

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Des Matériaux

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme Master

Spécialité : Génie de matériaux

Option : science des matériaux pour construction durable.

THEME

**Contribution à l'amélioration des résistances mécaniques a jeune
âge des bétons autoplaçants destinés aux éléments préfabriqués**

Réalisé Par :

TOUATI Abelhakim

BOUZID Mohamed Anis

Devant le jury :

Sujet Proposé et suivi par :

Dr. GHERNOUTI Youcef

Remerciement

Ce mémoire marque une étape très importante dans notre vie couronnant mes années d'études universitaires. Nous voudrions remercier ici les personnes qui nous ont accompagnées au cours de notre parcours et qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

En premier, nous remercions le bon dieu de nous avoir donné la force et la volonté pour accomplir ce travail

Nous remercions notre promoteur Dr GHERNOUTI Youcef pour son aide, tous ces conseils et de nous avoir proposé ce thème

Nous remercions tous les personnels de département de génie des matériaux,

Nos remerciements s'adressent à tous les enseignants de la faculté de science de l'ingénieur

Nous remercions LACHACHI Hicham, chef de laboratoire de COSIDER TP29

Nous tenons à remercier profondément tous les personnels de laboratoire de COSIDER M29

Nous remercions tous les membres de l'unité de recherche de la faculté des sciences de l'ingénieur.

Dédicaces



*A ceux qui se sont toujours dévoués et sacrifiés
pour moi, ceux qui m'ont donné le vrai amour,
ceux qui m'ont encouragé et soutenu à
combattre les aléas de la vie et donner le
meilleur de moi en témoignage de mon
éternelle reconnaissance je dédie essentiellement
ce travail à **mes parents**.*

*A tous mes amis , R.Kamel, D.Abdellah,
T.Mohamed, G.Abdelghafour, G. Mohamed,
A.Houssem, H.aymen, L.Samir, T.Ahmed ,
T.Abdelmadjid, S.Yacine ,B.Hamza, et mon
frère Islam, et tous mes amis sans exception .*

A mes amies, Djihad, Imane, Hadjer, Meriem,

A tout le groupe MCD₁₅

A mon biome BOUZID Mohamed Anis

A tous , merci.

Hakim.

Dédicaces

*A ceux qui se sont toujours dévoués et sacrifiés pour moi, ceux qui m'ont donner le vrai amour, ceux qui m'ont encouragé et soutenu à combattre les aléas de la vie et donner le meilleur de moi en temoignage de mon éternelle reconnaissance je dédie essentiellement ce travail a **mes parents**.*

A tous mes amis , R.Kamel, D.Abdellah, T.Mohamed, G.Abdelghafour, GUERROUMI Mohamed, T.Ahmed , T.Abdelmadjid, T.Nour Islam, S.Yacine ,B.Hamza, Z.Hadjer et mon frère Ramzi, et tous mes amis sans exception .

A tout le groupe MCD₁₅

A mon biome TOUATI Abdelhakim

A tous , merci.

Anis.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERAL.....	1
Chapitre I : Béton Autoplaçant	
I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2 DEFINITION.....	3
I.3 DOMAINE D'UTILISATION.....	3
I.4 CONCEPT D'UN BAP.....	5
I.5 LES CONSTITUANTS D'UN BAP.....	6
I.5.1 Les ciments.....	6
I.5.2 Les granulats.....	7
I.5.3 L'eau de gâchage.....	8
I.5.4 Les ajouts minéraux.....	8
I.5.5 Les adjuvants.....	9
I.6 CARACTERISATION D'UN BAP.....	13
I.6.1 Propriétés des BAP à l'état frais.....	13
I.6.1.1 Le remplissage.....	13
I.6.1.2 La résistance a la ségrégation.....	13
I.6.1.3 Capacité de passage.....	13
I.6.2 Caractérisations des BAP.....	14
I.6.2.1 Essais de fluidité.....	14
I.6.2.2 Ségrégation dynamique.....	15
I.6.2.3 Essai de la ségrégation statique.....	16

I.6.2.4 Ressuage.....	17
I.7 PRATIQUE ACTUELLE DE LA FORMULATION DES BAP.....	18
I.8 LES APPROCHES DE FORMULATION DES BAP.....	19
I.8.1 Approche japonaise.....	20
I.8.2 Approche Suédoise : proposée par [Peterson et al, 1996].....	22
I.8.3 Approche Française (LCPC).....	22
I.8.4 Méthode LGC.....	22
I.9 PROPRIETES DES BAP A L'ETAT DURCIS.....	23
I.9.1 Résistance à la compression.....	23
I.9.2 Résistance à la traction.....	24
I.9.3 Module d'élasticité.....	25
I.9.4 Le retrait.....	26
I.9.5 Fluage.....	27

Chapitre II : Traitement thermique des bétons

II.1 INTRODUCTION.....	28
II.2 DEFINITION.....	28
II.3 INTERET D'UN TRAITEMENT THERMIQUE.....	29
II.4 LES DIFFERENTS TYPES DU TRAITEMENT THERMIQUE.....	29
II.4.1 Le chauffage du béton avant sa mise en place « béton chaud ».....	29
II.4.1.1 Chauffage des granulats.....	30
II.4.1.2 Chauffage de l'eau de gâchage.....	30
II.4.1.3 Chauffage par injection de vapeur.....	30

II.4.1.4 Chauffage du béton par effet joule.....	31
II.4.2 La conservation de la chaleur d'hydratation « Auto-étuvage ».....	32
II.4.3 Apport de chaleur externe.....	32
II.4.3.1 Systèmes de chauffage externes pour les moules fixes.....	33
II.4.3.2 Systèmes de chauffage externe pour moules ou plateaux mobiles en tunnels ou râteliers.....	33
II.4.4 Apport de chaleur interne.....	34
II.5 CYCLE DE TRAITEMENT THERMIQUE DES BETONS.....	34
II.5.1 Règle pour la réalisation de traitement thermique.....	35
II.5.2. Choix final des cycles à partir des objectifs.....	36
II.6 DOMAINE D'UTILISATION.....	37
II.6.1 La préfabrication.....	37
II.6.1.1 Définition.....	37
II.6.1.2 Industrie de la préfabrication.....	37
II.6.1.3 Le béton préfabriqué.....	38
II.6.1.4 Production du béton préfabriqué.....	40
II.7 COMPORTEMENT DES BETONS SOUS L'EFFET DE TRAITEMENT THERMIQUE.....	41
II.7.1 Béton frais.....	41
II.7.1.1 Effet sur la cinétique d'hydratation.....	41
II.7.1.2 Effet sur la microstructure.....	41
II.7.1.3 Effet sur les produits d'hydratation.....	42
II.7.2 béton à l'état durci.....	43

II.7.2.1 Effet sur la résistance.....	43
---------------------------------------	----

Chapitre III : Etude expérimentale

III.1 METHODOLOGIE ET OBJECTIF DU TRAVAIL PRATIQUE.....	44
---	----

III.2 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISE.....	44
---	----

III.2.1 Le sable.....	44
-----------------------	----

III.2.2 gravier.....	47
----------------------	----

III.2.3 Ciment.....	50
---------------------	----

III.2.4 Fillers.....	51
----------------------	----

III.2.4.1 le calcaire.....	51
----------------------------	----

III.2.4.2 pouzzolane.....	52
---------------------------	----

III.2.4.3 Fumée de silice.....	53
--------------------------------	----

III.2.5 Eau de gâchage.....	54
-----------------------------	----

III.2.6 Adjuvant.....	54
-----------------------	----

III.3 FORMULATION DU BETON.....	56
---------------------------------	----

III.3.1 Application de la méthode japonaise.....	56
--	----

III.3.2 Détermination de la masse de chaque constituant.....	57
--	----

III.4 MALAXAGE DE BETON.....	59
------------------------------	----

III.5 CONFECTION ET CURE DES EPROUVETTES.....	60
---	----

III.6 CONSERVATION DES EPROUVETTES.....	61
---	----

III.7 TRAITEMENT THERMIQUE.....	61
---------------------------------	----

III.8 ESSAIS SUR BAP.....	62
---------------------------	----

III.8.1. Essais sur les BAP à l'état frais.....	62
---	----

III.8.1.1 Masse volumique (NF EN 12350-6).....	62
--	----

III.8.1.2 Essais d'étalement au cône d'Abrams.....	63
--	----

III.8.1.3 Essai de la boîte en L (norme de référence NF EN 12350-10).....	63
---	----

III.8.1.4 Essais de stabilité au tamis (Norme de référence NF I N 12350-11)...	64
III.8.2 Essais à l'état durci (BAP étuvés et non étuvés).....	64
III.8.2.1 Masse volumique (NF EN 12390-7).....	64
III.8.2.2 Résistance a la compression (NA 5075NF EN 1239).....	64
III.8.2.3 Résistance a la flexion (NF EN 12390-5).....	65
III.8.2.4 Essais de l'ultrason (NF EN 12504-4).....	66

Chapitre IV : Résultats et discussions

VI.1 INTRODUCTION.....	68
IV.2 RESULTATS DES ESSAIS SUR LES BAP A L'ETAT FRAIS.....	68
IV.2.1 Masse volumique (NF EN 12350-6).....	68
IV.2.2 Essais d'étalement au cône d'Abrams : (Norme de référence NF EN 12350-8)...	68
IV.2.3 Essai de la boîte en L :(norme de référence NF EN 12350-10).....	70
IV.2.4 Essais de stabilité au tamis.....	71
IV.3 RESULTATS DES ESSAIS SUR BAPA L'ETAT DURCI.....	72
IV.3.1 BAP non étuvé.....	72
IV.3.1.1 Masse volumique.....	72
IV.3.1.2 Résistance à la compression.....	72
IV.3.1.3 Résistance à la flexion.....	73
IV.3.1.4 Essais de l'ultrason.....	75
IV.3.2 Résultats des essais sur les BAP étuvés.....	76
IV.3.2.1 Masse volumique.....	76
IV.3.2.2 Résistance à la compression.....	76

IV.3.2.3	Résistance à la flexion.....	77
IV.3.2.4	Essais de l'ultrason.....	78
IV.3.3	Comparaison entre les bétons étuvés et les bétons non étuvés.....	79
IV.3.3.1	Masse volumique.....	79
IV.3.3.2	Résistance à la compression.....	80
IV.3.3.3	Résistance à la flexion.....	82
IV.3.3.4	Essais de l'ultrason.....	84
CONCLUSION GENERAL.....		86
Références bibliographique.....		88

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : (a) Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP, (b) Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.....	6
Figure I.2 : Les utilisations des superplastifiants.....	12
Figure I.2 : Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures.....	14
Figure I.4 : Essai d'étalement.....	15
Figure I.5: La boîte en L.....	15
Figure I.6 : Essai de la stabilité au tamis.....	17
Figure I.7 : Essai de ressuage à l'aéromètre.....	18
Fig. I.8 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité.....	20
Figure I.9: Recherche du dosage en eau et en superplastifiant.....	21
Figure I.10: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF).....	24
Figure I.11: Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés Avec leurs valeurs expérimentales.....	25
Figure I.12 : Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation.....	25
Figure I.13 : Retraits des BAP B1 ($E/C=0,50$), BAP J($E/C=0,43$) et BO0 ($E/C=0,45$)	26
Figure II.1 : Préchauffage du béton par chauffage de granulats.....	30
Figure II.2 : Préchauffage du béton par injection de vapeur sans le malaxeur.....	31
Figure II.3: Benne à électrodes pour le chauffage du béton frais par l'effet joule.....	31
Figure II.4 : tunnels d'étuvage pour moules de voussoirs.....	33
Figure II.5 : Forme général d'un cycle thermique.....	36
Figure II.6 : Éléments préfabriquées.....	39

Figure II.7 : Schéma de la production du béton préfabriqué.....	40
Figure II.8 : représentation structurels de la portlandite [Henderson 1962].	42
Figure III.1 : Analyse granulométrique par tamisage.....	49
Figure III.2 : malaxage du béton.....	60
Figure III.3 : Confection des éprouvettes.....	60
Figure III.4 : Conservation des éprouvettes.....	61
Figure III.5 : cycle d'étuvage utilisé.....	61
Figure III.6 : Traitement thermique des BAP.....	62
Figure III.7 : Essais d'étalement.....	63
Figure III.8 : Essai de boîte en L.....	63
Figure III.9 : Essai de stabilité au tamis.....	64
Figure III.10 : Essais de compression.....	65
Figure III.11 : Essais de flexion.....	66
Figure III.12 : Essais de l'ultrason.....	67
Figure IV.1 : Masse volumique des différents BAP a l'état frais.....	68
Figure IV.2 : Evolution de l'étalement.	69
Figure IV.3 : Evolution de taux de remplissage.....	70
Figure IV.4 : Evolution de stabilité au tamis.....	71
Figure IV.5 : Masse volumique des BAP non étuvés a l'état durci.....	72
Figure IV.6 : Evolution de la résistance à la compression des BAP non étuvés.....	73
Figure IV.7 : Evolution de la résistance à la flexion pour les BAP non étuvés.....	74
Figure IV.8 : Résultats des vitesses de propagation du son a travers les BAP non étuvés.....	75
Figure IV.9 : La masse volumique des BAP étuvés a l'état durci.....	76
Figure IV.10 : Evolution de la résistance a la compression des BAP étuvés.....	77
Figure IV.11 : Evolution de la résistance a la flexion des BAP étuvés.....	78
Figure IV.12 : Vitesse de propagation du son a travers les BAP étuvés.....	79
Figure IV.13 : Masse volumique à l'état durci des BAP étuvés et non étuvés.....	79
Figure IV.14 : Evolution de la résistance a la compression des BAP a base de calcaire étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.....	80
Figure IV.15 : Evolution de la résistance a la compression des BAP à base de pouzzolane étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.....	81

Figure IV.16 : Evolution de la résistance a la compression des BAP a base de fumé de silice étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.....	81
Figure IV.17 : Evolution de la résistance a la flexion des BAP a base de calcaire étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.....	82
Figure IV.18 : Evolution de la résistance a la flexion des BAP a base de pouzzolane étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.....	82
Figure IV.19 : Evolution de la résistance a la flexion des BAP à base de fumé de silice étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.....	83
Figure IV.20 : Résultats de la vitesse de propagation du son à travers les BAP étuvés et non étuvés.....	84

Tableau I .1: Effets et performances des adjuvants.....	11
Tableau III.1 : Caractéristique physique du sable grossier de Bouzegza.....	45
Tableau III.2 : Analyse granulométrique du sable grossier de Bouzegza.....	45
Tableau III .3 : Caractéristiques physiques du sable fin de Boussaada.....	45
Tableau III.4 : Analyse granulométrique du sable fin de Boussaada.....	46
Tableau III.5 : Analyse granulométrique du sable corrigé.....	47
Tableau III .6 : Caractéristiques physiques du gravier 3/8.....	47
Tableau III.7 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	48
Tableau III.8 : Caractéristiques physiques du gravier 8/15.....	48
Tableau III.9: Analyse granulométrique du gravier 8/15.....	48
Tableau III.10 : Composition minéralogique du CHF-CEMIII/A.....	50
Tableau III.11 : Composition chimiques du ciment CHF-CEMIII/A.....	50
Tableau III.12 : Résultats des différents essais physiques sur le ciment CRS.....	51
Tableau III.13 : Résultats des essais mécaniques du ciment CRS.....	51
Tableau III.14 : Les caractéristiques physico-chimiques des fillers de calcaire employé...52	52
Tableau III.15 : Composition chimique du calcaire.....	52
Tableau III.16 : Les caractéristiques physico-chimiques des fillers de pouzzolane.....	52
Tableau III.17 : Composition chimique de la pouzzolane.....	53
Tableau III.18 : Les caractéristiques des fillers de fumé de silice.....	53
Tableaux III.19 : Composition chimique du fumé de silice.....	54
Tableau III.20 : Caractéristiques du Glenium 51.....	54
Tableau III.21 : quantités des matériaux utilisés pour 1 m ³ du BAP.....	59
Tableau IV.1 : Masse volumique a l'état frais des différents BAP.....	68
Tableau IV.2 : Résultats de l'essai d'étalement.....	69
Tableau IV.3 : résultats de boîte en L.....	70
Tableau IV.4 : résultats de l'essai de stabilité au tamis.....	71
Tableau IV.5 : Masse volumique a l'état durcis des bétons non étuvés.....	72
Tableau IV.6 : Résistance à la compression des bétons non étuvés.....	72
Tableau IV.7 : Résistance a la flexion des bétons non étuvés.....	73
Tableau IV.8 : La vitesse de propagation des différents bétons non étuvées.....	75
Tableau IV.9 : Masse volumique a l'état durcis des BAP étuvés.....	76
Tableau IV.10 : Résistance a la compression des bétons étuvés.....	77
Tableau IV.11 : Résistance a la flexion pour les bétons étuvés.....	77
Tableau IV.12 : la vitesse de propagation du son des différents bétons étuvés.....	78

INTRODUCTION

GENERAL

INTRODUCTION GENERAL

Le béton est un matériau de construction qui trouve pratiquement son champ d'utilisation dans tous les domaines du génie civil. Actuellement, il est sans doute le plus utilisé pour les avantages économiques et techniques qu'il présente.

La tendance actuelle des industriels du béton va de plus en plus vers l'utilisation des bétons autoplacants. Ces bétons ont été initialement mis au point par des chercheurs de l'université de Tokyo vers les années 1980.

Les bétons autoplacants ou BAP sont des bétons très fluides, homogènes et stables, ils se mettent en œuvre sans vibration ce qui constitue un grand avantage pour la réalisation des constructions. Un béton autoplacant (BAP) permet de remplir des coffrages complexes où la densité en ferrailage est importante. Pour cela, les BAP doivent avoir des propriétés bien déterminées à l'état frais. Ainsi, sa formulation doit au moins contenir un adjuvant chimique et un ajout minéral pour satisfaire les conditions de maniabilité et de stabilité.

Depuis la découverte de BAP, de nombreuses recherches ont été réalisées notamment sur sa formulation ainsi que ses propriétés mécaniques à température ambiante. Cependant peu de travaux sont effectués sur l'influence du traitement thermique sur le comportement physico-mécanique des BAP. Du fait de la forte demande de production, l'industrie de la préfabrication a souvent recouru à l'utilisation de la température. Plusieurs méthodes sont développées et appliquées afin d'avoir dans un laps de temps court des niveaux de résistance suffisante. Une température élevée, accélère les réactions chimiques d'hydratation et affecte avantageusement la résistance au jeune âge.

