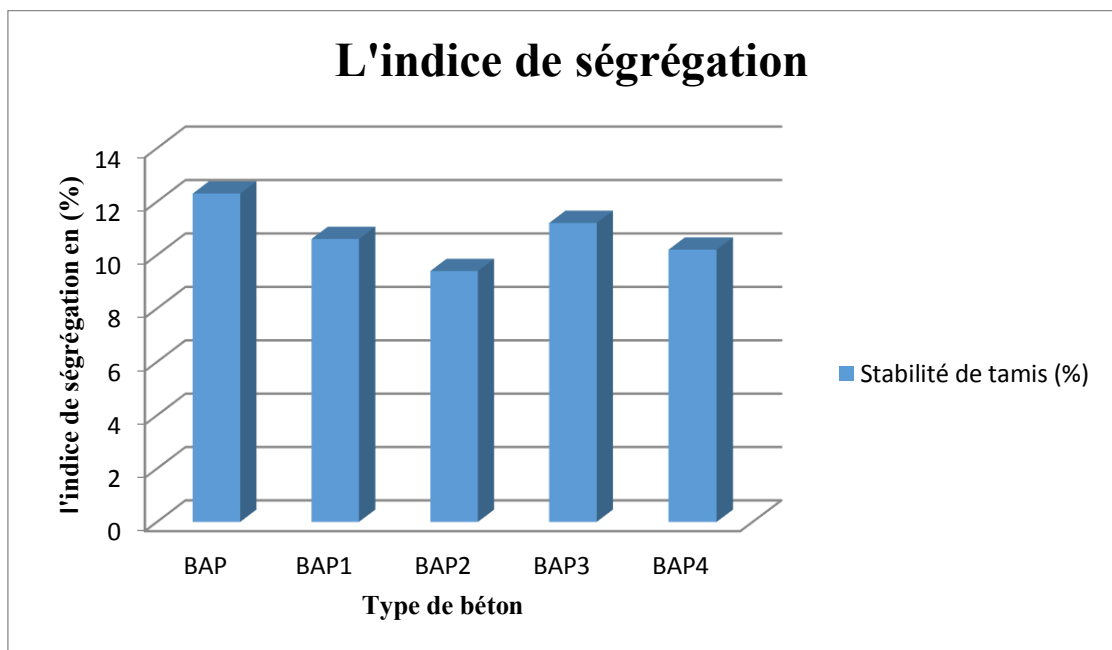


Figure VI -3-L'indice de ségrégation en fonction de type de béton

Commentaire :

Les compositions des bétons autoplaçant donnent une grande fluidité sans ségrégation et sans ressuage qui constituent d'ailleurs ses spécificités.

L'étude du béton autoplaçant à l'état frais basée sur les essais d'étalement, la boîte en L, stabilité au tamis, donne des résultats qui correspondent aux critères des recommandations provisoires.

Les étalements des bétons autoplaçant testés sont supérieurs à 53 cm, le taux de remplissage de la boîte en L est de l'ordre 80 %, la laitance est inférieure de 15 % selon le critère d'acceptabilité, la stabilité au tamis est considéré comme satisfaisante.

Comme la fluidité et la facilité de mise en œuvre de béton autoplaçant jouent un rôle essentiel dans ses propriétés, nous avons incorporé un 0.1% de 0.15% des fibres de verre par rapport le volume de mélange. Où au-delà de ce pourcentage le béton perd ses propriétés rhéologiques.

Et avec cette quantité nous avons obtenus une légère diminution dans les propriétés rhéologique comme c'est inscrit dans le tableau mais nous restons toujours dans l'intervalle des bétons fluides.

Donc on peut conclure que la présence des fibres joue un rôle et elle a une influence sur l'aspect rhéologique des bétons autoplaçant ; contrairement à la longueur qui ne pose pas de problème, d'après les résultats inscrits dans le **(Tableau VI -1-)** nous tirons qu'on peut garder les propriétés rhéologiques d'un béton autoplaçant avec l'utilisation d'un fibrage des différentes dimensions.

Dans le cas de l'étalement nous avons une diminution de 180 mm par rapport le béton de référence mais le résultat est toujours entre 530mm et 710mm

Concernant la stabilité au tamis l'utilisation des fibres influe positivement sur cette dernière.

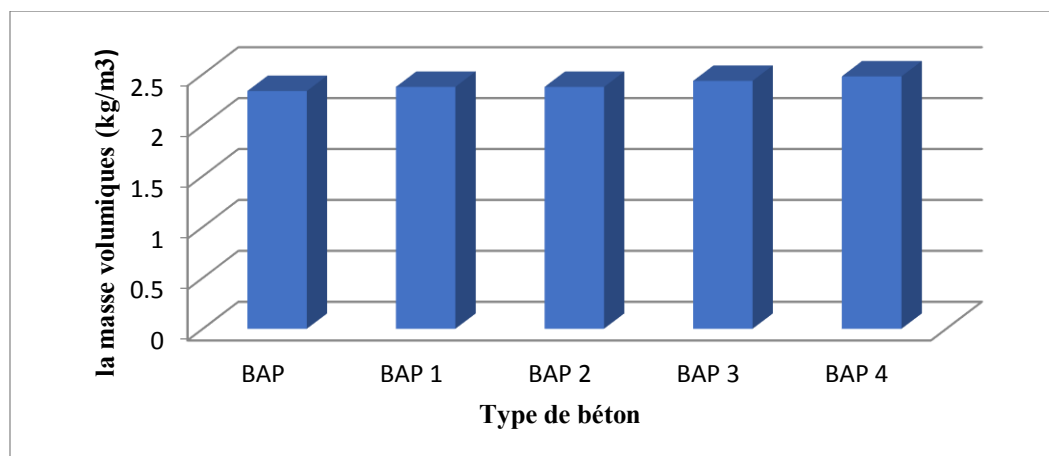


Figure VI -4- La masse volumique en fonction de type de béton

Commentaire:

A partir des résultants obtenus on constate que la masse volumique des BAP fibrés est supérieure à la masse volumique du béton témoin ceci est du à la présence des fibres.

Commentaire sur l'influence des fibres de verre sur les propriétés rhéologiques des BAP:

Comme la fluidité et la facilité de mise en œuvre de béton autoplaçant jouent un rôle essentiel dans ses propriétés rhéologiques, on a étudié l'influence du dosage en fibres de verre et la longueur de ces derniers sur ces propriétés rhéologiques on a obtenu les résultats suivants :

On observe avec l'augmentation du dosage de fibre de verre des 4 bétons une diminution des propriétés rhéologiques, par contre la longueur des fibres n'influe pas sur ces propriétés.

VI -2-2- Résultats des essais à l'état durci:**VI -2-2-1- La résistance mécanique en compression et traction par flexion:**

Les formulations des bétons étudiés ont été confectionnés en éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10$) cm^3 et prismatiques ($7 \times 7 \times 28$) cm^3

Nous suivons les démarches suivantes :

- ❖ Les éprouvettes ont été conservées à l'eau pendant 28 jours à une température ambiante de $20^\circ C$
- ❖ Passage de tous les éprouvettes à l'étuve jusqu'à la stabilisation de leur masse à une température de $100 \pm 5^\circ C$
- ❖ Exposition des éprouvettes à des températures élevées de $200^\circ C$ $400^\circ C$ et $600^\circ C$ avec une vitesse de montée en température de $10^\circ C/min$ et un maintien en température dans le four à moufle pendant 1heure.

Le procédé expérimental appliqué repose sur un chargement thermique puis mécanique (l'écrasement)

A-Résistance à la compression :

Composition	Eprouvettes	Rc (MPa)				OBS
		Température (C)				
		20	200	400	600	
BAP	1	36.53	28.2	29.5	21.7	à 472C°
	2	34.61	31	31.2	23.3	
	3	33.46	31.56	30.5	éclaté	
	Moy	34.86	30.25	30.40	22.5	
BAP1	1	34.5	31.6	29.4	22.53	à 500C°
	2	33.5	29.15	27.6	23.41	
	3	35.43	29.46	30.5	éclaté	
	Moy	34.47	30.07	29.16	22.97	
BAP2	1	36.5	29.1	26.36	-	à 480 C°
	2	37.48	26.26	23.88	21.50	
	3	35.5	29.30	25.42	-	
	Moy	36.49	28.22	25.22	21.50	
BAP3	1	37	31.21	26.4	20.32	à 355C°
	2	38.27	29.8	28.0	-	
	3	35.33	30.48	éclaté	-	
	Moy	36.86	30.49	27.2	20.32	
BAP4	1	39.31	31.25	28.65	20.7	à 570 C°
	2	37.40	32.4	26.40	éclaté	
	3	39.25	30.15	-	-	
	Moy	38.65	31.26	27.53	20.7	

Tableau VI -2 résultats de résistance compression

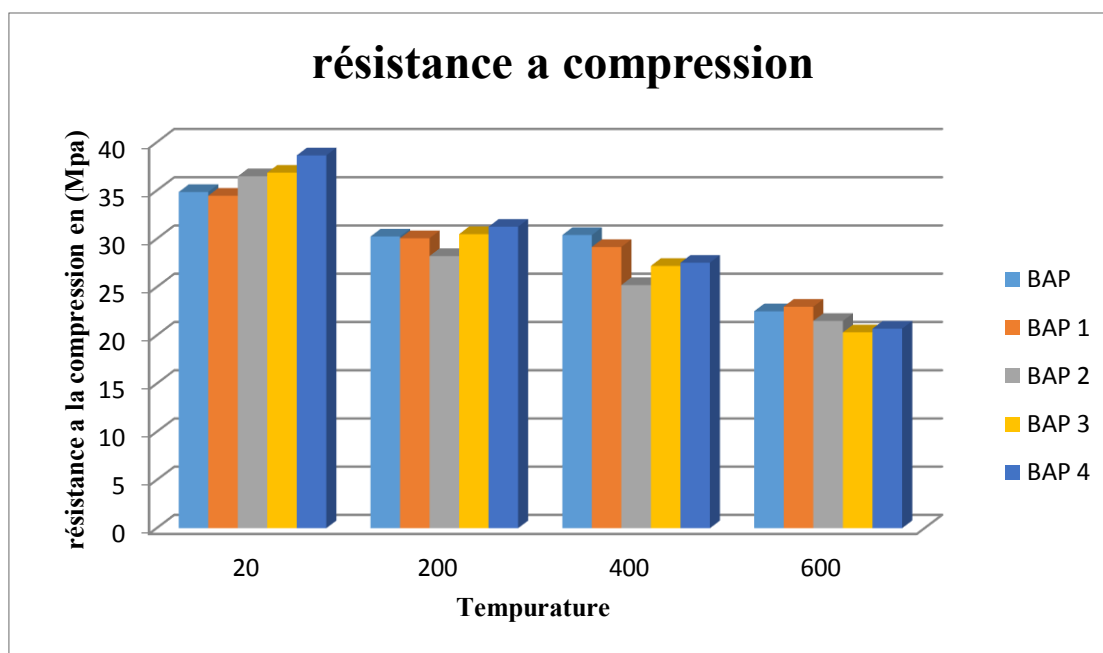


Figure VI -5-la résistance à la compression des différents types de béton en fonction de la température.

La (**Figure-VI-5**) montre qu'il est possible d'obtenir en température ambiante un béton autoplaçant fibré dont la résistance est supérieure à 28 jours est similaire à celle de béton autoplaçant témoin (supérieure à 28 jours aussi) avec le même dosage en ciment et même rapport E/C. c'est-à-dire même résistance mais malheureusement moins de fluidité et facilité de mise en œuvre. Alors l'ajout de fibres de verre au BAP influe négativement sur les caractéristiques rhéologiques des BAP.

En comparant la résistance à la compression des BAP on voit clairement que la résistance de BAP2 est supérieure à la résistance de BAP1 et la résistance de BAP4 est supérieure à la résistance de BAP3 tout ça est lié au dosage en fibre et l'exposition dans la température. On peut alors dire que l'augmentation de dosage en fibre de verre augmente la résistance à la compression même avec l'augmentation de la température.

Le comportement des BAP fibré exposés aux hautes températures diffère de celui du BAP témoin. Pour ce dernier, on observe une décroissance monotone de la résistance en compression. Cette décroissance est tout d'abord modérée puis s'accélère à partir de 300°C. En revanche, pour les BAP, après une diminution modérée de résistance entre 20 et 200°C, on observe une augmentation importante de la résistance en compression vers 200 °C. Au-delà de 300°C, on observe une diminution importante de la résistance en compression relative pour tous les bétons. A 600°C, les valeurs de résistance sont faibles.

La baisse de la résistance entre 20 et 200°C a déjà été observée sur le BAP sans fibres et sur les bétons ordinaires, cette baisse correspond à une réduction des forces de cohésion entre les couches de C-S-H, ces forces de liaison sont plus faibles.

Le gain de résistance entre 200 et 300°C peut être expliqué par une hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire due à la migration de l'eau déliée dans les pores.

Au-delà de 400°C, tous les bétons testés présentent une baisse de résistance importante due aux quantités importantes de microfissures. A 600°C, la baisse de résistance est due à une dégradation couplée de la matrice cimentaire et à une désagrégation des granulats causant une fissuration importante.

Pour les éclatements observés on peut dire que les BAP présentent des risques d'instabilité thermique sans ou avec les fibres.

B - Résistance à la traction:

Température (°C) Composition	Rt(MPa)			
	20	200	400	600
BAP	4.6	4.36	4.1	3.05
BAP1	4.9	4.4	4.3	3.8
BAP2	6.2	5.1	4.3	4
BAP3	5.44	5.1	4.7	3.6
BAP4	5.9	5.3	4.9	3.5

Tableau VI -3-Résultats de la résistance à la traction.

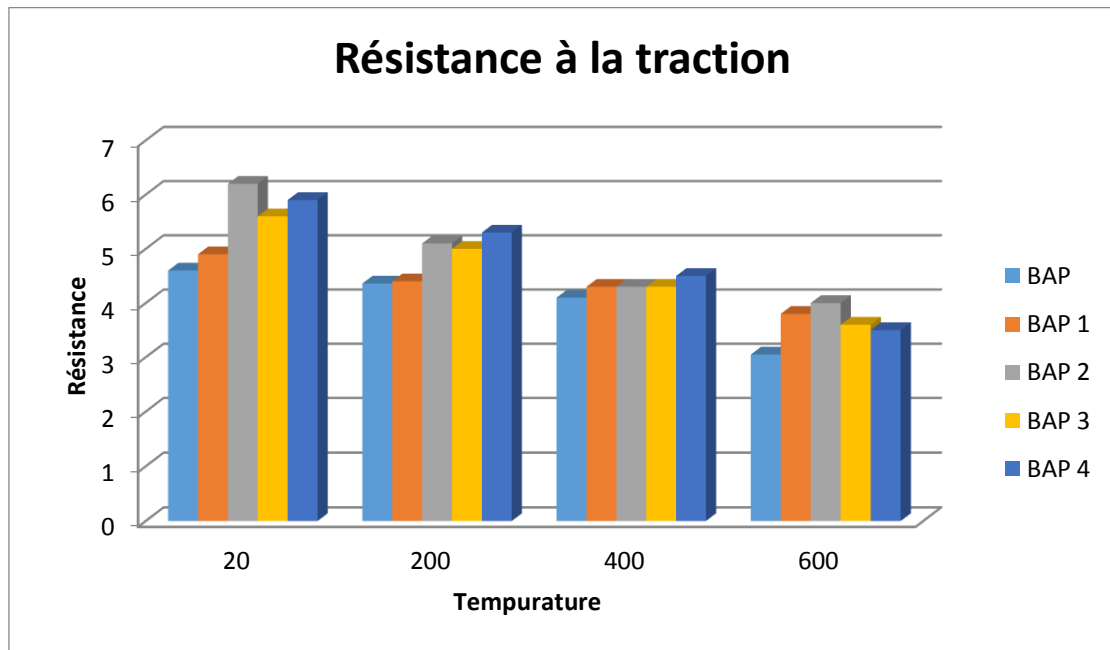


Figure VI-6-la résistance à la traction en fonction de température.

Commentaire :

La (Figure-VI-6) Présente la variation de la résistance à la traction en fonction de la température. Les résistances à la traction des bétons testés diminuent de manière continue avec l'élévation de la température. Nous pouvons conclure que l'évolution de la résistance à la traction avec la température est la même pour tous les bétons étudiés.

Contrairement aux résistances à la compression, on observe une diminution des résistances à la traction des BAP testés. Ceci est expliqué par l'apparition de fissures.

Et comme nous le savons le degré de fissuration a une influence plus importante sur la résistance en traction qu'en compression, et une fois la fissuration commence la dégradation de BAP (en côté résistance à la traction) se développe et continue jusqu'à la ruine.

L'ajout des fibres au béton autoplaçant influe sur sa résistance soit à la compression ou à la flexion.