L'objectif de notre travail de recherche est d'accélérer la prise et le durcissement d'un béton autoplacant à jeune âge (moins de 24 heures) pour atteindre des résistances mécaniques intéressantes, pour qu'il devienne compatible avec les exigences de la production industrielle (béton préfabriqué). Cet objectif peut être obtenu par le traitement thermique qui occupe une place importante parmi les différentes méthodes possibles.

A cet effet, ce mémoire est divisé en deux grandes parties ; une partie bibliographique (théorique) et une partie expérimentale.

Une partie théorique: traite des généralités et des notions sur le béton autoplacant (BAP), constituants, méthodes de formulation, propriétés rhéologiques du BAP, ainsi une généralité

INTRODUCTION GENERAL

sur le traitement thermique des BAP et leur domaine d'utilisation.

Une partie expérimentale : consacré à la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques, et mécaniques (Ciment, filler calcaire, pouzzolane, fumée de silice, superplastifiant, sable et gravier.), la formulation d'un BAP à base de trois types d'ajout (fillers calcaire, pouzzolane et fumée de silice) selon la méthode japonaise, le malaxage, confection et conservation des éprouvettes, cycle d'étuvage ainsi que les essais sur BAP à l'état frais et durcis et on complète notre étude pratique par les résultats des essais physico-mécaniques des bétons étuvés et non étuvés et une comparaison entre les deux BAP.

Enfin, on clôture notre travail par une conclusion.

CHAPITRE I :

Béton autoplaçant

I.1 INTRODUCTION

Les maîtres d'œuvres, architectes, ingénieurs, entreprises, fabricants de béton toujours recherché un béton permettant :

- ✓ Une mise en place aisée.
- ✓ Un bon remplissage des coffrages.
- ✓ Un parfait enrobage des armatures.

La vibration a toujours été le moyen d'obtenir ces caractéristiques. Devant la complexité croissante des structures, formes variées, fortes concentrations d'armatures, les formulations de bétons ont dû s'adapter. Les bétons sont devenus de plus en plus fluides, malgré la réduction de la quantité d'eau de gâchage, à tel point que la vibration n'est devenue plus nécessaire. Cette hyperfluidité du béton a été rendue possible par l'arrivée sur le marché des dernières générations d'adjuvants « superplastifiants ». Le béton autoplaçant était alors né ...

Le JAPON a été dans les années 80 le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique et qui s'est progressivement répandue à travers le reste du monde, de nombreux termes définissent ces bétons :

- ✓ Béton auto-compactant (BAC).
- ✓ Self-compacting concrete (SCC, en Anglais).
- ✓ Béton hyperfluide.

L'appellation la plus usitée aujourd'hui est le béton autoplaçant (BAP).

I.2 DEFINITION :

Par béton auto-plaçant (BAP), on désigne un béton très fluide, très déformable, stable et mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuant par le seul effet gravitaire). Il confère à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant au béton classique mis en œuvre par vibration, il garantit à la structure la résistance et la durabilité [1]. Par définition, les BAN (Bétons Auto-Nivelant) constituent une famille de BAP correspondant aux applications horizontales (dallage, plancher...).

I.3 DOMAINE D'UTILISATION :

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité :

- ✓ possibilité de coulage de zones fortement ferraillées.

- ✓ Possibilité de coulage de zones d'architecture complexe et difficilement accessibles aux ouvriers,
- ✓ Obtention de très bonnes qualités de parement.

L'un des avantages majeurs du BAP est de permettre la réalisation de parements de grande qualité. Leur composition, riche en éléments fins, permet d'obtenir une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrant utilisée. Les aspects satinés, lisses ou très structurés recherchés par les architectes sont alors plus facilement réalisables. Des teintes homogènes et régulières peuvent être obtenues si les conditions de mise en œuvre évoquées précédemment sont respectées, notamment du point de vue de la propreté des coffrages.

Le coulage d'un béton dans une zone très fortement ferrillée menait traditionnellement à un surdimensionnement de la pièce afin de rendre accessible tout point du bétonnage.

L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de forme complexe. Les BAP constituent donc une alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction : bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation, etc.

Walraven [2] précise cependant que les BAP sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent. Globalement, leur utilisation permet de réduire les coûts de production et, parallèlement, d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis.

Leur utilisation est plus délicate sur site car Les BAP sont particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau. Or, bien que la production soit contrôlée, les lots de matériaux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes.

En effet, la formulation des BAP est particulière : utilisation d'adjuvants et d'additions minérales. Leur sensibilité en ce qui concerne le dosage et la teneur en eau, la qualité et la régularité des composants ainsi que les conditions de malaxage, nécessite donc la mise en place d'un suivi plus important. Nous verrons que les différentes précautions à prendre sur chantier et que la composition même du matériau peuvent entraîner un surcoût

Les chantiers, où la solution BAP a été retenue, montrent l'intérêt de ces bétons.

Les motivations de ce choix les plus couramment rencontrées sont la facilité de mise en œuvre, la réduction des délais et la qualité des parements [3].

I.4 CONCEPT D'UN BAP :

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème [4].

Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons vibré, par leurs propriétés à l'état frais [5] [6]. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Pour parvenir au cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (figure I.1). En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche.

C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

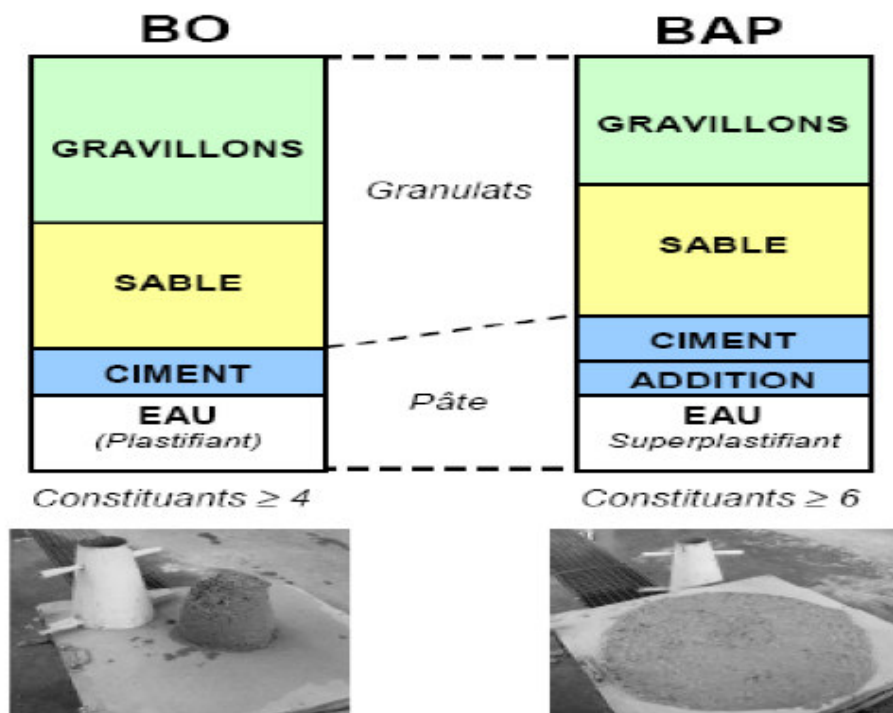


Figure I.1 : (a) Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP
 (b) Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.

I.5 LES CONSTITUANTS D'UN BAP :

I.5.1 Les ciments :

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% [7].

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

- ✓ Le silicate tricalcique, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, que l'on écrit C3S ;
- ✓ Le silicate bicalcique, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, que l'on écrit C2S ;
- ✓ L'aluminate tricalcique, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, que l'on écrit C3A ;
- ✓ L'aluminoferrite tetracalcique, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, 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 (SiO_2), de 2 % à 9 % d'alumine (Al_2O_3), et de 1% à 5 % d'oxyde de fer (Fe_2O_3).

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, hémihydrates, anhydrite) et d'additifs [8].

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton autoplaçant 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 [9].

I.5.2 Les granulats :

Les granulats (sable et gravier) constituent le squelette du béton. Ils sont définis comme un ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 125 mm et doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. La nature des roches constituant les gisements est responsable des propriétés intrinsèques (masse volumique, résistance, porosité, réactivité, etc.) des granulats [10]. La granularité et la forme des granulats sont fonction du processus d'élaboration. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés.

Les granulats permettent tout d'abord de réduire considérablement le coût global du béton (cinq fois moins chers que le ciment), mais leur influence est déterminante sur la résistance mécanique du béton à l'état durci. La résistance mécanique du béton dépend fortement de la nature des granulats (propriétés intrinsèques), et de la compacité du squelette global, ainsi que de l'adhérence entre les granulats et la pâte du béton. [11]

Par ailleurs, le dosage des granulats peut avoir une influence sur les propriétés d'ouvrabilité des bétons. Pour obtenir un béton autoplaçant, le volume du gravier et la taille maximale des granulats ont été réduits pour réduire les frictions et éviter les blocages dans des zones confinées.

I.5.3 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage doit être propre, elle ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes :

- ✓ 2 g/l pour les bétons à haute résistance.
- ✓ 5 g/l pour les bétons à faible résistance.

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

- ✓ 15 g/l pour les bétons à hautes résistances.
- ✓ 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 des superplastifiants. [12]

I.5.4 Les ajouts minéraux :

Les additions minérales sont des matériaux minéraux finement divisés pouvant être partiellement substituées au ciment pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Les additions sont variées : le laitier granulé de haut fourneau, les calcaires, les pouzzolanes naturelles (siliceuses ou calciques), les fumées de silice, les cendres volantes. Les deux dernières additions ont des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'elles ne durcissent pas par elles-mêmes lorsqu'elles sont mélangées avec de l'eau, mais elles réagissent à température habituelle, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) dissous issu des réactions d'hydratation, pour former des composés de silicates et d'aluminates de calcium développant des résistances. Ces composés sont semblables à ceux qui sont formés lors du durcissement des matières hydrauliques.

- **La pouzzolane**

Les pouzzolanes sont des roches naturelles composées d'une large part de silice réactive, d'oxyde de fer et d'alumine. Elles sont généralement d'origine volcanique ou sédimentaire.

Leurs propriétés pouzzolaniques sont soit naturelles, soit activées thermiquement.

- **Les fillers calcaire**

Les fillers calcaires sont très réactifs en présence de ciment, alors que les fillers siliceux sont pratiquement inertes. Cette réactivité dépend de :

- ✓ La nature du calcaire.
- ✓ Son état de cristallisation (une calcite à réseau cristallin désorganisé donne une augmentation de résistance plus rapide qu'une calcite à réseau cristallin désorganisé).
- ✓ Le type de broyage (en plus de l'action propre due à l'augmentation de la finesse, le broyage peut désorganiser la structure et améliorer la réactivité).

- **Fumée de silice**

Les fumées de silice sont formées de particules sphériques très fines (environ 1µm) présentant une très forte teneur en silice (SiO₂) amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferroélectrique. Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques. L'influence des fumées de silice doit être clarifiée. Pour certains auteurs [12-14], elles augmentent les valeurs de seuil de cisaillement et de viscosité en augmentant la compacité des mélanges, Alors que pour Carlswald [15], par exemple, les fumées de silices ne modifient pas la viscosité. Par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence, Ferraris et al. [16] montrent que l'utilisation de fumées de silice augmente la demande en eau et en superplastifiant que ce soit pour des pâtes de ciment ou pour des bétons.

1.5.5 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités, afin d'en améliorer certaines propriétés, les principaux adjuvants sont :

- ✓ Les superplastifiants : ils permettent d'obtenir des bétons maniables et ouvrables par défloculation des grains de ciment. À une consistance donnée ils offrent la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et la mise en place du béton, et par conséquent augmenter les caractéristiques mécaniques du béton.
- ✓ Les retardateurs de prise : ils trouvent leur utilisation dans le transport du béton sur de

grandes distances, en particulier par temps chaud. Ils sont aussi utilisés pour éviter toute discontinuité lors de reprise de bétonnage.

- ✓ Les accélérateurs de prise : ils trouvent leur utilisation dans la réalisation de scellement ou d'étanchement.
- ✓ Les accélérateurs de durcissement : ils permettent d'obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques à jeune âge afin de décoffrer rapidement et augmenter par conséquent la cadence de travail, en particulier en temps froid.
- ✓ Les entraîneurs d'air : ils favorisent la formation de microbulles d'air (agrégats fictifs) de façon homogène afin d'augmenter la résistance du béton aux cycles gel-dégel.
- ✓ Les hydrofuges de masse : ils permettent d'étanchéifier le béton, en colmatant les pores capillaires, ils trouvent leur utilisation dans la réalisation des réservoirs d'eau, piscines, bache à eau. [17]

Adjuvants	Effet(s)	Performances par rapport à un béton témoin
Plastifiant réducteur d'eau	Réduction du dosage en eau	$\geq 5\%$
	Augmentation de la résistance à la compression à 7 et 28 jours	$\geq 110\%$
Superplastifiant haut réducteur d'eau	Réduction du dosage en eau	$\geq 12\%$
	Augmentation de la résistance à la compression au jeune âge	$\geq 140\%$
	Augmentation de la résistance à la compression à 28 jours	$\geq 115\%$
	Augmentation de l'affaissement au cône d'Abrams	$\geq 120\text{mm}$
Rétenteur d'eau	Diminution de l'eau ressuée	$\leq 50\%$
Entraîneur d'air	Augmentation de l'air entraîné	$\geq 2.5\%$
Accélérateur de prise	Augmenter le temps de début de prise	$\geq 30\text{min}$
	Diminution du temps de début de prise à 5°	$\leq 60\%$
Accélérateur de durcissement	Augmentation de la résistance à la compression à 7 et 28 jours à 24° et à 20°	$\geq 120\%$
	Augmentation de la résistance à la compression à 7 et 28 jours à 48h et à 5°	$\geq 130\%$
Retardateur de prise	Augmenter le temps de début de prise	$\geq 90\text{min}$
	Diminuer le temps de fin de prise	$\leq 360\text{ min}$
hydrophobant	Absorption capillaire pendant 7 jours après 7 jours de conservation	$\leq 50\%$

Tableau I .1: Effets et performances des adjuvants.

L'utilisation d'un adjuvant permet de réduire le risque de ségrégation du BAP (ressuage, granulats grossiers coulant vers le bas), qui devient ainsi plus stable et moins sensible aux variations du rapport E/C.

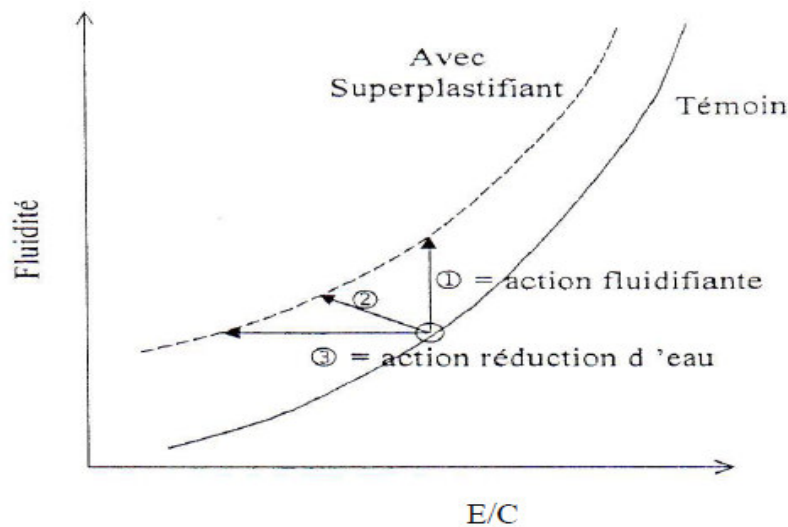


Figure I.2 : Les utilisations des superplastifiants.

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).

Les superplastifiants sont des produits organiques (polycarboxylates) qui sont 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 superplastifiants nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation [18].

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 [19].

I.6 CARACTERISATION D'UN BAP

I.6.1 Propriétés des BAP à l'état frais

I.6.1.1 Le remplissage

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations

Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects [1].

I.6.1.2 La résistance a la ségrégation

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [20], [21].

La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus. Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité.

I.6.1.3 Capacité de passage

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement. Cependant, dans les milieux confinés, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures. En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement [1]. Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le

schéma de (la figure I.4) ci dessous qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.

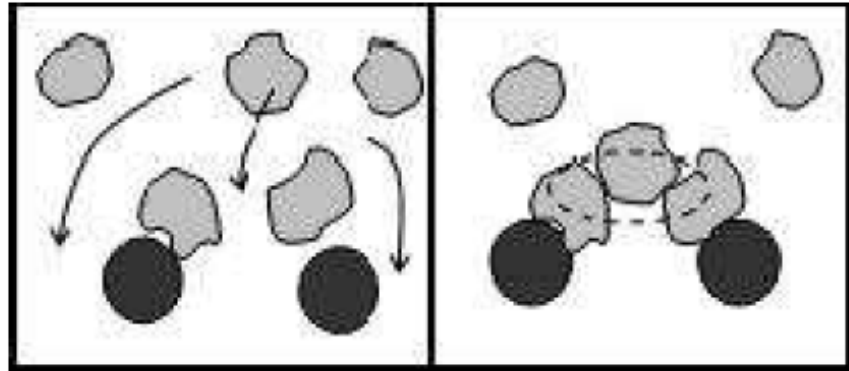


Figure I.3 : Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures.

I.6.2 Caractérisations des BAP

Lors de la formulation, la caractérisation des BAP est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier les différentes propriétés citées ci dessus. Ils sont destinés à caractériser le béton de part sa fluidité, sa stabilité et son absence au blocage. Ce qui suit résume les différents tests d'ouvrabilité qui caractérisent les bétons autoplaçants.

I.6.2.1 Essais de fluidité

• Mesure de l'étalement (essai au cône d'Abrams)

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant d'évaluer la fluidité est l'essai d'étalement réalisé avec le cône d'Abrams. Le principe de cet essai est de mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône (figure I.4) [1].

Le diamètre de la galette de béton est le paramètre caractérisant de la fluidité, plus il est grand, plus le béton est fluide (grande capacité de remplissage). L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50cm et 80cm en fonction de l'utilisation du béton [22], [23].

Ceci permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).