D'après les résultats inscrits dans le tableau ci-dessus on remarque que l'ajout des fibres de verre amélioré la résistance pour le dosage 0.15% L'ajout de fibres au béton influe positivement sur sa résistance à la flexion et compression où nous remarquons d'après les résultats obtenus que les fibres de verre améliorent la résistance pour les fibres longues et pour les fibres courtes.

VI -2-2-2 La porosité:

La mesure de la porosité à l'eau est un paramètre important qui permet de caractériser le réseau poreux des bétons testés.

Compositio n	Porosité(%)			
	Température (°C)			
	20	200	400	600
BAP	14.83	15.25	19.19	20.51
BAP1	10.23	15.32	18.42	22.8
BAP2	8.25	10.45	17.32	23.4
BAP3	6.35	14.21	17.7	23.6
BAP4	8.43	16.52	20.15	25.31

Tableau VI-4-Résultats de la porosité

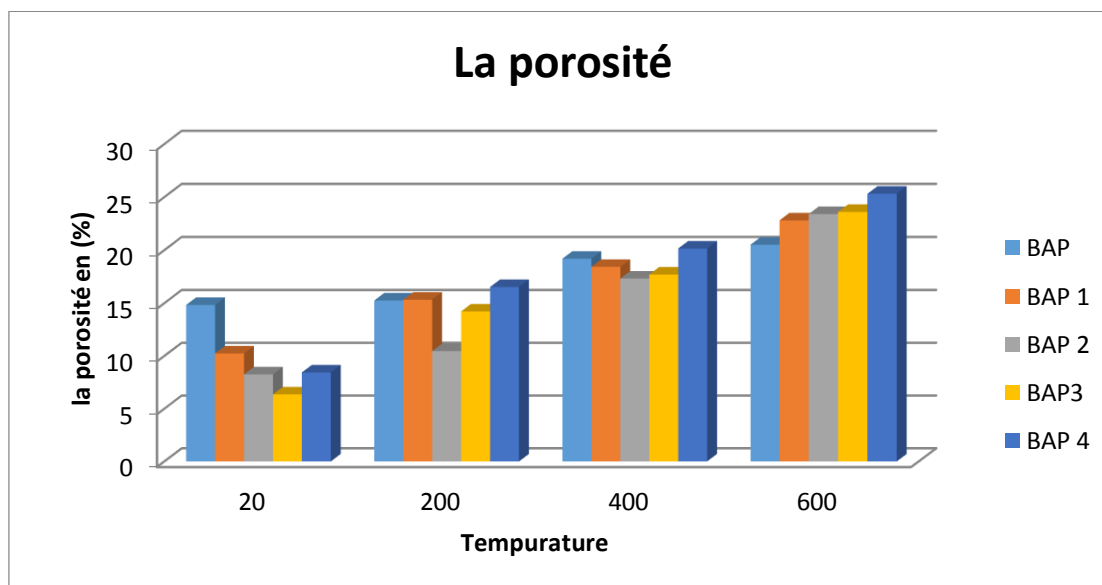


Figure VI -7-La porosité des différents bétons en fonction de température

Commentaire :

A partir des résultats obtenus on observe que les bétons autoplaçant à 20 °C (la température ambiante) présentent une faible porosité. Cela est dû à la forte homogénéité et reproductibilité des BAP.

On observe pour tous les bétons une augmentation monotone de la porosité avec la température. On peut expliquer sa par le départ de l'eau adsorbée des pores. Et pour les BAP fibrés ce phénomène est attribué d'une part à l'augmentation de la porosité des bétons due au changement de la forme des fibres de verre et d'autre part par la création possible de fissures autour des fibres, permettant de créer un réseau connecté.

VI -2-2-3-la perte de masse:

	Cubique					Prismatique		
	T°	E p v	M(Kg) avant exposition de four	M(Kg) après exposition de four	Perte de masse (%)	M(Kg) avant exposition de four	M(Kg) après exposition de four	Perte de masse (%)
B A P	200°	1	2.367	2.342	1.06	3.263	3.207	1.71
		2	2.305	2.248	2.47	3.296	3.242	1.63
		3	-	-	-	-	-	-
	400°	1	2.356	2.269	3.69	3.248	3.018	7.08
		2	2.365	2.250	4.86	3.331	3.197	4.02
		3	-	-	-	-	-	-
	600°	1	2.467	2.286	7.33	3.342	3.083	7.74
		2	2.465	2.277	7.62	3.434	3.091	9.9
		3	-	-	-	-	-	-

Tableau VI -5-Résultats de perte de masse en béton autoplaçant témoin (BAP)

	Cubique					Prismatique		
	T°	E p v	M(Kg) avant exposition de four	M(Kg) après exposition de four	Perte de masse (%)	M(Kg) avant exposition de four	M(Kg) après exposition de four	Perte de masse (%)
BAP1	200°	1	2.307	2.252	2.38	3.302	3.226	2.3
		2	2.383	2.349	1.42	3.179	3.107	2.1
		3	-	-	-	-	-	-
	400°	1	2.365	2.240	5.28	3.247	3.114	4.1
		2	2.386	2.284	4.27	3.364	3.237	3.77
		3	-	-	-	-	-	-
	600°	1	2.339	2.180	6.79	3.307	3.123	5.99
		2	2.367	2.202	6.97	-	-	-
		3	-	-	-	-	-	-

Tableau VI -6-Résultats de perte de masse en béton autoplaçant (BAP1)

	Cubique					Prismatique		
	T°	E p v	M(Kg) avant exposition de four	M(Kg) après exposition de four	Perte de masse (%)	M(Kg) avant exposition de four	M(Kg) après exposition de four	Perte de masse (%)
BAP2	200°	1	2.274	2.257	0.74	3.233	3.165	2.10
		2	2.329	2.308	0.90	3.294	3.222	2.18
		3	-	-	-	-	-	-
	400°	1	2.313	2.207	4.58	3.281	3.033	7.55
		2	2.378	2.246	5.55	3.249	3.029	6.77
		3	-	-	-	-	-	-
	600°	1	2.374	2.225	6.27	3.345	3.143	6
		2	-	-	-	-	-	-
		3	-	-	-	-	-	-

Tableau VI -7-Résultats de perte de masse en béton autoplaçant (BAP2)

	Cubique					Prismatique		
	T°	E p v	M(Kg) avant exposition de four	M(Kg) après exposition de four	Perte de masse (%)	M(Kg) avant exposition de four	M(Kg) après exposition de four	Perte de masse (%)
BAP3	200°	1	2.327	2.293	1.46	3.226	3.177	1.51
		2	2.331	2.301	1.28	3.368	3.322	1.36
		3	-	-	-	-	-	-
	400°	1	2.343	2.265	3.32	3.325	3.213	3.36
		2	2.396	2.359	1.54	3.296	3.184	3.39
		3	-	-	-	-	-	-
	600°	1	2.337	2.241	4.1	3.287	3.156	3.98
		2	-	-	-	-	-	-
		3	-	-	-	-	-	-

Tableau VI -8-Résultats de perte de masse en béton autoplaçant (BAP3)

	Cubique					Prismatique		
	T°	E p v	M(Kg) avant exposition de four	M(Kg) après exposition de four	Perte de masse (%)	M(Kg) avant exposition de four	M(Kg) après exposition de four	Perte de masse (%)
BAP4	200°	1	2.327	2.285	1.80	3.278	3.221	1.73
		2	2.279	2.206	3.2	3.265	3.203	1.89
		3	-	-	-	-	-	-
	400°	1	2.346	2.256	3.83	3.366	3.281	2.52
		2	2.351	2.284	2.84	3.345	3.263	2.45
		3	-	-	-	-	-	-
	600°	1	2.326	2.215	4.77	3.315	3.197	3.55
		2	-	-	-	-	-	-
		3	-	-	-	-	-	-

Tableau VI -9-Résultats de perte de masse en béton autoplaçant (BAP4)