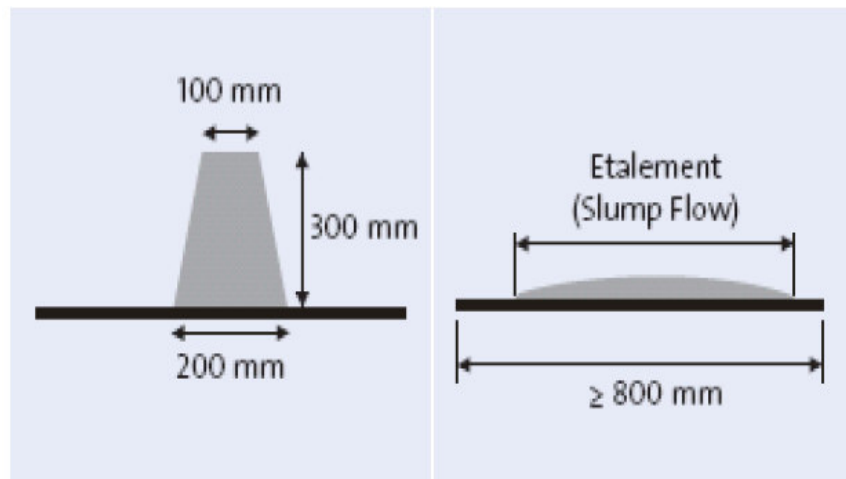


Figure 1.4 : Essai d'étalement.

- **Mesure de la vitesse d'étalement (essai au cône d'Abrams)**

Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50cm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. Cette mesure, le T50, est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de T50 traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Pour un béton autoplaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes [24], [25]. Cependant, certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes, pour des bétons autoplaçants avec une faible vitesse de déformation [26], [27].

I.6.2.2 Ségrégation dynamique

- **Essai de la boîte en L**

La boîte en L permet de caractériser la mobilité du béton frais en milieu confiné (ségrégation dynamique) et de vérifier que la mise en place du béton se fait sans blocage, ni formation de voûtes au voisinage des armatures.

Lors de l'écoulement d'un BAP, les risques de séparation de la phase granulaire de la pâte sont très élevés, notamment en présence d'armatures. Au coulage du béton, la trajectoire des granulats se trouve modifiée, les granulats ont tendance à converger vers les mêmes endroits en formant des voûtes au voisinage des armatures bloquant alors l'écoulement du béton.

Le principe de cet essai (figure I.6), est de remplir entièrement la partie verticale de la boîte, laisser le béton se reposer 1 mn puis enlever la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers le ferrailage. On mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime le taux de remplissage $H2/H1$.

Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrailés. Selon le groupe association française de génie civil

AFGC [1], le taux de remplissage doit être supérieur à 0,8.

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, il convient donc de diminuer le rapport G/S (augmenter la quantité de sable, ou diminuer celle des graviers), ou d'augmenter le volume de la pâte en maintenant le rapport E/C constant.

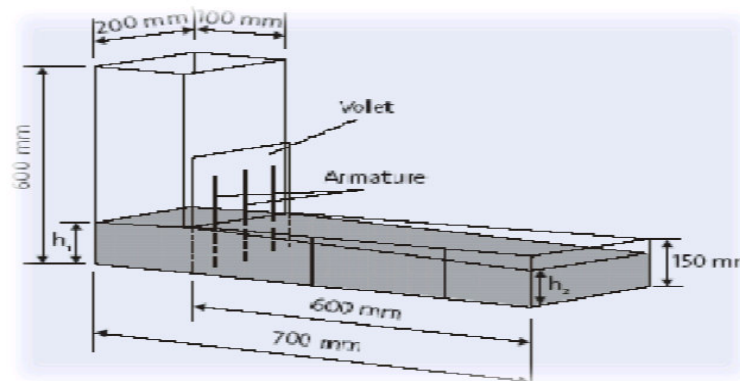


Figure I.5: La boîte en L

I.6.2.3 Essai de la ségrégation statique :

- **Essai de la stabilité au tamis :**

Une résistance à la ségrégation statique se traduit par la capacité qu'a un BAP à maintenir ses particules en suspension, sans risque de tassement des particules par gravité, ni ressuage.

Pour caractériser la ségrégation statique d'un BAP on utilise l'essai de stabilité au tamis (figure I.7). L'essai est développé par la société « GTM construction », il permet de qualifier

les BAP vis à vis du risque de ségrégation. Il s'agit de verser 10 litre du béton juste après le malaxage dans un sceau, puis couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation et laisser reposer durant 15 mn. Verser 5 kg du béton au centre d'un tamis 5mm, à une hauteur de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient. Après 2mn On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers le

tamis [1].

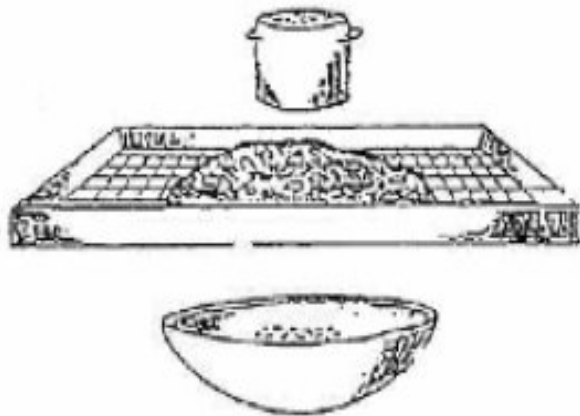


Figure I.6 : Essai de la stabilité au tamis.

Critères d'acceptabilité :

La mesure du pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton autoplaçants de la façon suivante :

- $0\% \leq P \text{ laitance} \leq 15\% \rightarrow$ stabilité satisfaisante.
- $15\% < P \text{ laitance} \leq 30\% \rightarrow$ stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser in situ).
- $P \text{ laitance} > 30\% \rightarrow$ stabilité très mauvaise.

Ces critères sont particulièrement adaptés aux applications en éléments verticaux.

I.6.2.4 Ressuage [1] :

Un BAP doit maintenir sa fluidité pendant la durée nécessaire pour son acheminement et sa mise en place. Or, pendant ce temps, en vertu de la loi de la gravité, les matières solides ont tendance à s'enfoncer, tandis qu'une partie de l'eau de gâchage et des fines remontent en surface de l'échantillon de béton frais, créant ainsi le ressuage.

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

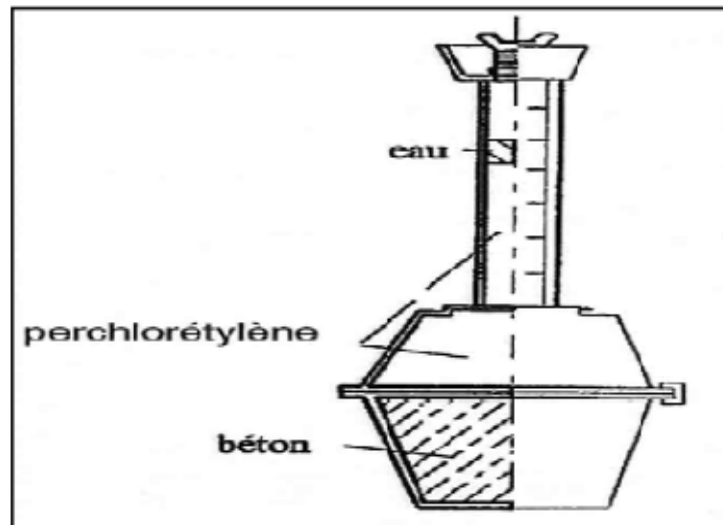


Figure I.7 : Essai de ressuage à l'aéromètre.

I.7 PRATIQUE ACTUELLE DE LA FORMULATION DES BAP :

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de béton près emploi, est l'industrie du bâtiment, qui utilise principalement des bétons de 25 à 35 MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer). En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût.

Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail au formulateur.

- ✓ Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse

de sable) proche de 1.

- ✓ Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- ✓ La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- ✓ Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux-Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence universelle. Ce sont plus des supports qui facilitent la formulation.

I.8 LES APPROCHES DE FORMULATION DES BAP :

I.8.1 Approche japonaise :

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi 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 engendré 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 :

➤ 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 (**Figure I.9**). Elle dépend bien sûr du mode de compactage. A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCP. 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.

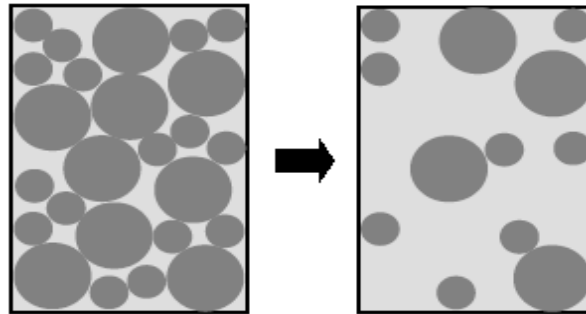


Fig. I.8 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité

➤ **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.

➤ **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.

➤ **Dosage de l'eau et du superplastifiant :**

Les dosages en eau et en superplastifiant 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 [28]

Les auteurs définissent l'étalement relatif D par l'équation ci – dessus :

$$D = \frac{d^2 - d_0^2}{d^2} \quad (01)$$

Où : d est le diamètre de la galette et d_0 la base du cône. Ils définissent également l'écoulement relatif T par l'équation suivant :

$$T = \frac{10}{t_e} \quad (02)$$

Où : t_e est le temps d'écoulement à l'entonnoir.

Les auteurs ont montré que la relation entre l'étalement et l'écoulement est linéaire lorsque le dosage en eau varie à quantité de superplastifiant constante. A l'aide de peu d'essais, il est alors possible de trouver un couple adjuvant/eau permettant de fluidifier de manière optimale le mortier.

Lors des essais sur mortiers, nous avons préféré fixer le rapport massique filler sur ciment à 0,8, et non pas poser la masse de ciment à 350 kg/m³, ce qui aurait conduit à un volume de filler supérieur à celui du ciment (il existe à l'heure actuelle peu de données dans la littérature sur de telles proportions de filler). Les essais ont été réalisés à l'aide d'un entonnoir et d'un cône à mortier, dont les dimensions sont la moitié de celles d'un cône d'Abrams.

La (Figure I.10) présente le résultat de la recherche du couple « eau / superplastifiant ». L'étalement normalisé D optimal est égal à 10 et le temps d'écoulement relatif T optimal est égal à 1.

Selon les auteurs, ce couple est optimal dans le sens où il donne un béton fluide avec un risque de ségrégation minime.

Le dosage en superplastifiant trouvé est de 1 % de la masse de fines, le rapport $E/(C+A)$ de 0,23 et la masse de ciment de 400 kg/m³.

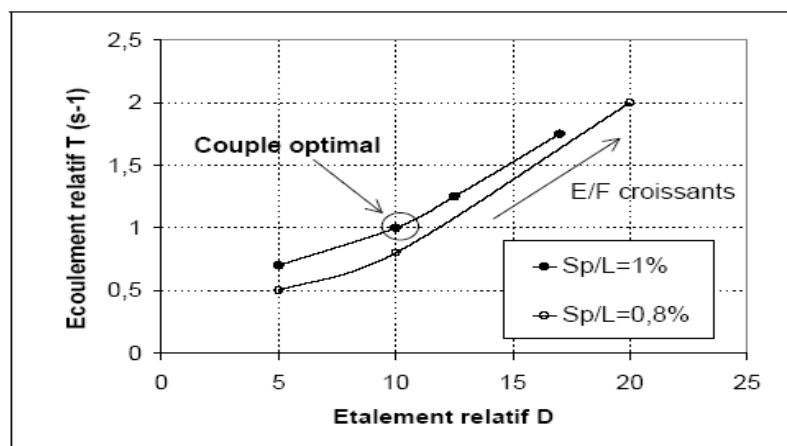


Figure I.9: Recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif T en

fonction de l'étalement relatif D. La flèche indique le sens des rapports massiques eau sur fines (E/F) croissants.

Le couple optimal est indiqué par un cercle

I.8.2 Approche Suédoise : proposée par [Petersson et al, 1996] :

La méthode suédoise repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène.

La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables. [29]

I.8.3 Approche Française (LCPC):

L'approche développée en France au LCPC par de Larrard et Sedran est basée sur le modèle d'empilement compressible [30], [31] qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. D'après les auteurs, un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité.

Le modèle permet de prévoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des constituants telles que la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre. Les auteurs ont modélisé le comportement à l'état frais du béton à partir de la compacité de son squelette granulaire.

Cette approche, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches est simplifiée par la mise en œuvre d'un logiciel (BétonlabPro 2) prenant en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche [31], et permettant de déterminer des formulations de différents types de bétons (Bétons à haute performance, bétons ordinaires, bétons secs pour démoulage immédiat, bétons autoplaçants).

Des extensions de cette méthode de formulation sont effectuées par les mêmes auteurs [31] afin de prendre en compte plus de paramètres tels que les propriétés des bétons à l'état durci (retrait, fluage, module d'élasticité, résistance à la traction et à la compression).

I.8.4 Méthode LGC :

La formulation de BAP est beaucoup plus complexe que celle de béton ordinaire. Pour l'instant, il n'existe pas de méthode générale de formulation pour le BAP. Cependant,

plusieurs méthodes de formulation ont été développées dans des pays différents. Okamura et Ouchi ont premièrement proposé une méthode empirique de formulation du BAP au Japon. La méthode développée par O. Petersson et al. vise à trouver la teneur maximale de granulat sans provoquer de blocage autour des armatures. Bui et al. ont amélioré cette méthode en ajoutant un critère de phase liquide. Dans la méthode proposée par N. Su et al, un coefficient de packing factor (PF) est introduit pour ajuster la teneur relative de granulat et de pâte. Sedran et de Larrard ont développé un modèle mathématique, appelé modèle d'empilement compressible, permettant de prévoir les comportements du BAP à l'état frais, en fonction des propriétés du squelette granulaire. Récemment, basé sur le travail d'A.W. Saak et al, L. Ferrara et al. ont établi une zone autoplaçante pour la formulation du BAP fibré. Une nouvelle méthode de formulation de BAP a été proposée dans ce mémoire tout en nous servant des méthodes existantes.

Elle a l'avantage d'être simple à utiliser. En effet, seulement deux types d'essais, à savoir essai de compactage pour le granulat et essai d'étalement pour la pâte, sont nécessaires. La première particularité de la méthode est la prise en compte directe de l'influence de superplastifiant sur le comportement de la pâte à l'état frais. Ceci a été réalisé à l'aide d'un plan d'expérience permettant de relier la pâte de ciment (ou la pâte de filler), le superplastifiant et l'étalement de la pâte grâce à un petit nombre d'essais. La deuxième particularité est le développement d'un nouveau processus de calcul de mélange de la pâte et des granulats basé sur la théorie d'excès de pâte. La dernière particularité de cette méthode est qu'elle permet de confectionner aussi bien des bétons ordinaires que ceux à hautes performances pour une valeur de résistance préalablement fixée. [32]

I.9 PROPRIETES DES BAP A L'ETAT DURCIS

Les particularités de composition des bétons autoplaçants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons vibrés.

I.9.1 Résistance à la compression :

Les BAP se caractérisent par un rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécaniques.

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa

résistance mécanique aux jeunes âges [33]. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense.

Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Zhu et Gibbs ont montré que la résistance de BAP utilisant la poudre de pierre à chaux augmente de 50 à 80% de celle de référence à 7j et de 20 à 40% à 28j, ils ont expliqués cette augmentation par la poudre à pierre à chaux accélère l'hydratation de ciment et augmente la résistance aux jeunes âges.

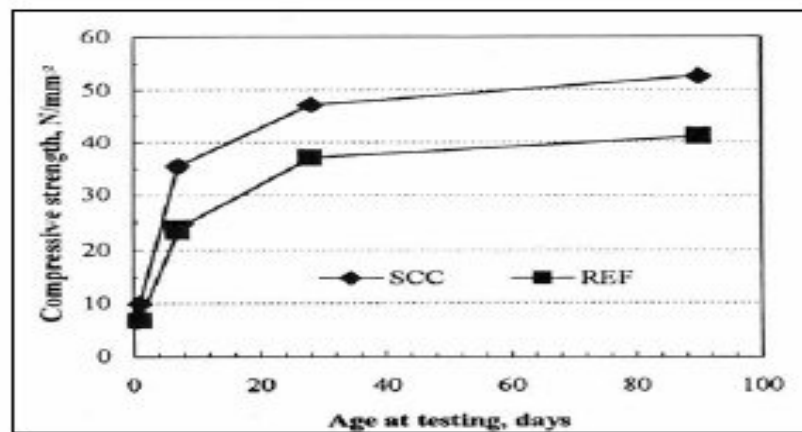


Figure I.10: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF)

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton.

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [34].

I.9.2 Résistance à la traction :

Gibbs 99 ont constatés qu'il n'y aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons référence. Par contre, Gibbs 02 ont montrés que la résistance à la traction est plus grande que la résistance des bétons références.

En comparant des mélanges de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction [28].

I.9.3 Module d'élasticité

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une basse quantité de gros granulats. Si on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$), 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 [77].

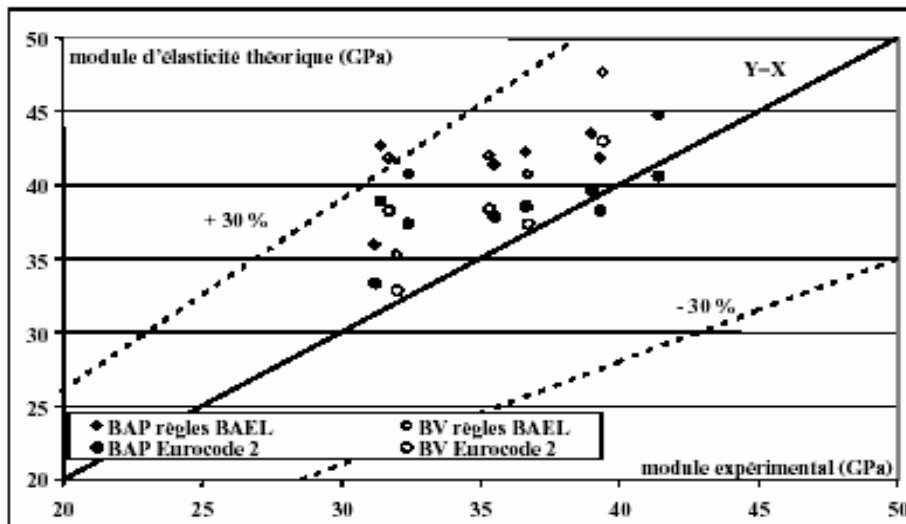


Figure I.11: Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés
Avec leurs valeurs expérimentales.

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.

Jacob et Hunkeler 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.