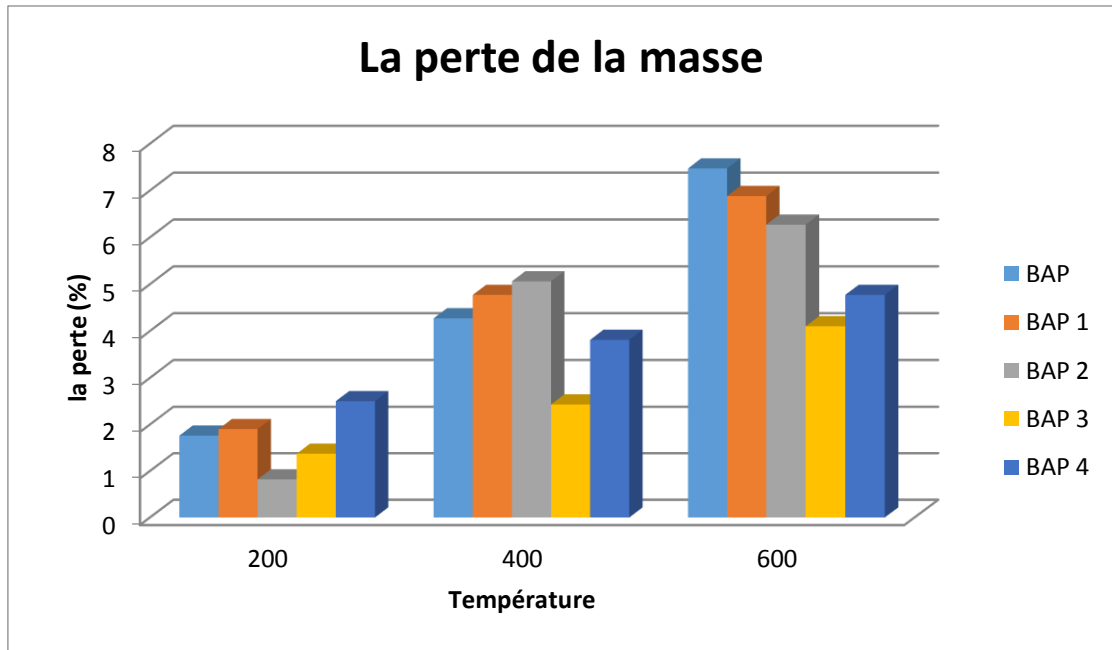


Figure VI -8-La perte de la masse pour les éprouvettes cubiques

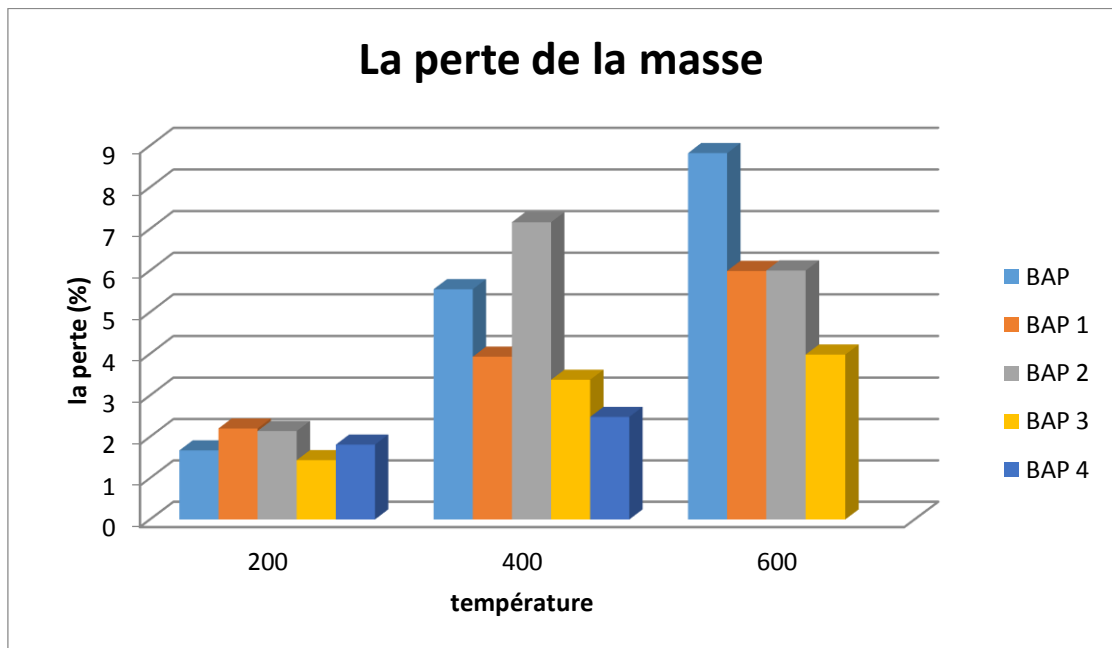


Figure VI -9-La perte de la masse pour les éprouvettes prismatiques.

Commentaire:

On observe pour tous les bétons une augmentation de la perte de masse avec la température quel que soit le type de béton, le dosage en fibre et les dimensions de fibre.

On constate des (Tableaux de VI-5 à VI-9) que la perte de masse n'est pas influé par la forme et les dimensions des éprouvettes.

On remarque une augmentation des quatre BAP, BAP1, BAP2, BAP3 jusqu'à dernier(BAP4) par contre à 600°C on observe une différence de perte de masse entre BAP tel que le BAP4.

On observe que les BAP ont de faible perte de masse on explique sa par le départ de l'eau durant le chauffage (à l'étuve et au four) et à l'augmentation de porosité.

VI-2-2-4-Les essais non destructifs :

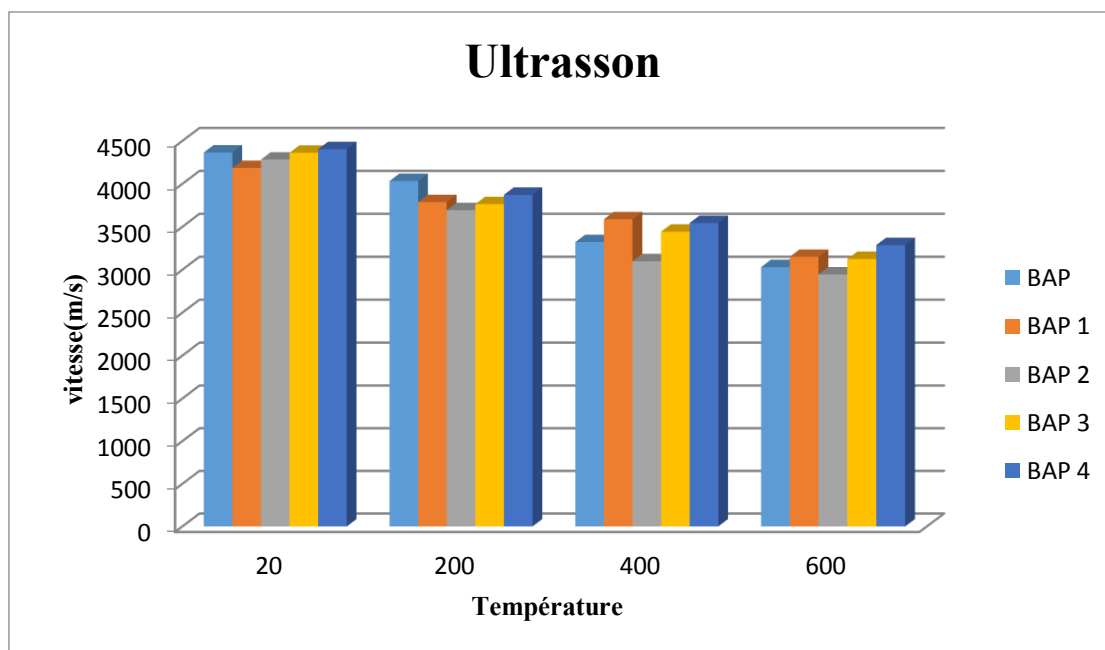


Figure VI-10-La vitesse des différents bétons en fonction de la température.

Commentaire :

La vitesse de son dans le béton diminue avec l'augmentation de la température, mais augmente avec l'augmentation de dosage en fibre de verre et avec l'augmentation de la température.

L'augmentation de vitesse de son dans le cas des températures ambiantes est attribué au fait que les impulsions ultrasoniques voyagent par les pores remplis par l'eau et pas tout autour des bords de pore comme elles font dans un état sec. En conséquence le chemin de voyage diminue et la vitesse du son augmente.

Nous concluons que l'estimation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son représente une certaine fiabilité du moment qu'il reflète la réalité du comportement de béton suivant l'exposition au température, le dosage en fibres des échantillons utilisés.