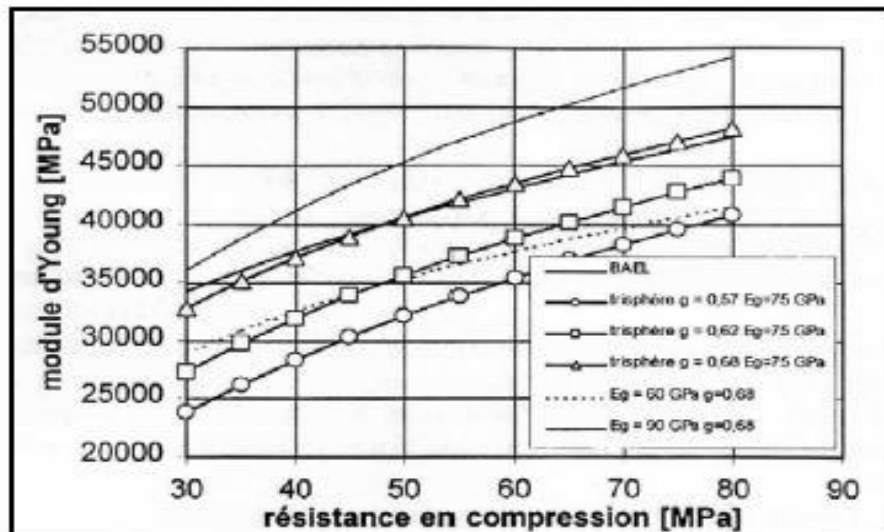


Figure I.12 : Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation .

I.9.4 Le retrait:

Le retrait endogène des BAP est plus faible (les valeurs s'échelonnent entre 50-200 $\mu\text{m/m}$) que celui des BV.

Le retrait endogène est similaire pour BAP et BV, présentant le même rapport E/C, la présence de l'addition n'a en général pas d'effet significatif ; au moins à long terme ; sur la déformation chimique. Les données sur le retrait de séchage sont très partagées d'un coté le retrait total est trouvé équivalent pour BAP et BV et de l'autre, il est trouvé sensiblement supérieur dans le cas des BAP. [35]

Ogawa et Al, constatent que le retrait de séchage des BAP est supérieur à celui des BV est ceci parce que la quantité de fine qu'ils contiennent est plus importante.

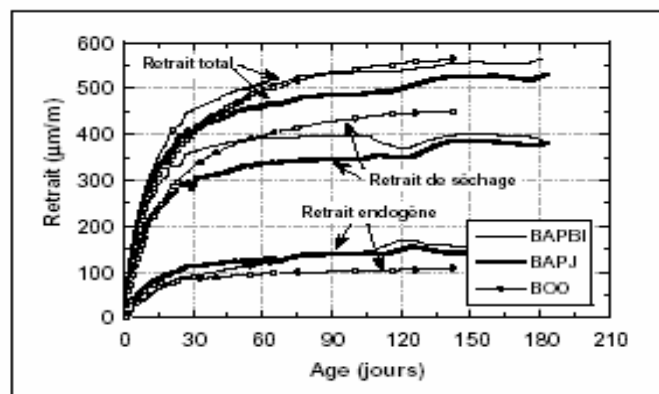


Figure I.13 : Retraits des BAP B1 ($E/C=0.50$), BAP J ($E/C=0.43$) et BOO ($E/C=0.45$) [35]

I.9.5 Fluage :

Le fluage peut être défini comme une augmentation de la déformation sous une contrainte constante. Comme cette augmentation de la déformation peut être plusieurs fois supérieure à la déformation sous l'application d'une charge, la prise en compte du fluage est d'une importance considérable lors de calcul des structures de bétons.

Le phénomène de fluage dépend de la distribution des efforts au sein de la structure et aussi de type de matrice de ciment.

Proust trouve des valeurs de même ordre de grandeur de BAP et pour BV. Ces résultats sont confirmés par Turcry, où il indique qu'en compression, le fluage total du BAP est identique à celui de BV. [35]

CHAPITRE II :

Traitement thermique des bétons

II.1 INTRODUCTION :

La recherche sur les matériaux cimentaires ne cesse de progresser afin de répondre aux besoins des industries. Les dernières innovations est le béton autoplçant découvert par les chercheurs japonais au début des années 90. Il s'agit d'un béton fluide, très déformable, homogène, stable et se mettant en place sous son poids propre, même dans des milieux complexes et très confinés. Depuis sa découverte, de nombreuses recherches ont été réalisées notamment sur sa formulation ainsi que ses propriétés mécanique à température ambiante et il a bénéficié d'une large utilisation dans l'industrie de construction. Cependant peu de travaux sont effectués sur l'influence d'un traitement thermique sur son comportement mécanique.

Du faite de forte demande de production, l'industrie de la préfabrication a souvent recourt à l'utilisation de la température. Plusieurs méthode sont développées et appliquées afin d'avoir dans un laps de temps court des niveaux de résistance suffisante. Une température élevée, accélère les réactions chimiques d'hydratation et affecte avantageusement la résistance au jeune âge. Elle réduit la période dormante et la structure globale de la pate de ciment hydraté s'établit très tôt. Cet effet sur la résistance s'inverse entre 7 et 15 jours d'hydratation du faite qu'une hydratation rapide présente une structure physique moins compacte. En effet, une vitesse d'hydratation rapide due à des températures élevée retarde l'hydratation subséquente et conduit à une distribution non uniforme de produits hydratés. Par exemple, une augmentation de 20% de porosité est mesurée sur une pate de ciment résistant aux sulfates mûrie à 80°C. par ailleurs, un fort dosage en ciment ou encor la présence des additions minérales dans la composition, accélère le durcissement à des températures élevées. Les additions minérales peuvent accélérer voir participer à la formation des hydrates.

Ce chapitre vise à comprendre et analyser l'évolution du comportement mécanique des BAP en fonction de la variation de la température et de son application sans palier successif, à partir de la mise en œuvre du béton frais. Afin de comprendre également l'effet de la composition sur l'interaction entre le comportement mécanique et la température, l'étude a été mené sur des bétons autoplçants.

II.2 DEFINITION :

Un traitement thermique consiste à assujettir, par un procédé quelconque, la température du béton, juste après sa mise en œuvre et pendant une durée limitée, à des valeurs fixées a priori.

Il a pour objectif principale de conférer au béton des performances mécaniques accrues au jeune âge et de rendre les températures homogènes dans l'ensemble du béton constituant l'élément traité, il peut avoir en outre pour effet, recherché ou non, modifier certaines propriétés du béton.

On distingue deux types familles de traitements thermiques des bétons :

- Les traitements dits « actifs » comportent un apport chaleur, soit directement à l'élément traité (généralement par effet joule), soit par sa périphérie (étuvage, chauffage des coffrages, etc.).
- Les traitements dits « passifs » ne comportent pas d'apport extérieur de chaleur autre qu'un éventuel chauffage du béton avant sa mise en place dans l'élément, ils consistent à maîtriser les échanges de chaleur de l'élément avec l'extérieur pour bénéficier au mieux de la chaleur dégagée par la réaction exothermique d'hydratation du ciment.

II.3 INTERET D'UN TRAITEMENT THERMIQUE :

Le traitement thermique d'un béton frais est une technique qui permet :

- Le bétonnage par temps froid.
- L'accélération des cadences par réduction du temps de prise donc un avancement plus rapide des chantiers et une rotation accélérée.
- D'effectuer dans un délai raisonnable des opérations d'usinage
- De réduire les délais de livraison
- La facilité du réglage de fabrication par la prise en compte plus des informations provenant du contrôle des performances
- D'éviter l'influence de certaines conditions climatiques généralement les produits en béton sont stockés pendant un certain temps sur des parcs alors que leurs résistances, sont encore faible ce qui les rend sensible aux intempéries

II.4 LES DIFFERENTS TYPES DU TRAITEMENT THERMIQUE :

II.4.1 Le chauffage du béton avant sa mise en place « béton chaud » :

Il consiste à réaliser un préchauffage du béton ou de ses constituants (eau, granulats) pour pouvoir ensuite « profiter » de l'élévation de température. Cela suppose que la mise en place du béton soit réalisée rapidement dans des moules isolés ou chauds afin que la température du béton ne chute pas rapidement avant ou pendant sa mise en place. Ceci implique aussi de

pouvoir utiliser le béton chaud sans délai d'attente, car sa maniabilité évolue d'autant plus rapidement que sa température est élevée. Dans la pratique. On ne dépasse pas 30°C en sortie de malaxeur, ou 40°C en sortie de benne chauffante. [36]

Les techniques les plus courantes sont :

II.4.1.1 Chauffage des granulats :

Par injection de vapeur dans les tas, par câbles chauffants ou radiateurs à infrarouge disposés dans ou sous les trémies, par injection d'air chaud à la base des trémies... ces techniques sont surtout utilisées pour la mise hors gel des granulats, mais permettent des gains de température du béton non négligeables (5 à 10°C) (Figure II.1).

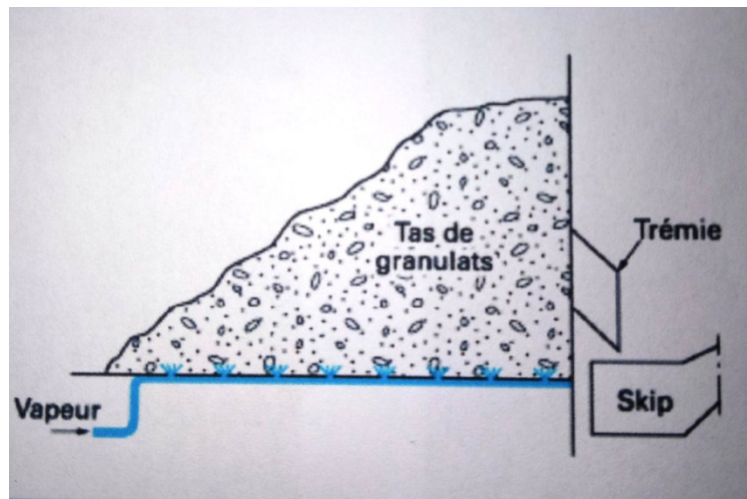


Figure II.1 : Préchauffage du béton par chauffage de granulats.

II.4.1.2 Chauffage de l'eau de gâchage :

Lorsque la quantité d'eau ajoutée dans le malaxeur est importante (granulats secs), remploi d'une eau chaude (généralement entre 60 et 80°C) est une solution économique. L'eau peut être chauffée, dans un ballon isolé par des thermoplongeurs électriques fonctionnant en « heures creuses » (tarif économique).

II.4.1.3 Chauffage par injection de vapeur :

Dans le malaxeur ; la vapeur à faible pression (1 bar) peut être injectée pendant le malaxage à l'aide d'injecteurs spéciaux (Figure II.2). pour une gâchée de 1 m³ un générateur de vapeur ayant un débit de 1000kg de vapeur par heure, il faut compter 100 secondes d'injection de vapeur pour un gain de 30°C. La quantité d'eau apportée par la condensation de la vapeur est

dans ce cas de 27 litres (elle doit évidemment être prise en compte dans le calcul de la teneur en eau du béton).

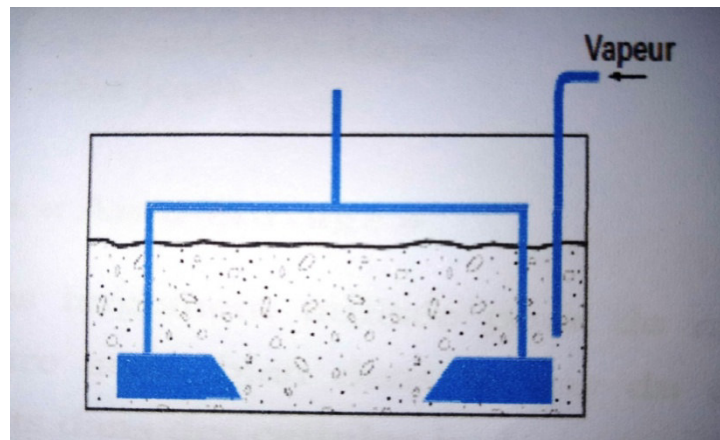


Figure II.2 : Préchauffage du béton par injection de vapeur sans le malaxeur

II.4.1.4 Chauffage du béton par effet joule :

Dans les bennes de coulage (Figure II.3). Cette technique développée avec l'aide d'EDF dans les années 1980, consiste à plonger dans le béton (contenu dans une benne d'attente) un jeu de trois électrodes reliées aux trois phases du secteur. Avec une puissance de 400 KW, on peut amener la température du béton à 40°C en 3 ou 4 minutes, la consommation est de l'ordre de 22 KWH/M3 de béton.



Figure II.3: Benne a électrodes pour le chauffage du béton frais par l'effet joule.

II.4.2 La conservation de la chaleur d'hydratation « Auto-étuvage » :

Cette technique de durcissement accéléré est très largement utilisée pour de nombreuses productions de produits en béton. On la rencontre aussi bien dans le cas du démoulage immédiat, les produits étant stockés sur leur supports dans des cellules isolées, que dans le cas du durcissement en moule avec des moules isolés thermiquement.

La base de cette technique est une très bonne isolation thermique de façon à ce que la chaleur d'hydratation dégagée pendant les premières heures du durcissement soit presque exclusivement utilisée pour chauffer le béton. Il faut aussi que le dégagement de chaleur d'hydratation soit notable et suffisamment précoce par rapport à la durée de maintien dans les moules ou les enceintes isolées.

L'auto-étuvage est souvent suffisant dans les régions tempérées pour des démoulages ou palettisations sur un cycle de 24 heures. Associé à l'emploi d'un béton chaud (15 à 20 °C en hiver) et à un accélérateur de durcissement, il permet d'éviter tout système de chauffage dans les moules ou les cellules. [36]

II.4.3 Apport de chaleur externe :

L'apport de chaleur externe permet d'élever la température du béton pour accélérer son durcissement. Cet apport peut se faire par conduction (directe ou indirecte) par les parois des moules ou des supports, par convection via l'air ou la vapeur en contact direct avec le béton, par rayonnement, au moyen d'émetteurs à infrarouge (haut ou basse température) agissant sur le béton ou les moules. En fait très souvent ces modes de chauffage sont combinés dans des systèmes plus ou moins répandus selon leurs avantages ou inconvénients.

Le choix de tel ou tel système de chauffage externe dépend de nombreux paramètres :

- ✓ Les dimensions et natures des moules.
- ✓ L'organisation de la production : moules fixes-mobiles, cellules ou tunnel de durcissement, durées disponibles pour le chauffage.
- ✓ Le type d'énergie disponible, la puissance disponibles, les coûts en fonction des plages horaires (électricité en particulier).
- ✓ Les possibilités ou facilités de régulation, les coûts d'investissement.

Les principaux systèmes de chauffage externe répandus dans l'industrie du béton sont présentés ci-après.

II.4.3.1 Systèmes de chauffage externes pour les moules fixes :

Pour les moules ou bancs fixes (cas des grands moules ou des tables pour les éléments de façade ou d'ossatures, et cas des grands éléments de planchers), on rencontre essentiellement les chauffages par résistances électriques, par fluide caloporteur tels que l'eau chaude ou la vapeur dans des tubes chauffants, ou par apports combinés (convection, rayonnement) d'un système de chauffage placé sous les moules.

II.4.3.2 Systèmes de chauffage externe pour moules ou plateaux mobiles en tunnels ou râteliers :

Le chauffage dans des tunnels simples ou multiples (comme les râteliers à plateaux mobiles) s'utilise essentiellement pour les produits en grande série.

Cela concerne les fabrications dans des moules volumineux et couteux (qu'il faut libérer rapidement) comme c'est le cas des voussoirs de tunnels (figure II.4), ou les fabrications sur des grandes tables mobiles comme c'est le cas des prédelles. Les tunnels sont aussi largement utilisés pour le durcissement accéléré de produits démoulés immédiatement sur des plateformes mobiles comme les tuyaux ou des produits démoulés par retournement sur des plateaux comme des caniveaux ou les éléments de clôture. [37]



Figure II.4 : tunnels d'étuvage pour moules de voussoirs.

II.4.4 Apport de chaleur interne :

Après la mise en place et le compactage du béton dans les moules, il est possible de le chauffer par un processus générant la chaleur au cœur même de celui-ci. Cela présente l'intérêt de pouvoir élever très rapidement la température à cœur et donc d'éliminer les problèmes liés à la lenteur des transferts de chaleur de la surface vers le cœur du béton.

En effet dès que l'on veut pratiquer un cycle de durcissement court à température élevée (supérieure à 50°C) les écarts de températures entre les faces chauffées et le cœur dépassent souvent les valeurs admissibles (20°C). Cela impose alors de respecter des gradients limités pour la montée en température.

Les apports de chaleur à cœur d'un béton en place peuvent se faire par effet joule dans le béton, dans les armatures ou dans des résistances électriques noyées dans le béton. Ils peuvent aussi être réalisés par un champ de micro-ondes transmis au cœur du béton.

Le chauffage par effet joule dans des armatures a fait l'objet de quelques applications industrielles en particulier pour des poutres précontraintes. Une tension appliquée à chaque extrémité des aciers isolés électriquement du moule et du banc crée un effet joule par le passage du courant et donc un échauffement des aciers et du béton les entourant.

La technique de résistances électriques noyées (donc perdues) fixées au cœur d'une cage d'armature est quelquefois utilisée pour de très grands éléments à coulage unique ou lorsqu'il faut s'affranchir de risques de gel.

La technique du chauffage par micro-ondes a fait l'objet de nombreuses expérimentations en laboratoire qui ont montré sa faisabilité. Sous réserve de maîtriser les séquences d'application des micro-ondes et la puissance transmise pour éviter de dépasser des températures internes occasionnant un gonflement excessif du béton ou même son éclatement (par la pression de vapeur dans les bulles d'air présentes dans le béton), il est possible de pratiquer des chauffages et des durcissements très rapides du béton par cette technique.

Les coûts d'investissement et les difficultés de mise en œuvre de cette technique ont limité son application à quelques expérimentations industrielles.

II.5 CYCLE DE TRAITEMENT THERMIQUE DES BETONS :

En règle générale, la méthode de traitement thermique et son cycle doivent être déterminés en prenant en compte la géométrie des éléments, le type de ciment, la composition du béton, sa

plasticité ainsi que les conditions de fabrication de façon à ce que le démoulage, l'éventuelle mise en précontrainte, le levage ou le transport des éléments puissent être effectués en fin de Traitement.

Les modalités de traitement doivent être étudiées de façon à éviter tout choc thermique ainsi que l'apparition de fissures ou de défauts de surface qui pourraient nuire à la durabilité du I béton ou à l'aspect des éléments. C'est aussi l'objectif des règles définies dans la norme NF EN 13369 règles communes pour les produits préfabriqués en béton.