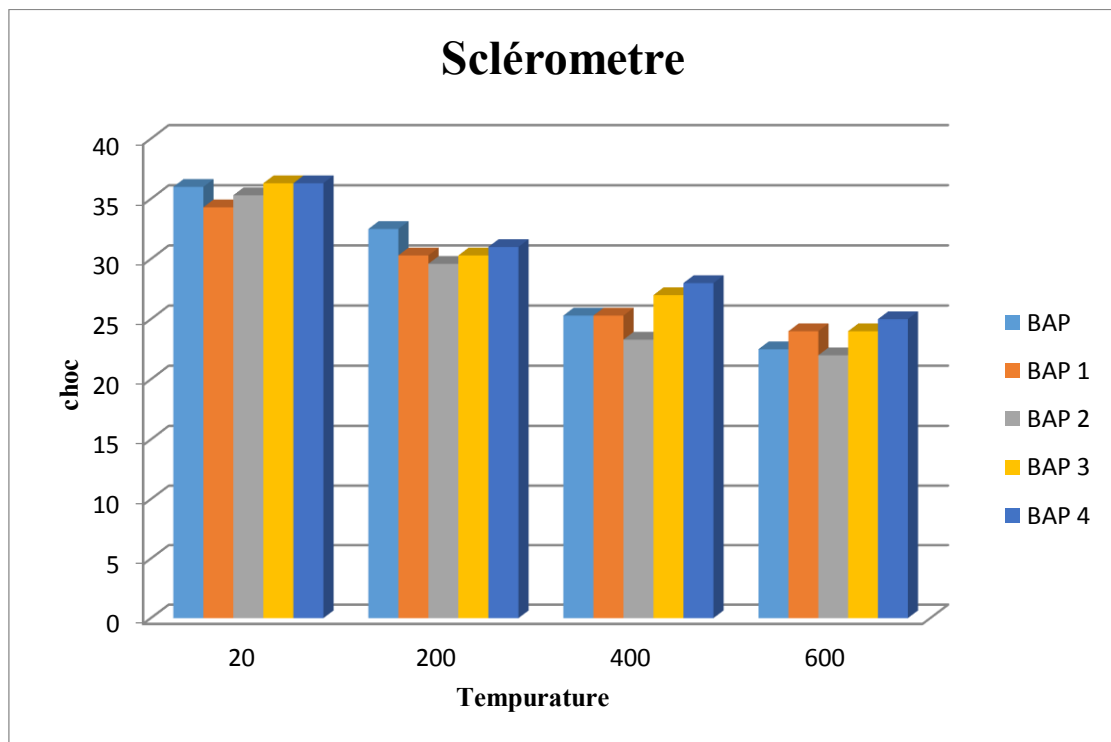


Figure VI-11-L'indice des différents bétons en fonction de la température.

L'indice sclérométrique augmente avec l'augmentation de l'âge du béton, le diamètre maximum de l'agrégat et le type de ciment mais diminue avec l'augmentation du rapport d'eau-ciment.

L'indice sclérométrique du béton diminue avec l'augmentation de la température, mais augmente avec l'augmentation de dosage en fibre de verre même avec l'augmentation de la température.

Nous concluons que l'estimation de la résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique représente une certaine fiabilité du moment qu'il reflète la réalité du comportement de béton suivant l'exposition au température, le dosage en fibres des échantillons utilisés.

VI -2-3- Etude de corrélation :

VI -2-3-1- la corrélation (Rc) en fonction de (V) :

1/ la corrélation (Rc) en fonction de (V) de (BAP T) :

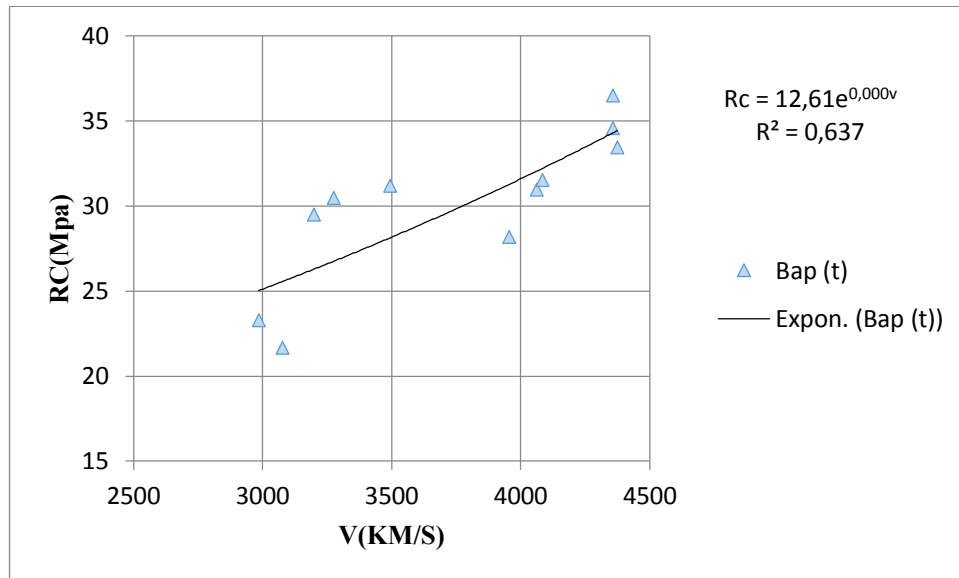


Figure - VI -12- La résistance à la compression en fonction de la vitesse d'ultrason de béton BAP Témoin.

On remarque d'après la (Figure - VI -12) une large dispersion pour le béton BAP (T), ce qui est justifié par un faible coefficient de corrélation $R^2 = 0.637$

La corrélation obtenue de type non linéaire (Expon).

La formule obtenue prend la forme :

$$\text{BAP (T): } R_c = 12.61 e^{0.000v} \quad R^2 = 0.667$$

2/ la corrélation (Rc) en fonction de (V) de (BAP 1) et (BAP 2):

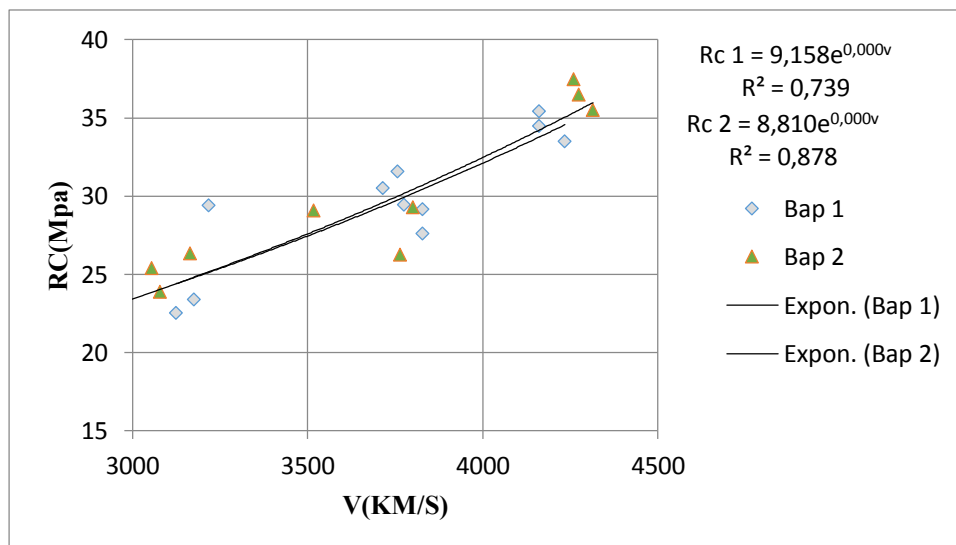


Figure VI-13 - La résistance à la compression en fonction de la vitesse d'ultrason des bétons BAP 1 et BAP 2.

On remarque d'après la (Figure-VI-13) une dispersion acceptable pour les bétons (BAP1 et BAP2) avec des coefficients de corrélation $R^2 = 0.739$, $R^2 = 0.878$ respectivement.

Les corrélations obtenues sont de type non linéaire (EXPON)

Les formules obtenues prennent la forme :

$$(BAP1): Rc1 = 9.158 e^{0.000v}$$

$$R^2 = 0.739$$

$$(BAP 2): Rc2 = 8.81 e^{0.000v}$$

$$R^2 = 0.878$$

3/ la corrélation (Rc) en fonction de (V) de (BAP 3) et (BAP 4):

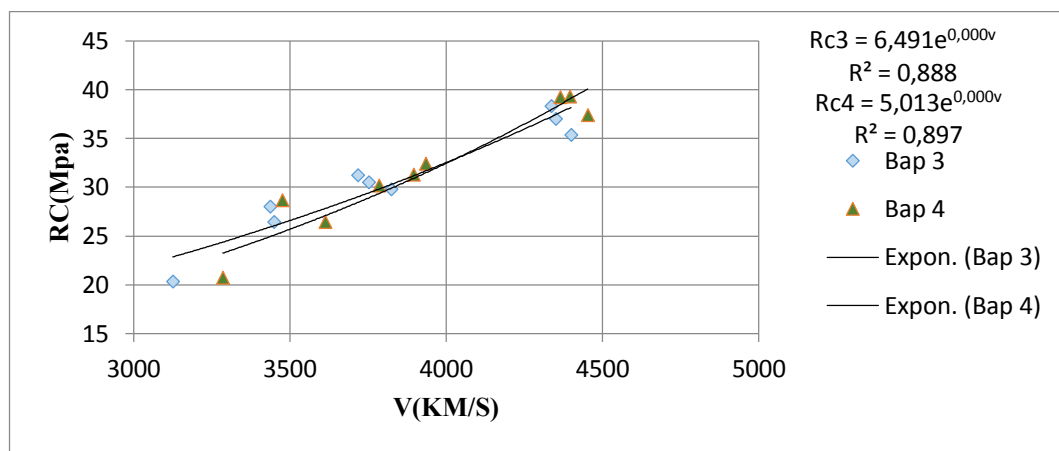


Figure - VI -14- La résistance à la compression en fonction de la vitesse d'ultrason des bétons BAP 3 et BAP 4.