Ces recommandations sont communes aux différents modes de traitement réalisés avec apport 1 de chaleur ; cependant des précautions particulières doivent être prises en fonction de la technique de traitement choisie. [38]

II.5.1 Règle pour la réalisation de traitement thermique :

En général, un cycle de traitement thermique comporte quatre phases définies chacune par un couple durée-température ou bien par une vitesse :

➤ La phase de prétraitement (avant t1)

Cette phase est destinée à procurer au béton une cohésion suffisante pour qu'il puisse absorber les efforts internes occasionnés par la dilatation thermique de ses constituants, en particulier de l'eau et de l'air, au moment de l'élévation de température. Ainsi, la période de prétraitement doit être d'autant plus longue que la vitesse de montée en température de la phase qui va lui succéder est élevée.

➤ La phase de montée en température (t1 à t2)

Elle est caractérisée par une vitesse de montée (V_m) définie de la manière suivante :

$$V_m = \frac{T_p - T_0}{T_2 - T_1}$$

Avec T_p la température de fin de montée et T_0 la température de début de montée.

La vitesse de montée en température n'est généralement pas constante, elle ne doit pas dépasser 20°C/h sauf justification probante.

➤ La phase de maintien à la température de palier (t2 à t3)

La durée et la température de cette phase, au cours de laquelle le processus de durcissement du béton amorcé lors de la phase précédente se poursuit, dépendent de la maturité acquise par

le béton à la fin de la phase de montée en température, du nombre de la fabrication journalière et de la résistance que l'on cherche à obtenir.

➤ La phase de refroidissement (t_3 à t_4)

Cette phase se caractérise par la vitesse de refroidissement (V_r) :

Dans cette phase, bien que le béton soit plus résistant, donc plus apte à résister aux efforts, on doit veiller à ce que le refroidissement s'effectue de façon homogène.

La vitesse de refroidissement doit être suffisamment fiable pour éviter les chocs thermiques et les écarts de température dans l'élément traité provoquant une fissuration du béton.

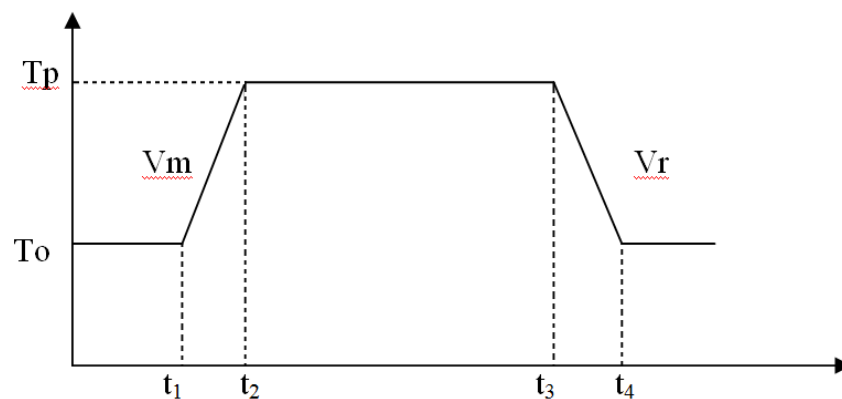


Figure II.5 : Forme général d'un cycle thermique.

II.5.2. Choix final des cycles à partir des objectifs :

Le durcissement accéléré pour objectif de procurer rapidement aux bétons une certaine résistance mécanique nécessaire, selon les cas, à la réalisation du démoulage, de la palettisation, de la manutention, du relâchement des fils de précontrainte, d'un traitement mécanique d'aspect ou de la livraison rapide de produits.

Selon ces cas et les produits concernés, les niveaux de résistance mécanique recherchés à la fin du traitement thermique sont très variés.

Le choix final d'un cycle de traitement thermique ne peut se faire qu'à partir des deux données fondamentales suivantes :

- ✓ Les résistances à atteindre liées aux objectifs visés et aux produits concernés.
- ✓ La durée totale disponible pour réaliser le cycle.[38]

II.6 DOMAINE D'UTILISATION :**II.6.1 La préfabrication :****II.6.1.1 Définition :**

La préfabrication est un procédé de construction permettant de réaliser certaines pièces d'un ouvrage en usine, afin de n'avoir qu'à les assembler, une fois acheminées sur chantier. Cette technique de fabrication est largement utilisée dans le secteur de la construction et particulièrement dans les grands projets de génie civil tels que les ponts et les immeubles. Les éléments préfabriqués peuvent être réalisés en bois, en béton ou en acier. Quel que soit leur taille ou leur forme, ceux-ci sont réalisables en usine à l'aide de machines spécifiques (réalisation de moules, etc.).

II.6.1.2 Industrie de la préfabrication :

Les exigences de la construction moderne imposent de nouveaux défis : optimiser les coûts, réduire les délais, améliorer la pérennité des ouvrages, intégrer la protection de l'environnement...

L'industrie du béton répond aux exigences du marché en proposant des solutions nombreuses grâce à :

- ✓ La multiplicité des produits, la richesse des techniques et des procédés,
- ✓ La variété des bétons (gris, colorés, allégés, à hautes performances...), la multiplicité des traitements de surface (poli, grésé, désactivé...), l'infinité des formes grâce au « moulage » en usine.

De plus, les délais limités de fabrication en usine, la disponibilité et la facilité de mise en œuvre sont des atouts pour le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre et l'entreprise.

Par ailleurs, ce secteur industriel apporte aux clients une certaine garantie sur les produits manufacturés. En effet, il apporte la maîtrise d'un matériau aux qualités reconnues, des processus industriels éprouvés à tous les stades de fabrication des produits, l'expérience de la qualité et des performances contrôlées à un coût global compétitif.

- **Un matériau aux qualités reconnues :**

Le béton a longtemps hérité d'une image négative liée à la confusion entre l'urbanisme des années 60 et le matériau lui-même.

Ses qualités traditionnelles sont aujourd'hui reconnues : durabilité, résistance mécanique et aux agressions chimiques, tenue au feu, qualités acoustique et thermique. D'autres atouts sont valorisés comme la possibilité de recyclage, la qualité environnementale d'un matériau naturel dont la fabrication nécessite peu d'énergie.

- **Des processus de fabrication contrôlés :**

Le contrôle de la qualité effectué à tous les stades de fabrication et la maîtrise des processus sont des gages de fiabilité des solutions proposées.

- **Des performances certifiées :**

L'industrie du béton a été l'un des premiers secteurs industriels de la construction à proposer des produits de qualité certifiée.

- **Un coût global compétitif :**

La durabilité des produits en béton, leur modularité et les facilités de maintenance positionnent très favorablement les produits en béton en termes de coût global (investissement et coût d'exploitation).

Les produits préfabriqués sont de diverses natures. Il peut s'agir d'éléments en béton armé ou en béton précontraint ou en composés mixte (polystyrène ou fibre végétale ...). On peut aussi rencontrer des éléments à usage divers comme des éléments structuraux horizontaux (dalles, prédalles, poutres ...), ou verticaux (poteaux, voile, blocs...), des éléments d'équipement (garde corps, escalier ...) ou encore des éléments architectoniques (dalles de couverture ...).

Cette étude va se préoccuper de la préfabrication « lourde » et plus particulièrement des éléments préfabriqués précontraints par fil adhérent. [39]

II.6.1.3 Le béton préfabriqué :

Le béton préfabriqué est un produit en béton fabriqué en usine. Il correspond à l'industrialisation de la production de composants. La fabrication en usine de produits en

béton permet de rationaliser la production, d'apporter la qualité d'une fabrication industrielle et de réaliser une importante économie de main-d'œuvre sur le chantier. Cette production s'est axée depuis plusieurs années sur les composants de structures :

- ✓ Poteaux et poutres en béton précontraint ou armé,
- ✓ Composante de façade,
- ✓ Eléments pour plancher : prédalles, poutrelles, dalles, alvéolées,
- ✓ Escaliers, béton à bancher,
- ✓ Voussoirs de tunnel



Figure II.6 : Éléments préfabriqués

La fabrication en usine de produits en béton permet de rationaliser la production, d'apporter la qualité d'une fabrication industrielle et de réaliser une importante économie de main-d'œuvre sur le chantier. La gamme des éléments élaborés en usine est très diverse, depuis l'élément standardisé comme le bloc jusqu'à des éléments qui ont plusieurs avantages, dont la disponibilité sur catalogue et leurs possibilités d'assemblage.

L'opération de la fabrication du béton préfabriqué (Figure II.7) généralement se compose de la préparation du béton frais, la préparation des armatures (mailles, cadres, treillis soudé etc.), la mise en œuvre des armatures, le bétonnage et compactage (par vibration), le durcissement (cure).

Pour fabriquer certains types d'éléments en béton préfabriqué (escalier, blocs à bancher etc.) il est obligatoire de porter des opérations supplémentaires.

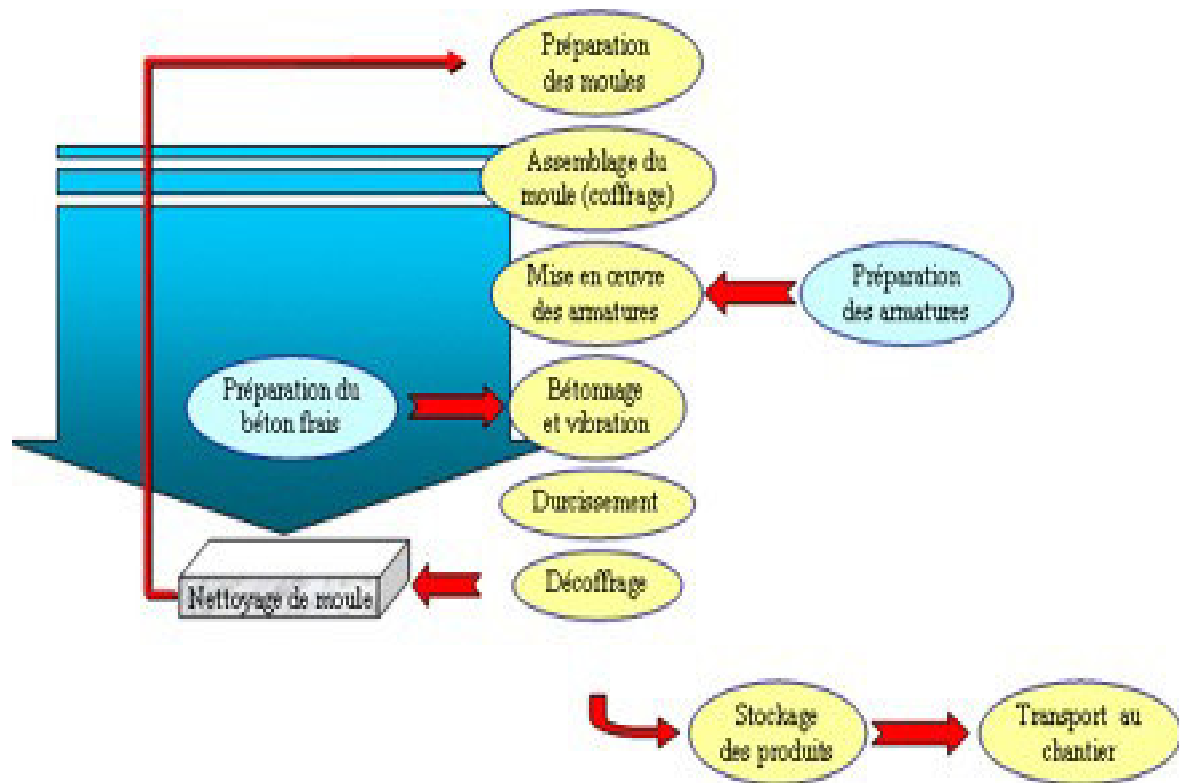


Figure II.7 : Schéma de la production du béton préfabriqué

II.6.1.4 Production du béton préfabriqué :

Les conditions de fabrication et les conditions environnementales sont facilement contrôlées dans une usine de préfabrication de béton. La production d'éléments en béton préfabriqué se fait dans les conditions contrôlées d'une usine fermée. Cela rend facile le contrôle des déchets, des émissions, des niveaux sonores, etc. de fabrication en comparaison avec les mêmes processus sur un chantier. Pour des qualités semblables de béton, la consommation de matières premières est similaire, que la production ait lieu dans une usine, dans une usine de béton prêt à l'emploi ou sur un chantier. La perte de matières premières est minime lors de la production de béton préfabriqué.

L'utilisation de nouvelles technologies comme le béton auto-plaçant (BAP) peut significativement réduire le bruit et le recours aux vibrations dans le processus de production.

La réduction des coûts et des économies substantielles peuvent être réalisées dans la consommation des ressources naturelles et des matériaux structuraux dans le cadre d'une production contrôlée.

II.7 COMPORTEMENT DES BETONS SOUS L'EFFET DE TRAITEMENT THERMIQUE :**II.7.1 Béton frais :****II.7.1.1 Effet sur la cinétique d'hydratation :**

Principalement, les matériaux cimentaires sont eux mêmes une source de chaleur. En effet, les réactions d'hydratation produites lors du mélange du ciment avec l'eau sont largement exothermiques.

Cependant, l'apport d'une chaleur extérieure par traitement thermique accélère cette réaction d'hydratation. Certaines études montrent que l'hydratation des C3S et du ciment portland est proportionnelle à la température du béton frais.

On constate que la chaleur d'hydratation augmente significativement lorsque la température est supérieure à 25°C. Ainsi les réactions d'hydratation entre le ciment et l'eau sont d'autant plus rapides que les températures du traitement thermique sont élevées. Le temps de prise sont réduits d'autant.

II.7.1.2 Effet sur la microstructure :

L'accélération de l'hydratation du ciment par l'étuvage s'accompagne généralement d'une microstructure plus grossière de la pâte hydratée. PANA montre que le degré d'hydratation des pâtes de ciment portland est plus élevée lorsque les températures d'étuvage sont plus faibles. Une explication de ce phénomène est proposée par VERBECK et HELMUTH : aux faibles températures, les éléments chimiques peuvent diffuser dans la matrice cimentaire et précipitent uniformément alors qu'à haute température, l'accélération des réactions d'hydratation est telle que la plupart des produits d'hydratation s'agglomèrent près des grains de ciment et ne remplissent pas l'espace interstitiel.

Plusieurs études confirment ces résultats en montrant une augmentation de la perméabilité avec la température d'étuvage, pour des pâtes de ciment.

En étudiant les pâtes de ciment hydratées aux différentes températures depuis 5° jusqu'à 50°C, KJELSEN et AL concluent qu'une augmentation de la température d'étuvage provoque une augmentation de la porosité.

II.7.1.3 Effet sur les produits d'hydratation :

Les produits formés par l'hydratation à 20°C sont identiques à ceux formés lors d'un traitement thermique de type étuvage sous réserve que la température maximale ne dépasse pas les 75°C (selon le type de ciment). On retrouve des C-S-H, de la portlandite et des aluminates hydratés.

➤ Les CSH:

Concernant les gels de C-S-H développés avec une élévation de température, on peut dire que:

- ✓ Le degré de cristallisation est apparemment peu modifié,
- ✓ Le rapport CaO/SiO_2 évolue peu jusqu'à une température de 75°C [older 1987],
- ✓ Ils renferment une quantité moindre d'eau chimiquement liée en comparaison à une matrice mûrie à 20°C [older 1987],
- ✓ La microporosité des c-s-h internes (formés dans le grain anhydre) diminue [kjellsen 1967],
- ✓ Les c-s-h externes (ceux formés entre les grains anhydres) changent de morphologie, passant d'une structure à fibres courtes et enchevêtrées à 20°C à une structure à fibres longues et dissociées à 80°C.

➤ La portlandite :

La température élevée permet une grande formation de la portlandite. à température ambiante la portlandite possède une morphologie de type lamellaire contrairement dans les conditions de températures élevées ou la portlandite se trouve sous forme de paquets de forte densité.

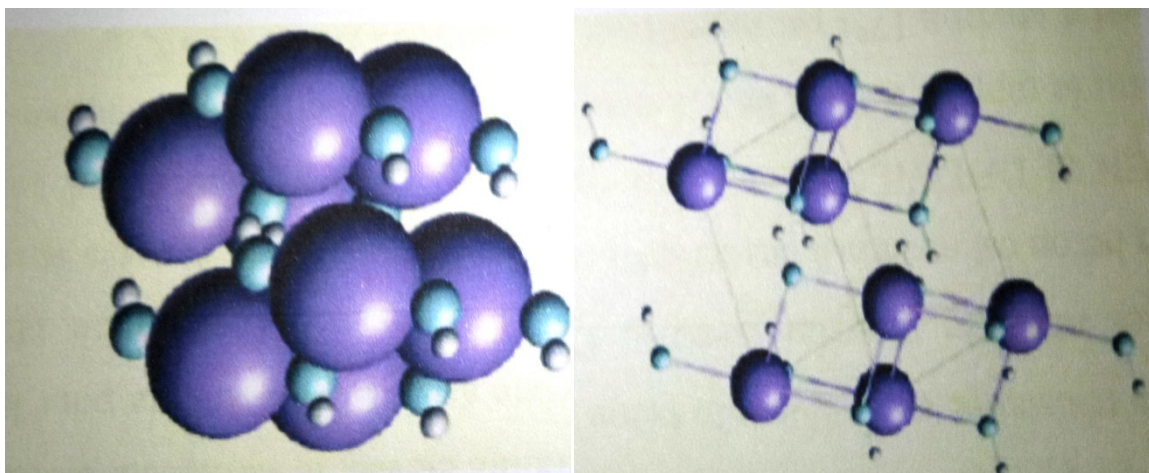


Figure II.8 : représentation structurels de la portlandite [Henderson 1962]. [1].

A l'interface entre le granulat et la pâte de ciment et pour une température de 20°C, la portlandite est très étendue parallèlement à cette interface. En revanche, pour une température de 60°C, elle s'ordonne en petit cristaux compact [OLIVIER 1981, KJELLSSEN1996]. Malgré ses observations, les études restent contradictoires sur les phénomènes engendrés au niveau de l'interface pâte, granulat lors d'un étuvage car ils dépendent de la concentration en CH formée, du cycle d'étuvage et des ponts chimiques pouvant se former entre le granulat et la matrice [Clark 1992, Platel 1995].

II.7.2 béton à l'état durci :

Le critère essentiel demandé au béton étuvé utilisé pour ce procédé de préfabrication est de réunir es performances mécaniques élevées au jeune âge tout en gardant de bonnes propriétés mécaniques à long terme [CASSAGNABERE 2007]. Cependant, d'autres exigences peuvent intervenir au niveau de formulation de ces bétons spéciaux comme la durabilité et les déformations différées.

II.7.2.1 Effet sur la résistance :

Le traitement thermique permet d'augmenter la résistance mécanique du béton au jeune âge, de nombreuses études montrent que cette tendance s'inverse à 28jours et au-delà [26, 27, 28,29], lorsque la température est élevée, le traitement thermique accélère la prise de résistance mécanique du béton au jeune âge mais est néfaste pour les résistances mécaniques atteintes plus tardivement. Cet effet se constate de manière plus prononcée lorsque le béton est soumis à des températures élevées immédiatement après sa mise en place. KJELLSSEN et DETWILLER montrent également que, pour des mortiers à base de ciment portland ou le rapport E/c est de 0.5 étuvé à 50°C, la perte de résistance mécanique aux âges avancés est d'environ 17% par rapport aux mêmes mortiers étuvés à 20°C.

CHAPITRE III :

Etude expérimentale

III.1 METHODOLOGIE ET OBJECTIF DU TRAVAIL PRATIQUE

Pour bien déterminer l'influence des traitements thermique sur le béton autoplaçants de différents ajouts à l'état durci par des caractéristiques mécaniques, on a choisi trois types d'ajouts, le calcaire, la pouzzolane, la fumée de silice.

La première partie : Est destiné à la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques.

- ✓ Ciment : CRS 42.5 de LAFARGE (CHF-CEM III/A 42.5 N).
- ✓ Sable : Bouzegza (0/3) et Boussaâda(0/1).
- ✓ Gravier : Bouzegza (3/8 et 8/15).
- ✓ Eau de gachage.
- ✓ Ajouts : fumée de silice, filler de calcaire, pouzzolane.
- ✓ Adjuvant : superplastifiant et accélérateur de durcissement **Glenium 51**.

La deuxième partie : Traite de la formulation d'un BAP à base de trois types d'ajout (fillers de calcaire, pouzzolane , fumée de silice) selon la méthode japonaise.

La troisième partie : Traite le malaxage, la confection et la conservation des éprouvettes, le traitement thermique des BAP et les essais sur les BAP à l'état frais et à l'état durci pour les BAP étuvés et non étuvés.

III.2 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

Le béton est constitué de ciment, de granulats, d'eau et éventuellement d'adjuvants ou d'ajouts étant donné la grande diversité des matériaux qui sont à notre disposition sur le marché il s'avère obligatoire de préciser ceux que nous avons adoptée. Les caractéristiques physico-chimiques de ses matériaux d'études sont également présenter pour analyser et justifier ultérieurement les résultats d'essais .

Les matériaux utilisés dans notre travail sont les suivants :

III.2.1 Le sable :

Les sables utilisés sont : le sable grossier de Bouzegza (0/3) et le sable fin de Boussaada (0/1). Les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique du sable de Bouzegza et le sable de Boussaada sont données dans les tableaux suivants :

Tableau III.1 : Caractéristique physique du sable grossier de Bouzegza.

Caractéristique	Résultats	unité
Masse volumique apparente	1.58	g/cm ³
Masse volumique absolu	2.66	g/cm ³
Teneur en eau	0.47	%
Equivalent sable ESV ; ESP	77.2 ; 71.32	%
Absorption	0.60	%
Module de finesse	3.06	%

Tableau III.2 : Analyse granulométrique du sable grossier de Bouzegza.

Tamis ouverture (mm)	Retenu partiel (gr)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)
5	0	0	0	100
4	82.8	82.8	6.9	93.1
2	538.8	621.6	52	48
1	242.4	864	72.34	27.66
0.5	127	991	82.97	17.03
0.125	103.4	1094.4	91.63	8.37
0.063	19.2	1113.6	93.24	6.76
Fond de tamis	0.4	1114	93.27	6.73
Module de fines	3.06			

❖ Remarque :

On remarque que le sable de Bouzegza à un module de finesse élevé (3.06) donc une correction nécessaire avec le sable fin de Boussaada.

Tableau III .3 : Caractéristiques physiques du sable fin de Boussaada.

Caractéristique	Résultats	unité
Masse volumique apparente	1.54	g/cm ³
Masse volumique absolu	2.63	g/cm ³
Teneur en eau	3.15	%
Equivalent sable ESV ; ESP	67.2 ; 61.2	%
Absorption	1,20	%
Module de finesse	0.94	%

Tableau III.4 : Analyse granulométrique du sable fin de Boussaada.

Tamis ouverture (mm)	Retenu partiel (gr)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)
2	0	0	0	100
1	1.2	1.2	0.12	99.88
0.5	1.2	2.4	0.24	99.76
0.125	906.2	908.6	93.72	6.28
0.063	48.8	957.4	98.76	1.24
Fond de tamis	0.2	957.6	98.78	1.22
Module de fines	0.94			

- **Correction du sable selon Abrams :**

On a fait la correction du sable de Bouzegza par le sable de Boussaada (sable fin) selon la méthode d'Abrams. On a trouvé la fraction suivante :

$$\%S_{0/3} = ((Mf_d - Mf_{S(0/1)}) / (Mf_{S(0/3)} - Mf_{S(0/1)})) * 100$$

$$= ((2.5 - 0.94) / (3.06 - 0.94)) * 100$$

$$= 73.5\%$$

$$\%S_{0/3} = ((Mf_{S(0/3)} - Mf_d) / (Mf_{S(0/3)} - Mf_{S(0/1)})) * 100$$

$$= ((3.06 - 2.5) / (3.06 - 0.94)) * 100$$

$$= 26.5\%$$

La vérification est faite par l'analyse granulométrique du sable corrigé.

Tableau III.5 : Analyse granulométrique du sable corrigé.

Tamis ouverture (mm)	Retenu partiel (gr)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)
5	0	0	0	100
4	50.71	50,715	5,0715	94.92
2	331.29	382,2	38,22	61.78
1	149.81	532,017	53,2017	46.8
0.5	78.45	610,4655	61,04655	38.96
0.125	311.37	921,8385	92,18385	7.82
0.063	25.19	947,028	94,7028	5.3
Fond de tamis	0.28	947,3015	94,73015	5.27
Module de fines	2.49			

III.2.2 gravier :

Les graviers utilisés dans notre étude sont les graviers 3/8 et 8/15 de Bouzegza.

Les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique de ses graviers sont donnée dans les tableaux 6, 7, 8, 9 :

Tableau III .6 : Caractéristiques physiques du gravier 3/8.

Caractéristique	Résultats	unité
Masse volumique apparente	1.5	g/cm ³
Masse volumique absolu	2.69	g/cm ³
Teneur en eau	0.3	%
Absorption	0.32	%
LOS ANGLES	23.55	%

Tableau III.7 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.

Tamis ouverture (mm)	Retenu partiel (gr)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)
10	0	0	0	100
8	12	12	0,70588235	99.3
6.3	608.6	620.6	36,5058824	63.5
5	735.2	1355.8	79,7529412	20.25
4	279.6	1635.4	96,2	3.8
2	42.8	1678.2	98,7176471	1.29
1	2.6	1680.8	98,8705882	1.13
Fond tamis	1.2	1682	98,94	1.06

Tableau III.8 : Caractéristiques physiques du gravier 8/15.

Caractéristique	Résultats	unité
Masse volumique apparente	1.5	g/cm ³
Masse volumique absolu	2.69	g/cm ³
Teneur en eau	0.4	%
Absorption	0.48	%
LOS ANGLES	26.48	%

Tableau III.9: Analyse granulométrique du gravier 8/15.

Tamis ouverture (mm)	Retenu partiel (gr)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)
16	0	0	0	100
14	410.2	410.2	13,2322581	86.77
12.5	725.2	1135.4	36,6258065	63.38
10	1358.2	2493.6	80,4387097	19.57
8	386.6	2880.2	92,9096774	7.1
6.3	132	3012.2	97,1677419	2.84
5	50.2	3062.4	98,7870968	1.22
Fond tamis	2.2	3064.2	98.84	1.16

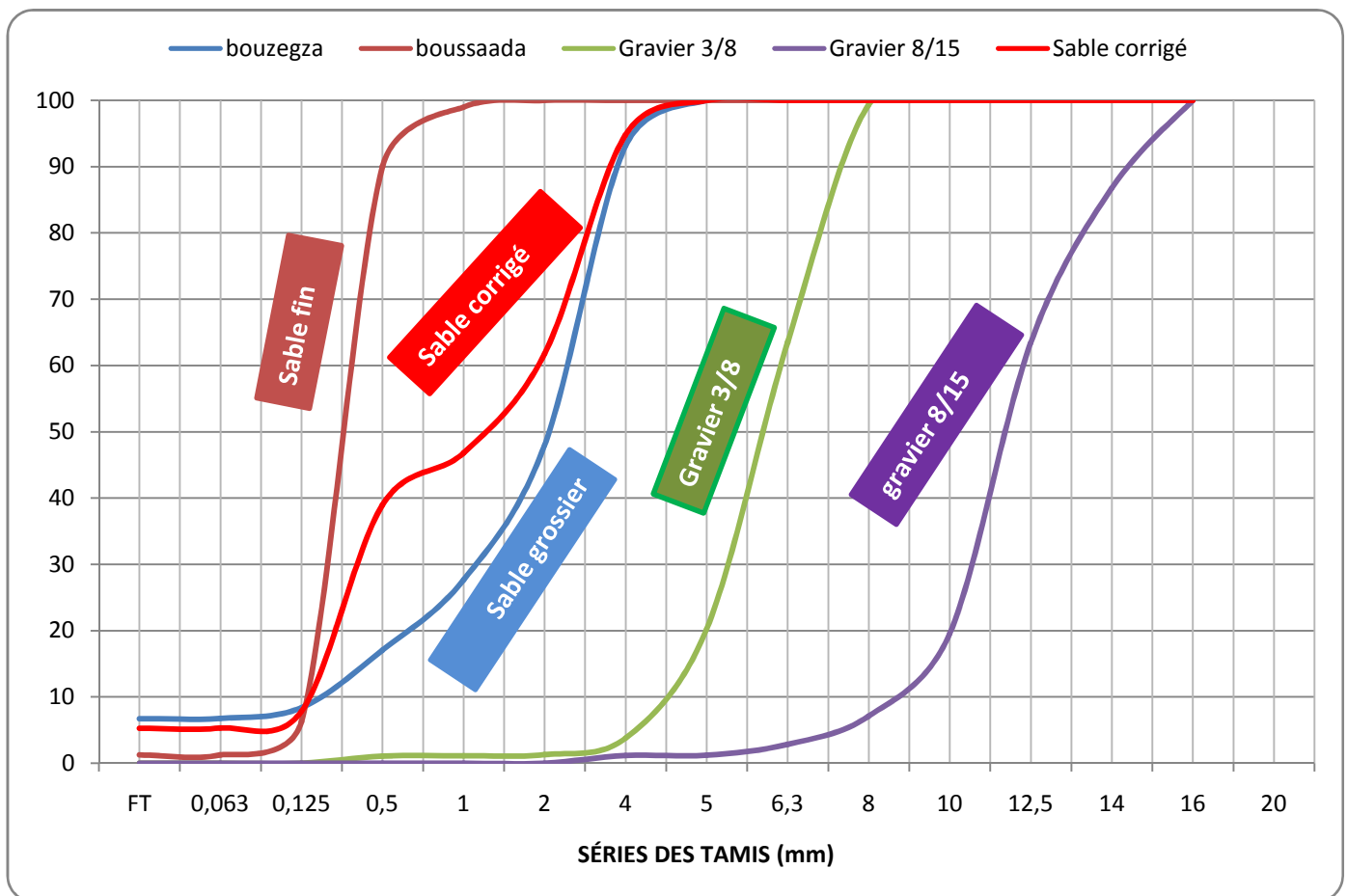


Figure III.1 : Analyse granulométrique par tamisage NF P18-560.

III.2.3 Ciment

Dans cette étude on a utilisé un ciment CRS (ciment résistant aux sulfates), c'est un ciment de haut fourneau (CHF-CEM III/A 42.5 N). C'est un est un ciment résistant aux sulfates, c'est le résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de laitier de haut fourneau et du gypse.

Ce ciment répond aux exigences des normes algériennes la NA 443.

Les propriétés du ciment sont données dans les tableaux suivants :

Tableau III.10 : Composition minéralogique du CHF-CEMIII/A.

Minéraux	Pourcentage(%)
C3S	57-62
C3A	≤ 3
C4AF	10-13
C2S	14-18

Tableau III.11 : Composition chimiques du ciment CHF-CEMIII/A.

Eléments	%
SiO₂	24.96
Al₂O₃	5.68
Fe₂O₃	3.47
CaO	59.06
MgO	2.48
K₂O	0.64
Na₂O	0.22
SO₃	1.99
CaO libre	0.793
Cl	0.021
Ins	1.22
P.F	0.99

➤ **Les propriétés physiques et mécaniques du ciment CHF-CEMIII/A :**

Les résultats des essais physique et mécaniques sur le ciment employé sont donné dans les tableaux N° 10 et 11 :

Tableau III.12 : Résultats des différents essais physiques sur le ciment CRS.

Caractéristiques	résultats	Unité
Consistance normal	27	%
Début de prise	2 :40	Heur : Mn
Fin de prise	3 :45	Heur : M n
Masse spécifique	3.1	g/cm ³
Surface spécifique	3200	cm ² /g

Tableau III.13 : Résultats des essais mécaniques du ciment CRS

Age	2 jours	7 jours	28 jours
Resistance a la compression (MPa)	19.3	33.5	45.7
Resistance a la flexion (MPa)	3.1	5.2	6.5

➤ **Domaine d'application**

- ✓ Il est utilisé comme ciment de base pour les travaux de génie civil en milieu agressif
- ✓ Il est utilisé dans les travaux de bétons nécessitant une faible chaleur d'hydratation

III.2.4 Fillers

Dans cette étude nous avons utilisé trois types de fillers : les fillers du calcaire, pouzzolane et la fumée de silice.

III.2.4.1 le calcaire

Les fines de calcaires utilisés proviennent de la région de Meftah.

Les caractéristiques physico-chimiques et la composition chimique du calcaire employé sont consignées respectivement dans les tableaux suivants :

Tableau III.14 : Les caractéristiques physico-chimiques des fillers de calcaire employé

Forme	Poudre
Couleur	blanche Q
Surface spécifique de Blaine (cm^2/g)	8000 cm^2/g
Masse volumique absolu (g/cm^3)	2.67
Masse volumique apparente (g/cm^3)	0.58

Tableau III.15 : Composition chimique du calcaire.

Eléments	%
SiO₂	0.78
Al₂O₃	0.28
Fe₂O₃	0.22
CaO	54.54
MgO	0.60
K₂O	0.04
Na₂O	0.01
SO₃	0.04
Cl⁻	0.004
P.F	43.45

III.2.4.2 pouzzolane

Nous avons utilisé une pouzzolane naturelle d'origine volcanique extraite de la région de Beni-Saf(Algérie).

Les caractéristiques physico-chimiques et la composition chimique de cette addition sont consignées respectivement dans les tableaux suivants :

Tableau III.16 : Les caractéristiques physico-chimiques des fillers de pouzzolane.

Forme	Poudre
Couleur	Gris
Surface spécifique de Blaine (cm^2/g)	6000
Densité absolu (g/cm^3)	2.63
Densité apparente (g/cm^3)	0.55

Tableau III.17 : Composition chimique de la pouzzolane.

Eléments	%
SiO₂	44.64
Al₂O₃	19.28
Fe₂O₃	10.53
CaO	9.38
MgO	4.18
SO₃	0.03
K₂O	1.95
Na₂O	2.76
P₂O₅	0.97
TiO₂	2.32

II.2.4.3 Fumée de silice

La fumée de silice utilisée dans notre travail commercialisée sous le nom SIKA S95 DM. C'est une silice ultra fine issue de l'industrie de la fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium.

Les caractéristiques et la composition chimique de cette addition sont consignées respectivement dans les tableaux suivants :

Tableau III.18 : Les caractéristiques des fillers de fumé de silice.

Forme	Poudre
Couleur	Gris
SSB (cm²/g)	230000
Densité absolu (g/cm³)	2.24
Densité apparente (g/cm³)	0.45

Tableaux III.19 : Composition chimique du fumé de silice.

Eléments	%
SiO ₂	95%
Al ₂ O ₃	0.52
Fe ₂ O ₃	0.92
CaO	1.29
MgO	0.51
K ₂ O	1.31
Na ₂ O	0.6
Cl-	0.06
SiC	1.5

III.2.5 Eau de gâchage

L'eau de gâchage est l'eau potable de la wilaya d'Alger.

III.2.6 Adjuvant

➤ Description

Glenium 51 est un adjuvant liquide non chloré d'une nouvelle génération chimique à base de polycarboxylique d'éther modifié. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton à la haute qualité, durabilité, performance mécanique initial et final élevés sont requises

➤ Caractéristiques

Les caractéristiques du Glenium 51 sont données dans le tableau

Tableau III.20 : Caractéristiques du Glenium 51.

Forme	Liquide
Couleur	Brune
PH	7.0 ± 1
Densité	1.10 ± 0.02
Teneur en chlore (%)	< 0.1
Extrait sec (%)	30 ± 2
Teneur en nitrate (%)	< 2

➤ **Domaine d'application**

Glenium 51 est particulièrement adapté à l'industrie de la préfabrication. En effet ses performances permettent de diminuer la température de l'étuvage en conservant, voire en améliorant les caractéristiques mécaniques requises à jeune âge. De plus, la durabilité des éléments fabriqués est améliorée par la diminution des effets néfastes des températures élevées (chocs thermiques, microfissurations).

Le Glenium 51 est plus généralement utilisé pour l'élaboration de bétons à hautes performances avec des résistances mécaniques initiales et finales très élevées.

➤ **Propriétés**

Le Glenium 51 permet d'obtenir des bétons maniables avec de très fortes réductions d'eau, ce qui garantit des bétons de haute qualité.

Le Glenium 51 apporte les avantages suivants au niveau de la mise en place, de performances et de la qualité intrinsèque du béton.

Augmente :

- La résistance à la compression à jeune âge et à long terme
- La résistance à la flexion à jeune âge et à long terme
- Le module d'élasticité
- L'adhérence sur les aciers
- La résistance à la carbonatation
- L'imperméabilisation
- La résistance aux agressions atmosphériques
- La qualité des parements et de la texture du béton

Diminue

- La vibration
- Le retrait
- Le risque de fissuration
- Le fluage.

➤ **Mode d'emploi**

Le Glenium 51 est un adjuvant pour béton qui doit être incorporé isolément.

L'effet optimal est obtenu par incorporation du Glenium 51 dans le béton en différé. C'est-à-dire après l'addition de 70% de l'eau de gâchage dans le malaxeur, toutefois il est possible d'incorporer le Glenium 51 dans l'eau de gâchage et éviter d'ajouter le Glenium 51 sur les granulats secs.