On remarque d'après la (Figure -VI -14-) une dispersion acceptable pour les bétons (BAP 3 et BAP 4) avec des coefficients de corrélation $R^2 = 0.888$, $R^2 = 0.897$ respectivement.

Les corrélations obtenues sont de type non linéaire (Expon).

Les formules obtenues prennent la forme :

$$(BAP3) : Rc3 = 6.491 e^{0.000v}$$

$$R^2 = 0.888$$

$$(BAP4): Rc4 = 5.013 e^{0.000v}$$

$$R^2 = 0.897$$

VI -2-3-2-la corrélation (Rc) en fonction de (Is) :

1/ la corrélation (Rc) en fonction de (Is) de (BAP T) :

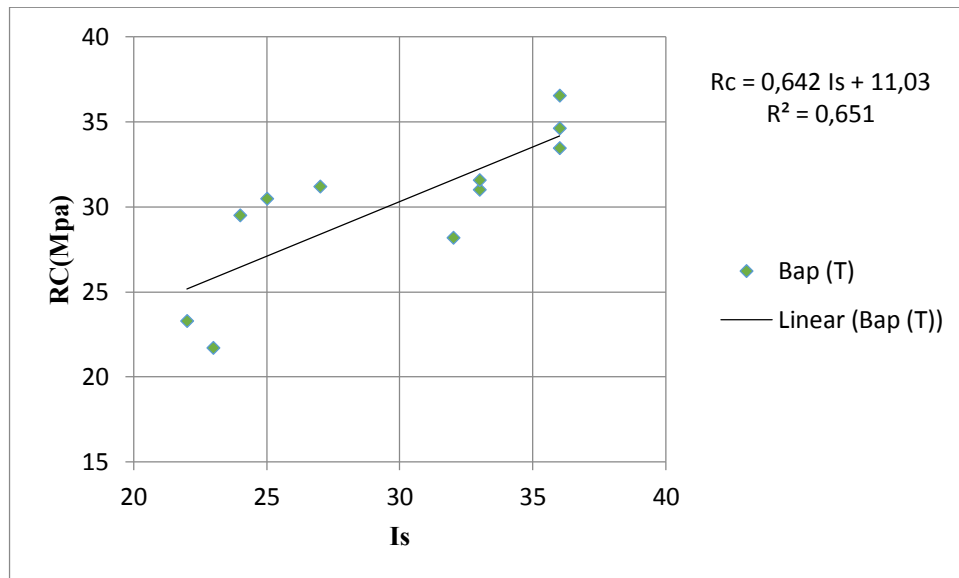


Figure VI -15- Résistance à la compression (Rc) en fonction de l'indice sclérometrique (Is) de BAP Témoin.

D'après la (Figure VI-15) on remarque de larges dispersions pour BAP (T) en fonction de l'indice sclérometrique, le coefficient de corrélation : $R^2 = 0.651$

La corrélation obtenue de type linéaire.

La formule obtenue prend la forme :

BAP (T): $Rc=0.642 Is+11.03$

$R^2 =0.651$

2/ la corrélation (Rc) en fonction de (Is) de (BAP 1) et (BAP 2):

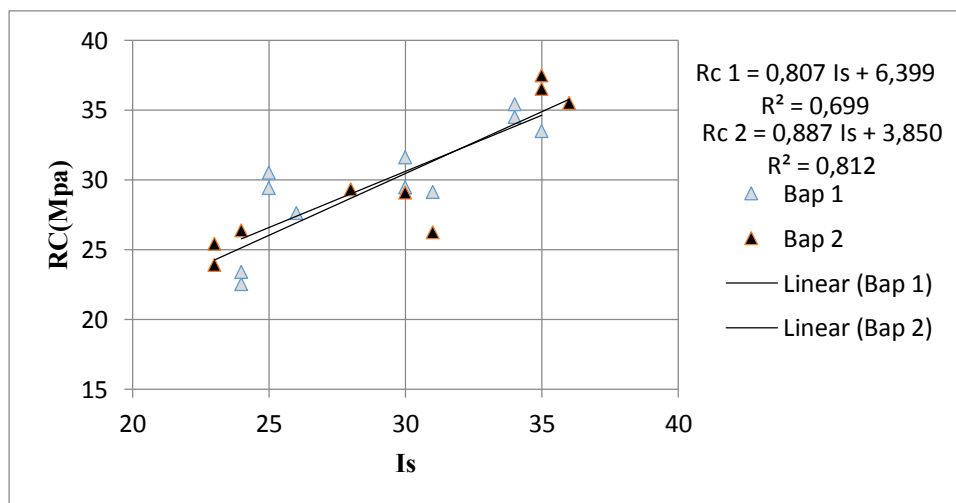


Figure VI -16- Résistance à la compression (Rc) en fonction de l'indice sclérometrique (Is) des bétons BAP 1 et BAP 2.

On remarque selon la (Figure VI-16) une large dispersion pour les bétons (BAP 1) $R^2 = 0.699$ et une dispersion acceptable est constaté pour le béton (BAP 2) avec $R^2 = 0.812$

Les corrélations obtenues sont de type linéaire.

Les formules sont les suivantes :

$$(BAP1): R_{c1} = 0.807 I_s + 6.399$$

$$R^2 = 0.699$$

$$(BAP 2): R_{c2} = 0.887 I_s + 3.850$$

$$R^2 = 0.812$$

3/ la corrélation (R_c) en fonction de (I_s) de (BAP 3) et (BAP 4):

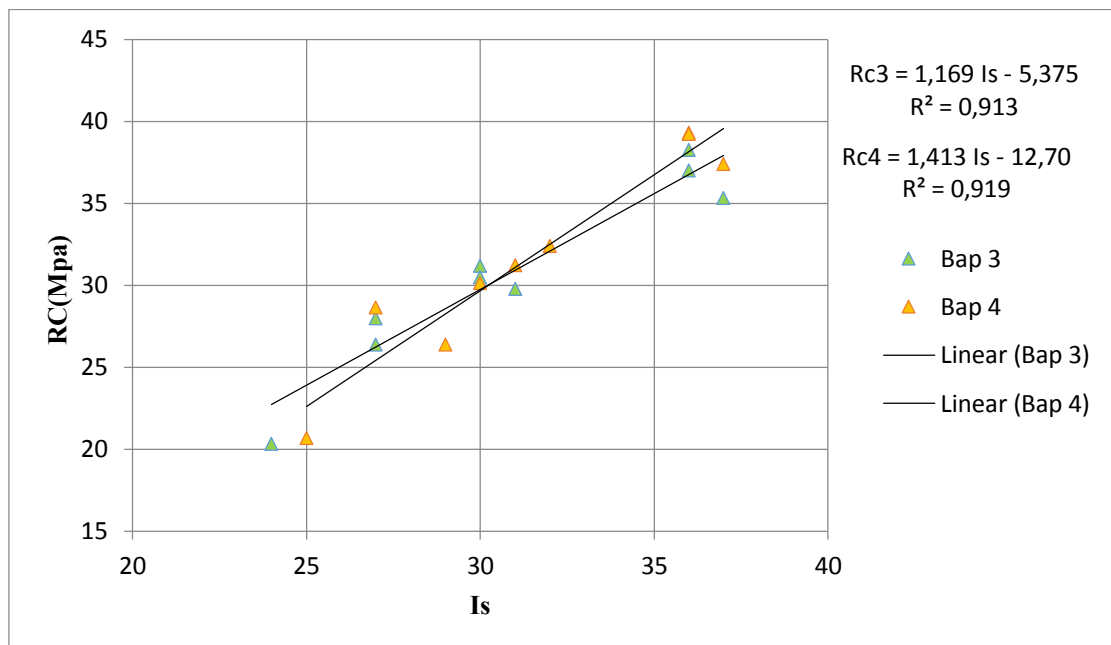


Figure VI - 17- Résistance à la compression (R_c) en fonction de l'indice sclérometrique (I_s) des bétons BAP 3 et BAP 4.

D'après la (Figure VI -17-) on remarque une dispersion acceptable est constaté pour les deux types du bétons (BAP 3) et (BAP 4) en fonction de l'indice sclérometrique, les coefficients de corrélation sont de l'ordre : $R^2 = 0.913$, $R^2 = 0.919$ pour le béton (BAP 3) et (BAP 4), respectivement.

Les deux corrélations constatées sont de type linéaire sous la forme :

$$(BAP3) : R_{c3} = 1.169 I_s - 5.375 \quad R^2 = 0.913$$

$$(BAP4) : R_{c4} = 1.413 I_s - 12.70 \quad R^2 = 0.919$$

Conclusion générale

Conclusion générale :

Les bétons autoplaçants (BAP) constituent une nouvelle avancée pour la construction en béton et ils offrent en cela des avantages aussi bien d'ordre économique, technique que sociaux. L'absence de vibration qui caractérise leur mise en place permet en effet de réduire le coût, de construire des éléments à géométrie complexe ou fortement ferrillés et également de constituer une véritable alternative aux bétons traditionnels. Cependant, leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière, les BAP demeurent en dessous de l'utilisation qui pourrait en être faite en raison de questions sans réponses posées par de nombreux industriels et maîtres d'ouvrage. Certaines des inconnues qui les concernent nécessitent donc d'apporter des résultats de recherches probantes, notamment en terme de rhéologie et de durabilité.

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

L'objectif de ce travail était évaluation de la qualité des bétons autoplaçant (BAP) fibré exposés à haute température aux moyens d'essais non-destructifs (NDT) et essai direct

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

Nous recommandons d'utiliser une formulation du béton autoplaçant avec $E/C=0.5$ et dosage en ciment 400 kg/m^3 pour avoir une grande fluidité et une bonne stabilité et deux pourcentage des fibres (0.1% et 0.15%) de volume de mélange.

La composition des bétons auto plaçant donne une grande fluidité sans ségrégation et sans ressuage qui constituent d'ailleurs leurs spécificités.

L'étude du béton auto plaçant à l'état frais basée sur les essais d'étalement, la boîte en L et l'essai de stabilité au tamis, donne des résultats qui correspondent aux critères des recommandations en vigueur.

Les étalements des bétons autoplaçants testés sont supérieurs à 53 cm, le taux de remplissage de la boîte en L est de l'ordre 80 %, la laitance est inférieure de 15 % selon le critère d'acceptabilité, la stabilité au tamis est considérée comme satisfaisante.

Conclusion générale

La caractérisation du béton auto plaçant à l'état durci est basée sur les résistances à la compression et à la traction par comparaison avec celles du BAP témoin.

Pour tous les bétons la porosité présente une augmentation monotone avec la température.

Les corrélations obtenues pour R_c en fonction de (V) sont acceptables et de type non linéaire (exponentielles).

Les corrélations obtenues pour R_c en fonction de (I_s) sont acceptables et de type linéaire.

Les résultats obtenus par les essais non destructifs de scléromètre et l'ultrason restent approximatifs par rapport à ceux des essais d'écrasement dans le cas de la détermination de la réponse mécanique des bétons BAP ou des coefficients de correction sont nécessaires afin d'aboutir à une bonne évaluation de la résistance

Référence

Référence bibliographique.

- [1]- Guillaume Camps, Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un Elément de Stockage en Béton, Thèse Doctorat de l'université de Toulouse soutenue le 10 Septembre 2008.
- [2]- Rossi .P, Les Bétons de Fibres Métalliques, Ponts et Chaussées, Paris, 309p. . (1998)
- [3]- P.K .MEHTA (1986) « concret , structures , properties ,and materials « ,prentice –Hall Inc.,Englewood Cliffs , New Jersey,1986,450 p.
- [4]- E.N.ANTOINE(1985), « fibre reinforced for concret » , concret international design and construction , Vol 7, N° 3, March 1985,pp.21-25.
- [5] -ACI COMMITTEE (1984),« state of the art report on fibre reinforced concrete », journal American . concrete Institute.March- April 1984,pp.140-146.
- [6]- H.F.PORTER, « préparation of concrete from selection of materials to final disposition ». Journal American Concrete . Institute .VOL 6 , 1910,296p.
- [7] -D.R. LANKARD & H.D. SHEETS (1971) ; « use of steel wire fibre in refractory castables ». Am.ser. soc. , vol 63, No .7,1971.
- [8]-COLLECTION TECHNIQUE CIM-BÉTON, « Les bétons :formulation, fabrication et mise en oeuvre » chapitre 3 ; Tome II., Ecole Française du Béton,pp : 96-109.
- [9]- Youcef Fritih, Apport d'un renfort de Fibres sur le comportement d'éléments en Béton autoplaçant armé Thèse de Doctorat de L'université de Toulouse ,08 Juillet 2009
- [10]- Rossi P., Formulation et comportement Mécanique des Bétons de Fibres Métalliques,Annales de L'itbtp, N° 492, Série Béton 279, 1991, pp.90-107, (1991)
- [11]- Rachid Berbaoui, (Identification et Analyse de l'endommagement par Fatigue des Matériaux Granulaires a Base Polymère), Thèse de Doctorat de l'université du Maine Soutenue le 21 Janvier 2010
- [12]- Bernard O., 2000. "Comportement à long terme des éléments de structure formés de bétons d'âges différents." Thèse de Doctorat, EPFL, Lausanne, Suisse
- [13]- Löfgren I., -Fibre-reinforced Concrète for Industriel Construction - à fracture mechanics approach to matériel testing and structural analysis, PhD-thesis, Department ofCivil and Environmental Engineering Structural Engineering, Chalmers University of Niversity of Thchnology Göteborg, Sweden,(2005)
- [14]- Boukni Bariza, tenue au Feu des Bétons Autoplaçants, Mémoire de Magister Université Mentouri Constantine, Décembre 2007

Référence

- [15]- M.Bentalha. «Influence de l'introduction de Fibres Métalliques sur le Comportement Différé d'une Matrice Cimentaire. Caractérisation - Comportement monotone -Microstructure». Thèse de Doctorat d'état, Université Mentouri-Constantine, Octobre,2007.
- [16]- Sugamata .T, Umezawa .K, and. Okazawa.S, study of particle dispersingretention effect of Polycarboxylate-based Superplasticizers, Transactions of NMB Central Research Laboratories, Japan, Vol. 13 :7{14, 2000.
- [17]- Chemrouk, M .Tahenni, T et Boulekbeche.B, «Béton renforcé en Fibres : un Matériau aux avantages multiples». 1ère Conférence Internationale sur les Energies, Matériaux et Environnement Cieme'09 Centre Universitaire de Khemis Miliana, 22 et 23 Novembre 2009
- [18]-TABET Nesrine , « Contribution a l'étude de l'influence de la nature et des dimention des fibres sur le comportement physico-mecanique des béton autoplaçantfibres (BAPF) », Mémoire de Magister de l'UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2011/2012.
- [19]- Haddadou Naima, « Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant fibré avec ajout de poudre de marbre » , Thèse de Doctorat de l' UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES,2014/2015.
- [20]- Grunewald S., Walraven J.C., «Parameter-study on the influence of steel Fibers and coarse Aggregate content on the fresh properties of self-compacting Concrete», Cement and Concrete Research vol.31, pp. 1793-1798,2001.
- [21]- Chanvillard G. Analyse Expérimentale et modélisation Micromécanique du comportement des Fibres d'acier tréfilées, ancrées dans une Matrice Cimentaire. Etudes et Recherches des LPC, Série Ouvrages d'art, OA12. (1993)
- [22]-OKAMURA H, OUCHI M., "Self-compacting concrete. Development present use and future", First International RILEM symposium on self-compacting concrete. Rilem Publication s.a.r.l, 3-14, 1999.
- [23]- Khayat K., «Les bétons autonivelants, Les bétons, bases et données pour leur formulation », p 479-483, Eyrolles, 1997.
- [24]- PC. Aitcin, S. Jiang, BG. Kim, PC. Nkinamubanzi, and N. Pétrov. L'interaction ciment : superplastiant. cas des polysulfonates. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Vol. 233 :87-98, Juillet-Aout 2002.
- [25]- Association Française de Génie Civil «AFGC», Bétons autoplaçants – Recommandations provisoires, Juillet 2002, 63 pages.
- [26]-Hanaa Fares. Thèse de doctorat en Génie Civil «Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée»,Ecole Doctorale

Référence

Sciences et Ingénierie Université de Cergy-Pontoise, le 07 Décembre 2009

[27]-Turcry P., Thèse de doctorat en Génie Civil, « Retrait et fissuration des bétons autoplçants –Influence de la formulation », Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, le 3 février 2004,

[28]- Josserand L, Thèse de doctorat en Structures et Matériau, «Ressuage des bétons hydrauliques », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, le 11 octobre 2002.