➤ **Recommandations**

En cas de gel, réchauffer le produit jusqu'à une température proche de 0°C et agiter mécaniquement.

➤ **Compatibilité**

- Glenium 51 est compatible avec la majorité des ciments.
- Glenium 51 n'est pas compatible avec certains plastifiants et superplastifiants. Consulter votre représentant local BASFCC pour toute synergie

➤ **Dosage**

0.3 % à 1.0% du poids du ciment, soit 0.27 Litre à 0.91 Litre pour 100 Kg de ciment.

➤ **Conditionnement**

Glenium 51 est disponible en cubitainer de 1000 Litres ou en fût de 210 Litres.

➤ **Stockage**

Stocker le **Glenium 51** dans des conditions de températures supérieures à $+5^{\circ}\text{C}$.

➤ **Précautions d'emploi**

Le **Glenium 51** ne contient aucune matière dangereuse nécessitant un étiquetage particulier. Pour de plus amples informations, se réfère à la fiche de données de sécurité.

III.3 FORMULATION DU BETON

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles projetées.

III.3.1 Application de la méthode japonaise

- **Calcul de composition du BAP par la méthode japonaise**
 - ✓ Volume du gravier par le rapport $G/S=0.09$ (proche de 1)

- ✓ Volume de la pate est de 330 a 400 kg/m³ (C+F)
- ✓ La masse de ciment : Mc=300 a 450 kg/m³
- ✓ Mf=33 a 45 kg/m³

- **Les données de base :**

On fixe E/C = 0.38

On choisi G/S = 0.9

10% d'ajout

III.3.2 Détermination de la masse de chaque constituant

On détermine les masses des constituants pour le BAP a base de fillers calcaire

On a:

$$C=430 \text{ kg /m}^3$$

$$F=43 \text{ kg /m}^3$$

$$E=0.38 (430+43)=179.7 \text{ l/m}^3$$

$$\text{Volume de la pate} = 179.7 + (43/2.67) + (430/3.1) = 334.5 \text{ l/m}^3$$

$$\text{Volume des granulates} = 1000 - 334.5 = 665.5 \text{ l/m}^3$$

On a G/S=0.9

$$G+S=665.5 \implies G=665.5-S$$

$$S=665.5/1.9=350 \text{ l/m}^3$$

$$G = 665.5 - 350 = 315.5 \text{ l/m}^3$$

Le dosage de super plastifiant est de 0.9% de la masse du ciment+fillers

$$SP=0.009(430+43)= 4.257 \text{ kg/m}^3$$

L'extrait sec du super plastifiant est de 30%

On calcule la quantité d'eau provient de super plastifiant :

$$E' = 0.7 * 4.257 = 2.98 \text{ l/m}^3$$

Donc la quantité d'eau dans 1 m^3 est de $179.7 - 2.98 = 176.7 \text{ l/m}^3$

Pour le sable on a 350 l de sable (0/3) + (0/1)

On fait la correction du sable de Bouzegza par le sable de Boussaâda (sable fin) selon la méthode d'Abrams pour trouver la masse de chaque sable par la fraction suivante :

$$\begin{aligned} \%S_{0/3} &= ((M_{fd} - M_{f_{S(0/1)}}) / (M_{f_{S(0/3)}} - M_{f_{S(0/1)}})) * 100 \\ &= ((2.5 - 0.94) / (3.06 - 0.94)) * 100 \\ &= 73.5\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \%S_{0/1} &= ((M_{f_{S(0/3)}} - M_{fd}) / (M_{f_{S(0/3)}} - M_{f_{S(0/1)}})) * 100 \\ &= ((3.06 - 2.5) / (3.06 - 0.94)) * 100 \\ &= 26.5\% \end{aligned}$$

$$S_{(0/3)} = 350 * 0.735 = 257.25 \text{ l/m}^3 \quad \Longrightarrow \quad 275.25 * 2.66 = 684.28 \text{ kg}$$

$$S_{(0/1)} = 350 * 0.265 = 92.75 \text{ l/m}^3 \quad \Longrightarrow \quad 95.75 * 2.63 = 243.9 \text{ kg}$$

Gravier :

50% de gravier (3/8) et 50 % de gravier (8/15)

$$\text{Classe 3/8: } 157.75 * 2.69 = 424.3 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Classe 8/15: } 157.75 * 2.69 = 424.3 \text{ kg/m}^3$$

$$SP = 4.257 \text{ kg/m}^3$$

On a suivi la même méthode pour les BAP avec fillers pouzzolane et fumé é de silice et voici les quantités nécessaire de chaque constituant pour former 1 m^3 du BAP dans le tableau N°21 :

Tableau III.21 : Quantités des matériaux utilisés pour 1 m³ du BAP

Type de BAP Matières	Quantité (kg)		
	BAP a base de calcaire (BAP C)	BAP a base de pouzzolane (BAP P)	BAP a base de fumé de silice (BAP F)
ciment	430	430	430
filler	43	43	43
eau	176.7	176.7	176.7
adjuvant	4.257	4.257	4.257
Gravier 3/8	424.3	423.2	422.46
Gravier 8/15	424.3	423.2	422.46
Sable 0/1	243.9	243.3	243.1
Sable 0/3	684.28	683.1	682.1

III.4 MALAXAGE DE BETON

La séquence de malaxage retenue est la suivante :

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est à axe vertical et il a une capacité de 100 litres,

La séquence de malaxage retenue est la suivante :

- Préparer les moules nécessaires pour les différents essais, vérifier leur nombre et qu'ils sont bien graissés afin de faciliter par suite le décoffrage.
- Vérifier que tout le matériel est à disposition et que les matériaux sont bien séchés.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le superpi asti fiant est ajouté à la première moitié de l'eau de gâchage.
- Peser les matériaux secs, les introduire dans le malaxeur et les prés humidifiés avec 10 % de l'eau de gâchage.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30 secondes.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant) et mélanger pendant 1 minute 30 secondes.
- Introduire la partie restante d'eau graduellement et malaxage pendant 2 minutes.
- Effectuer immédiatement les essais de caractérisation du béton frais.

Essais d'étalement Essai de la boit en L Essai de stabilité au tamis Mesure de la teneur en air

- Mettre en place les différents moules destinés aux échantillons correspondants aux essais programmés.



Figure III.2 : malaxage du béton.

III.5 CONFECTION ET CURE DES EPROUVETTES

Des moules cubiques (15x15x15) cm³ ont été réalisés pour les essais de compression, des prismes (7x7x28) cm³ pour les essais de flexion. La confection des éprouvettes est faite conformément aux normes NF P 18-404 (déc. 1981). La conservation des éprouvettes couvertes par du plastique ou métallique a été faite à l'air pendant 24h ensuite, après démoulage elles sont conservées dans l'eau à 20°C.

- ✓ 63 éprouvette cubique (15x15x15) cm³, dont 21 pour chaque béton étudié (a base calcaire, pouzzolane, et fumé de silice).
- ✓ 54 éprouvette prismatiques (7x7x28) cm³, dont 18 pour chaque béton étudié (a base calcaire, pouzzolane, et fumé de silice).



Figure III.3 Confection des éprouvettes.

III.6 CONSERVATION DES EPROUVETTES :

Après le coulage les épreuves des béton sont laissées a température ambiante. Les épreuves ayant subi un traitement thermique mettez immédiatement dans l'étuve pendant 8h. Après 24 heures toutes les épreuves sont démoulées et conservé dans l'eau sous une température de 20 °C selon la norme NF en 12390-3



Figure III.4 : Conservation des épreuves.

III.7 TRAITEMENT THERMIQUE

Notre travail est fait pour connaître l'influence du traitement thermique sur les BAP.

Après le malaxage le BAP est mis dans des moules métalliques puis on lui fait subir un traitement thermique de 60°C pendant 8 h.

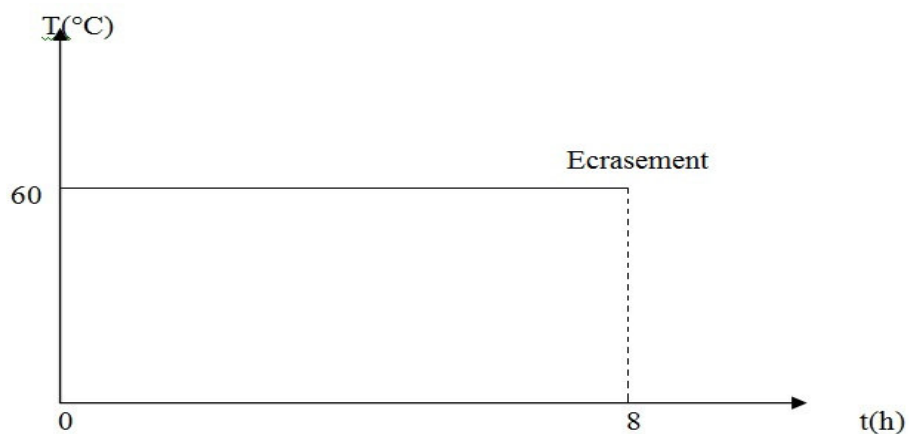


Figure III.5 : cycle d'étuvage utilisé.



Figure III.6 : Traitement thermique des BAP

III.8 ESSAIS SUR BAP

III.8.1. Essais sur les BAP à l'état frais

Pour accepter une composition comme étant celle d'un BAP, il faut s'assurer que les propriétés du béton à l'état frais obéissent à certains critères établis selon les recommandations. Les résultats des essais réalisés sur les différentes compositions de BAP à l'état frais sont résumés comme suit :

III.8.1.1 Masse volumique (NF EN 12350-6)

Le béton frais sera mis en place dans un récipient, celui-ci doit être rigide et étanche à l'eau et avec une masse et un volume connu déjà.

Après remplissage du béton dans le récipient en deux couches avec piquages, on arase sa surface avec une truelle et on le pèse ensuite pour calculer sa masse volumique selon la formule suivante :

$$MV = (m_2 - m_1) / V$$

Où :

- ✓ MV est la masse volumique du béton frais, en kilogrammes par mètre cube ;
- ✓ m_1 est la masse du récipient, en kilogrammes ;
- ✓ m_2 est la masse du récipient plus la masse de béton contenu dans le récipient, en kilogrammes;
- ✓ V est le volume du récipient, en mètres cubes.

III.8.1.2 Essais d'étalement au cône d'Abrams : (Norme de référence NF EN 12350-8)

Cet essai, simple à réaliser, est destiné à caractériser et vérifier la mobilité des bétons autoplacants dans un milieu non confiné. Il s'agit de démouler un cône normalisé (cône d'Abrams) de béton frais et de mesurer le diamètre de la galette de béton obtenue.



Figure III.7 : Essais d'étalement.

III.8.1.3 Essai de la boîte en L (norme de référence NF EN 12350-10)

Cet essai permet de caractériser la mobilité d'un BAP en milieu confiné en présence d'armatures. Dans certains cas, des blocages peuvent intervenir lorsque la densité d'armatures est telle que des voûtes de gravillons se forment et empêchent l'écoulement.



Figure III.8 : Essai de boîte en L.

III.8.1.4 Essais de stabilité au tamis (Norme de référence NF I N 12350-11)

L'essai au tamis est utilisé pour caractériser la stabilité du béton, soit son caractère à résister à la ségrégation statique : descente des gros gravillons par l'effet de la gravité et remonté de la pâte qui est légère. De plus par cet essai on peut distinguer s'il y a un problème de ressuage primaire. Soit dans les 15 minutes après la gâchée.



Figure III.9 : Essai de stabilité au tamis.

III.8.2 Essais à l'état durci (BAP étuvés et non étuvés)**III.8.2.1 Masse volumique** (NF EN 12390-7)

$$M_v = M / V$$

M_v : masse volumique.

M : masse de l'éprouvette.

V : volume de l'éprouvette.

III.8.2.2 Résistance à la compression (NA 5075NF EN 1239)

Cet essai a été effectué sur une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et cela conformément à la norme NF P 18- 406 [42].

Pour les différents BAP, trois cubes de (15x15x15cm³) par échéance ont été utilisés pour effectuer l'essai, soit après (24heures, 7jours, 28jours). Pour les BAP non étuvés et (8 heures, 24 heures, 7 jours, 28 jours) pour les BAP étuvés.

L'objectif de cet essai est de suivre l'évolution de la résistance à la compression et le comportement des BAP à la compression. L'essai de compression consiste à soumettre l'éprouvette cubique (15x15x15) cm³ de béton à l'écrasement par compression axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette.



Figure III.10 : Essais de compression

III.8.2.3 Résistance a la flexion (NF EN 12390-5)

Cette essai est effectué selon la norme NF P 18 – 407 (déc1981) sur prisme (7×7×28) cm. Le prisme est placé dans une machine automatique de flexion et soumis à une charge croissante jusqu'à sa rupture. On note alors la charge de rupture P .

On a pris la moyenne de trois éprouvettes pour chaque type de béton.

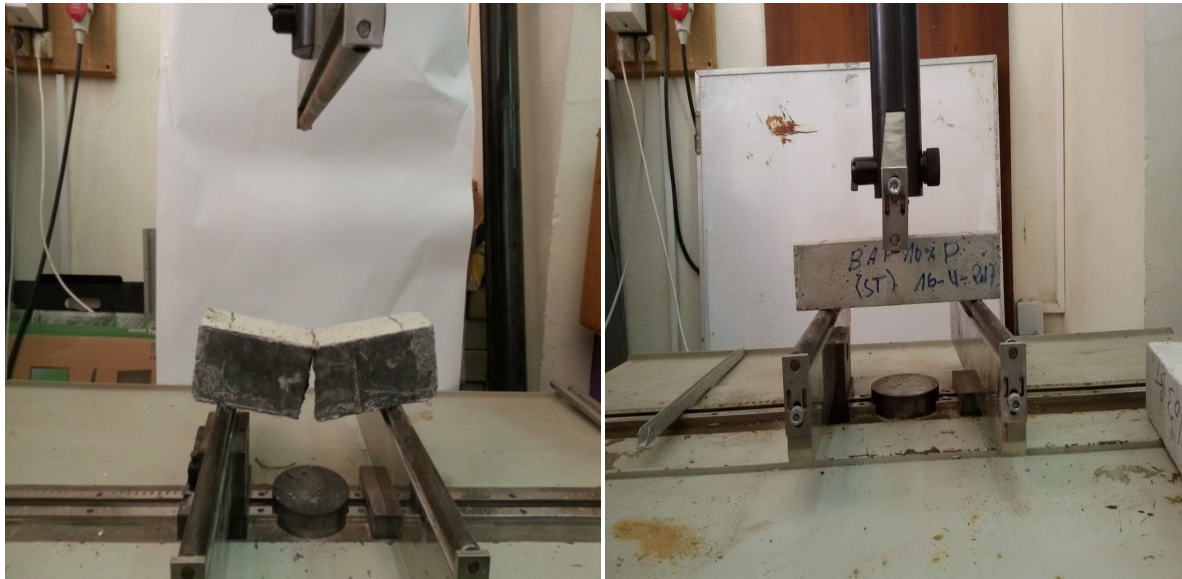


Figure III.11 : Essais de flexion.

III.8.2.4 Essais de l'ultrason (NF EN 12504-4)

Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

- **Principe**

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

Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables sont utilisées dans le récepteur.

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



Figure III.12 : Essais de l'ultrason.

- $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$ béton de faible résistance,
- $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$ béton de moyenne résistance,
- $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$ béton à haute résistance,
- $V \geq 4200 \text{ m/s}$ béton à très haute résistance.

CHAPITRE IV :

Résultats et discussions

VI.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on a étudié les différents résultats des essais rhéologiques et mécaniques sur les bétons autoplaçants à base de trois types d'ajouts minéraux (Calcaire, Pouzzolane, Fumée de silice) avec et sans étuvage, à partir de ces résultats des interprétations seront également présentés.

IV.2 RESULTATS DES ESSAIS SUR LES BAP A L'ETAT FRAIS

IV.2.1 Masse volumique (NF EN 12350-6)

Les masses volumiques des différents BAP sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Masse volumique a l'état frais des différents BAP.

Béton	BAP C	BAP P	BAPF
Mv (Kg/m ³)	2400	2420	2430

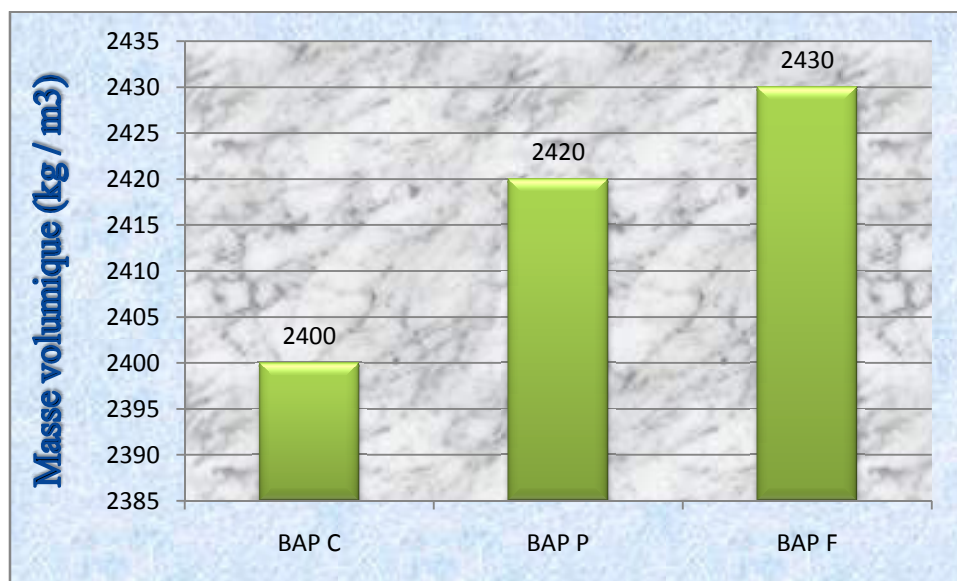


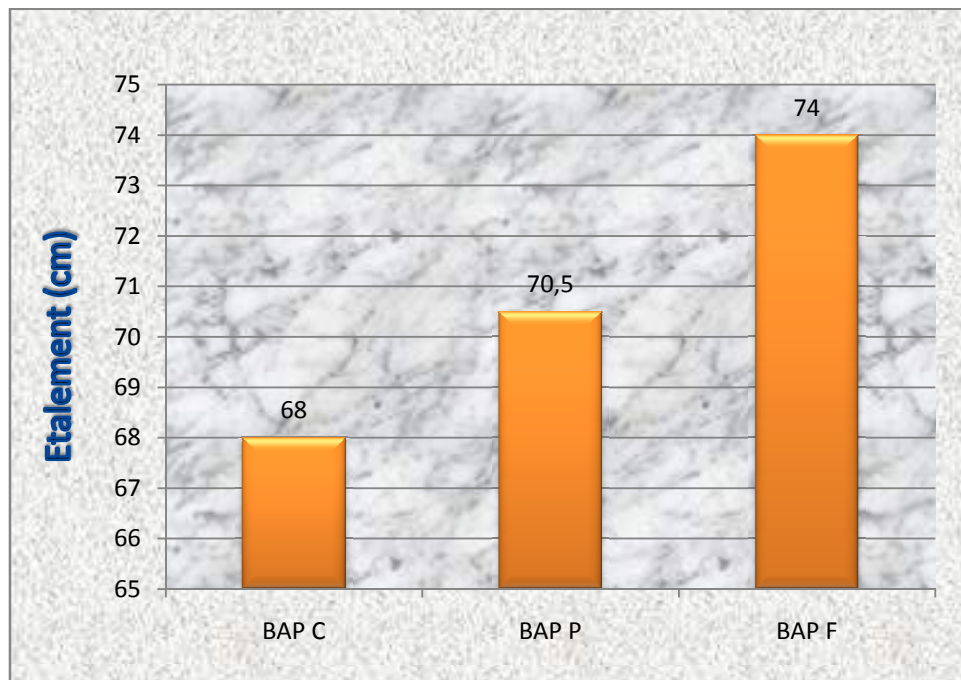
Figure IV.1 : Masse volumique des différents BAP a l'état frais.