[29]- NF P 18-406 relative aux essais de compression des bétons.

[30]-Hanaa Fares. Thèse de doctorat en Génie Civil «Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplçants exposés à une température élevée»

[31]-HanaaFares. Thèse de doctorat en Génie Civil «Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplçants exposés à une température élevée»,Ecole Doctorale

[32]- Mme BENAKLI SARAH. Mémoire de Magistère en Génie Civil « Caractérisation expérimentale des bétons autoplçants obtenus par ajout des déchets de construction »

[33]- BOUDINA Ridha et LOURADI AbdElouahab,2012 « 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 Bordj Bou Arreridj.

[34]- F.Gabrysak, *sino dato* « Les bétons : Chapitre 04 », Ecole polytechnique fédérale de LAUSANE, institut des matériaux.

[35]- « Mesure de dureté de surface par rebondissement à l'aide d'un scléromètre », P18, 417, 1989

[36]- BELARIBI.W, 2007 « Evaluation de la qualité du béton de fibre par les essais non destructifs (méthode combinée ultrasons et scléromètre) » Thèse de Magistère, Biskra.

[37]-JEAN FESTA – GEARGES DREUX, 2007 : « Nouveau guide des bétons », livre, Huitième édition 1998, Troisième tirage.

[38]- DEGHEFEL MOUSSA, 2010« Application de l'essai de dureté pour la caractérisation du béton »,Mémoire de Magistère, Université de M'SILA.

[39]-Ajdukiewicz A, Kliszczewicz Alina «Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/I-WC. Cement Concrete Composites » 2002; 24:269-79.

[40]- TOUKAL Abd Ennour,2010 « influence du taux de chargement sur la caractérisation non destructif du béton par ultrason » Mémoire de Master, Université de M'hamed BOUGARA de BOUMERDACE.

Référence

[41]- C.N.E.R.I.B, 2004 « Cycle de formation 2004 ».

[42]- BENCHERAI Said,2007 « Étude des techniques de renforcement des structures en béton arme contreventées par portiques auto stables »Mémoire de Master, Université Abd Errahmane MIRA de Béjaia.

[43]- CHEKROUNMathieu,2008 «Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface»Thèse de Doctorat,École Centrale de Nantes.

[44]- BREYSSE.D et ABRAHAM.O,2005 « Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en bétons » Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

[45]- J.S. Popovics, *sino dato* « Determination of elastic constants of a concrete specimen using transient elastic waves» Thèse de Doctorat, sino loco.

[46]- «Auscultation sonique: Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton»P18-418 ,1989.

Résumé:

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton capable, sous l'unique effet de la pesanteur, de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et particulièrement encombrés sans nécessiter pour tout autant des moyens de vibration.

L'utilisation de la fibre de verre dans la composition du béton autoplaçant (BAP) est un travail qui vise d'une part la sauvegarde de l'environnement en réutilisant les déchets et d'autre part la valorisation des matériaux locaux dans le domaine de la construction, de ce fait, la fibre de verre a été introduite dans la composition des BAP suivant deux teneurs 0.1%, 0.15%.

Les matériaux testés sont 5 bétons de résistance courante dont 4 BAP avec fibres et un BAP témoin. Après exposition à des cycles de températures 200, 400 et 600°C des essais mécaniques (résistance à la compression, à la traction par flexion) et les essais non destructifs ont été réalisés. Parallèlement à cela, la détermination de la porosité à l'eau, et la perte de masse.

Les résultats expérimentaux montrent des comportements significatifs entre les BAP avec fibre et BAP témoin. Les essais de résistance à la compression ont permis de distinguer un gain de résistance entre 200 et 400 °C. Ce gain est expliqué par une réhydratation de la matrice cimentaire due à la migration de l'eau à travers les pores pour les BAP.

L'utilisation des méthodes non destructives a permis d'obtenir une corrélation acceptable pour la détermination la résistance du béton in situ déterminé par le scléromètre et des méthodes ultrasoniques de vitesse d'impulsion.

Les méthodes non destructives donnent des résultats fiables. Mais sans connaître les matériaux qui constituent le béton ces résultats restent estimative

Mots-clés: Béton autoplaçant, Haute température, Propriétés mécaniques, méthode non destructif, fibre de verre.

Abstract:

The self compacting concrete (SCC) is a capable concrete, under the unique effect of the weight, to get in place in the framings even most complex and particularly cluttered without requiring for everything as many the vibration means.

The use of the fiber glass in the composition of the self compacting concrete (SCC) is a work that aims the safeguard of the environment on the one hand while reusing the garbage and on the other hand the valorization of the local materials in the domain of the construction, of this fact, the fiber glass has been introduced in the composition of the SCC following tow contents 0.1%, 0.15%.

The tested materials are five concretes of actual resistance which four SCC and WC (Witness concrete), after exposure of temperature cycles 200°C, 400°C and 600°C degrees of mechanical tests (resistance-compression, traction with flexing) and methode non destructif were made, in parallel to this, the water porosity determination, and the mass loss.

The experimental results proves that the significant behavior between the SCC and WC, the resistance-compression tests allows to distinguish a resistance gain inside the radius of 200 and 400°C, this gain is explained through the rehydration of the cement matrix due to the water migration through the pores for the SCC

The use of nondestructive methods allowed to obtain a correlation acceptable for the determination of the concrete strength determined in situ by the Schmidt hammer and the Ultrasonic Pulse Velocity. The nondestructive method gives reliable results. But without knowing materials which constituent the concrete these results remain qualitative and non quantitative.

Key words: self compacting concrete, fiber glass, mechanical tests, method nondestructive.

ملخص:

الخرسانة ذاتية الرص (دمك) هي خرسانة قادرة على التوضع تحت تأثير وحيد هو الجاذبية، يمكن تنفيذها حتى في الأشكال الأكثر تعقيدا وازدحاما على وجه الخصوص دون الحاجة إلى الكثير من وسائل الاهتزاز.

استخدام الألياف الزجاجية في تكوين الخرسانة الصب هو العمل الذي يهدف على حد سواء للحفاظ على البيئة من خلال إعادة استخدام النفايات وثانيا استخدام المواد المحلية في مجال البناء.

لذلك، تم إدخال الألياف الزجاجية في تكوين الخرسانة بالمستويات التالية 0.1%، 0.15%. هذه الدراسة التجريبية في هذا السياق، وتعمل أساسا على دراسة تأثير دمج الألياف الزجاجية على خصائص الخرسانة في الحالة السائلة و الصلبة. المواد المختبرة هي 5 خلطات خرسانية، 4 خرسانة ذاتية الرص مليفه و 1 خرسانة ذاتية الرص كشاهد. بعد التعرض لدرجة حرارة 200°، 400° و 600° درجة مئوية تم القيام بالاختبارات الميكانيكية (قوة ضغط وقوة الشد) و الطرق اللاتحطيمية، إضافة إلى تحديد المسامية للمياه، وفقدان الكتلة.

تظهر النتائج التجريبية فروق ذات دلالة إحصائية بين الخرسانة ذاتية الرص المليفه وسلوك الخرسانة ذاتية الرص كشاهد دون الياف. اختبارات المقاومة للضغط تبين إمكانية اكتساب الخرسانة ذاتية الرص للمقاومة بين 200° و 400° درجة مئوية. هذا الاكتساب يمكن أن يفسر بإمالة المصفوفة الإسمنتية بسبب خروج المياه من خلال مسامات الخرسانة ذاتية الرص .

استعمال الطرق اللاتحطيمية سمح لنا بإيجاد علاقة مرضية في تحديد المقاومة الميكانيكية للخرسانة في الموقع باستعمال سرعة انتشار الصوت ورقم الارتداد. بهذا يمكن القول أن الطرق اللاتحطيمية يفترض أن تعطي نتائج فعالة لكن بدون معرفة المواد المكونة للخلطة الخرسانية تبقى هذه النتائج تقديرية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ذاتية الرص، الحرارة العالية، الخواص الميكانيكية، الألياف الزجاجية، الطرق اللاتحطيمية.