IV.2.2 Essais d'étalement au cône d'Abrams : (Norme de référence NF EN 12350-8)

Les résultats de l'essai de l'étalement sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 : Résultats de l'essai d'étalement

Type de béton Essais	BAP C	BAP P	BAP F
Etalement cône d'Abrams (cm)	68	70,5	74

**Figure IV.2** : Evolution de l'étalement.

D'après les résultats obtenus on peut constater que les trois BAP respectent le critère d'étalement. L'étalement était compris entre 60 et 75 cm, bien qu'une limite ne soit donnée pour les temps d'étalement, les temps mesurés pour atteindre une galette de 50 cm de diamètre (t_{50}) sont proches des valeurs couramment rencontrées (3 secondes). Cependant le béton avec fumée de silice a un étalement légèrement supérieur au béton à base des fillers calcaire et de fillers pouzzolane cela est dû à la forme et la nature des particules de la fumée de silice, étant sphériques et lisses qui peuvent améliorer mieux l'écoulement de béton autoplacant.

IV.2.3 Essai de la boîte en L :(norme de référence NF EN 12350-10)

Les résultats de la boîte en L sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 : résultats de boîte en L.

Type de BAP Essai	BAP C	BAP P	BAP F
Taux de remplissage	82%	84%	87%

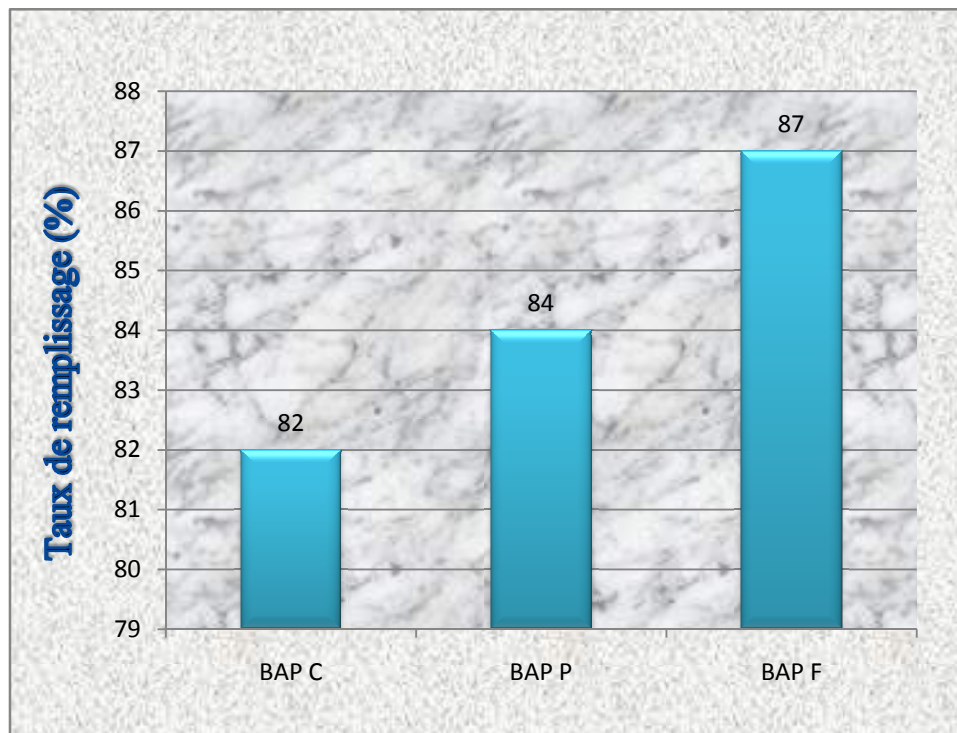


Figure IV.3 : Evolution de taux de remplissage.

Les résultats obtenus sont conformes à ce que l'on peut attendre d'un béton autoplaçant. Cependant, le plus important dans cet essai est que le béton testé s'écoule à travers les armatures correctement. Les compositions étudiées ne montrent aucun signe de blocage durant le passage à travers les armatures, aucun problème n'est à signaler pour les trois BAP. Les trois bétons présentent des taux de remplissage supérieur à 0.80, qui s'inscrivent dans le domaine des BAP.

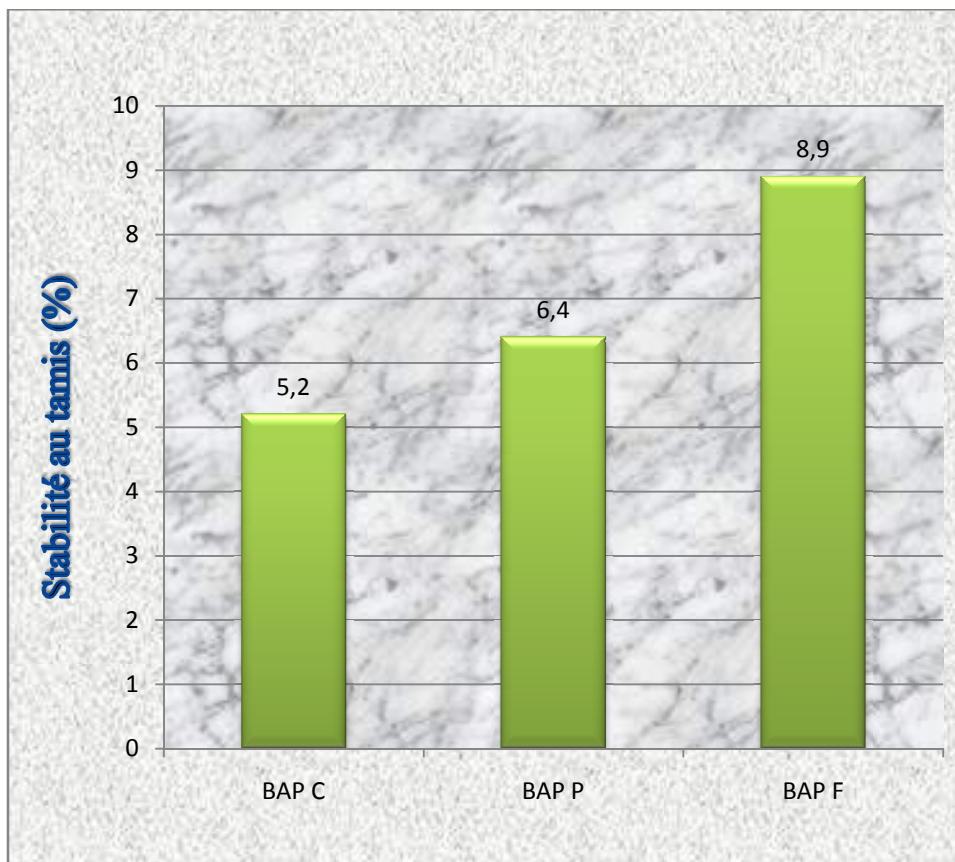
Cependant on note que le taux de remplissage le plus élevé était celui de la fumée de Silice suivie par celui de la pouzzolane et le calcaire en dernier.

IV.2.4 Essais de stabilité au tamis : (Norme de référence NF I N 12350-11)

Le tableau suivant représente les résultats de l'essai de la stabilité au tamis :

Tableau IV.4 : Résultats de l'essai de stabilité au tamis.

Type de BAP Essais	BAP C	BAP P	BAP F
Stabilité en tamis	5.2%	6.4%	8.9%

**Figure IV.4 :** Evolution de stabilité au tamis.

L'essai de stabilité au tamis permet de calculer le taux de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Les trois BAP ont un taux de ségrégation inférieur à 15%, il ne dépasse pas 7%, ce qui traduit par une bonne résistance à la ségrégation, synonyme d'une stabilité correcte.

❖ Discussion et interprétation :

D'après les résultats obtenus à travers les différents essais sur nos trois (3) BAP à l'état frais on remarque que le BAP avec fumée de silice avait des performances supérieures aux deux

(2) autres BAP utilisés (BAP avec fillers de calcaire et pouzzolane).

Cela est dû aux propriétés physiques de la fumée de silice : une forme sphérique qui aide à la maniabilité avec un SSB très élevé par rapports aux deux autres ajouts.

Les trois bétons utilisés sont conformes aux normes des BAP.

IV.3 RESULTATS DES ESSAIS SUR BAPA L'ETAT DURCI

IV.3.1 BAP non étuvé

IV.3.1.1 Masse volumique

Les masses volumiques a l'état durcis des bétons non étuvés sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.5 : Masse volumique a l'état durcis des bétons non étuvés.

Bétons	BAP C	BAP P	BAP F
Mv (Kg/m ³)	2405	2427	2440

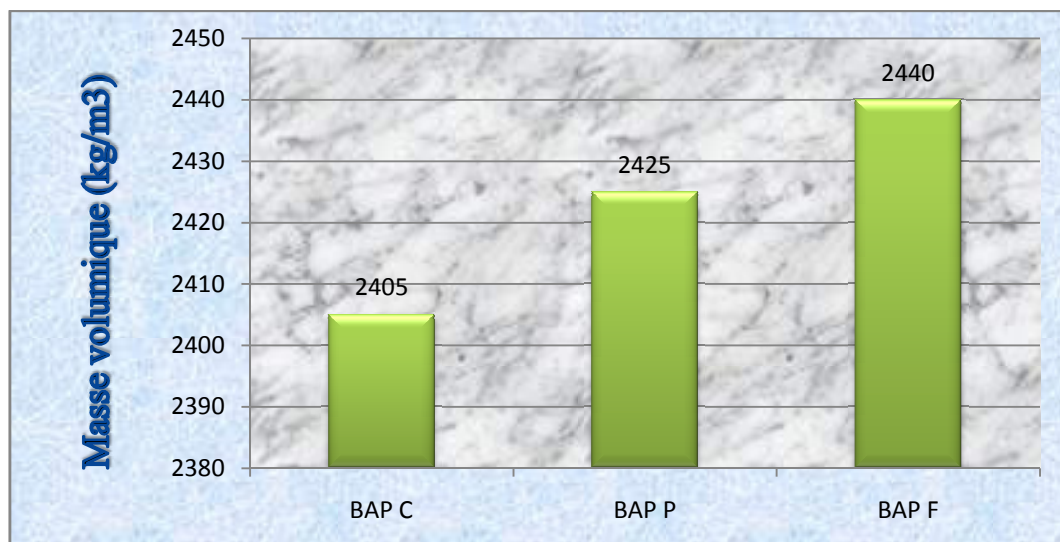


Figure IV.5 : Masse volumique des BAP non étuvés a l'état durci.

Ces résultats sont conformes a la norme des exigences des BAP.

IV.3.1.2 Resistance a la compression

Le tableau suivant représente les résistances à la compression des bétons non étuvés

Tableau IV.6 : Résistance à la compression des bétons non étuvés

Type de BAP	BAP C			BAP P			BAP F		
âge	24h	7j	28j	24h	7j	28j	24h	7j	28j
Resistance a la compression (MPa)	9.85	46.5	69.3	7.85	44.51	60.4	12.78	49.01	72.5

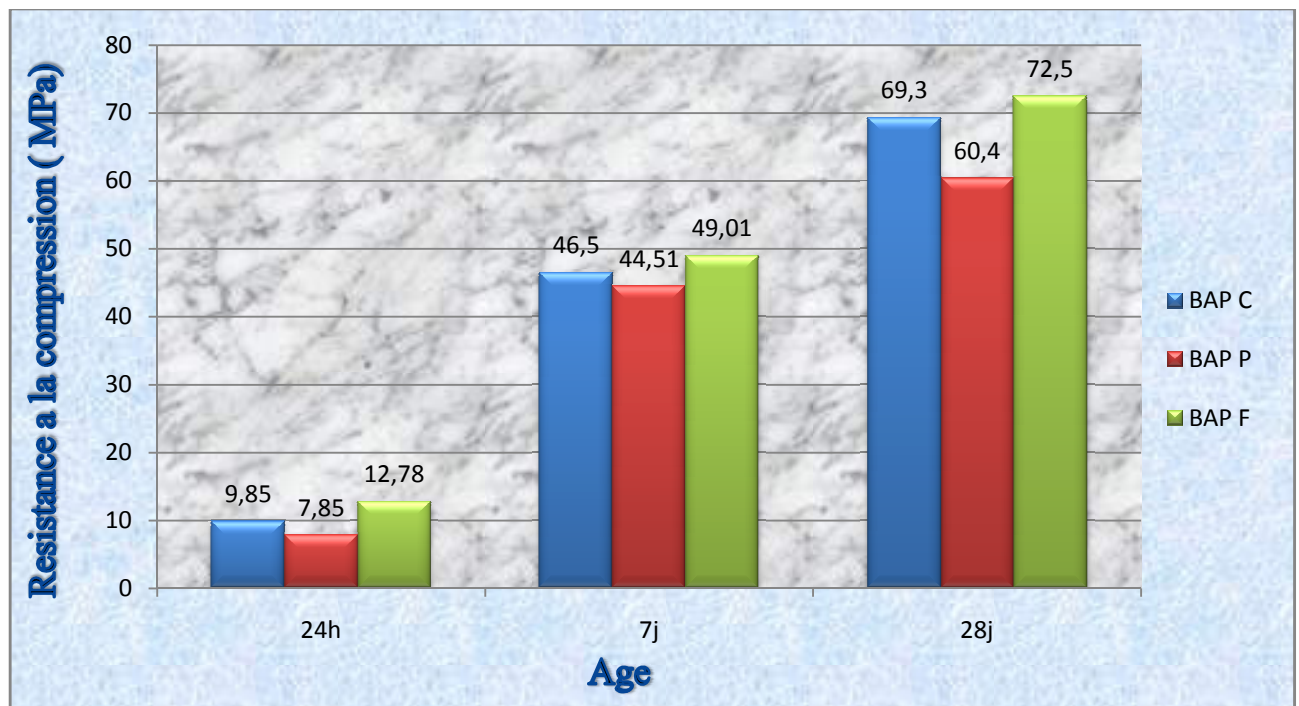


Figure IV.6 : Evolution de la résistance à la compression des BAP non étuvés.

IV.5.3.1.3 Résistance a la flexion

Ce tableau suivant représente les résistances à la flexion des bétons non étuvés :

Tableau IV.7 : Résistance a la flexion des bétons non étuvés.

Type de béton	BAP C			BAP P			BAP F		
Age	24h	7j	28j	24h	7j	28j	24h	7j	28j
Résistance a la flexion(MPa)	2.43	4.2	6.6	2.2	6.6	7.9	2.96	7.44	8.2

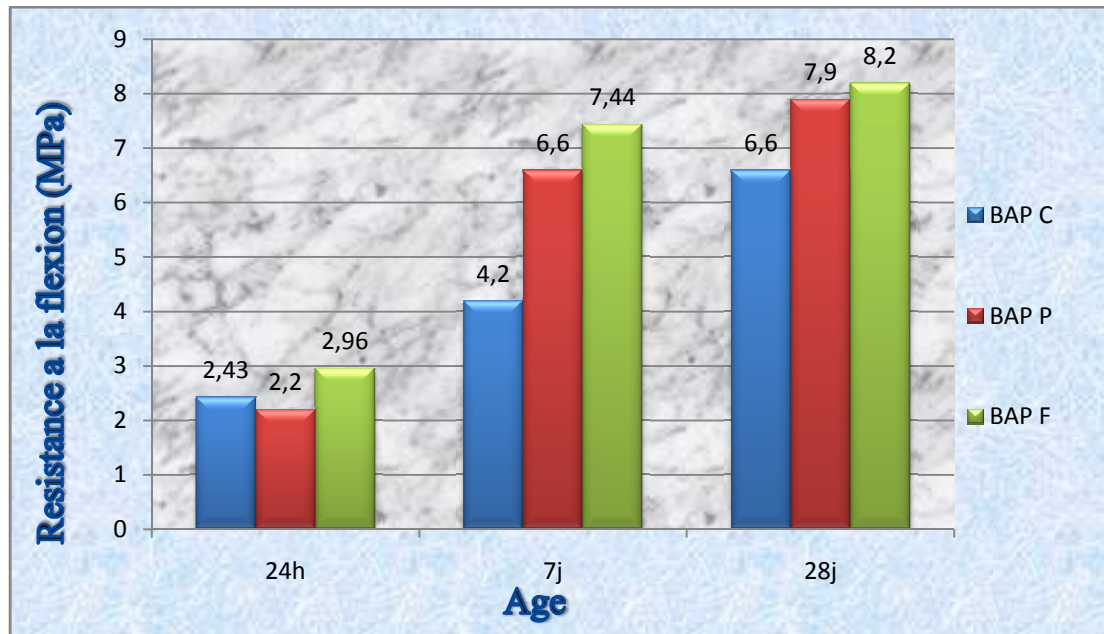


Figure IV.7 : Evolution de la résistance à la flexion pour les BAP non étuvés.

❖ Discussion des résultats :

Le BAP à base de fumée de silice à tout les âges donne de bien meilleurs résultats soit à la résistance à la compression soit à la flexion, à cause de sa finesse élevée ($23\text{m}^2/\text{gr}$) qui occupe les vides entre les grains du ciment provoquant l'augmentation de la compacité de la matrice cimentaire. Elle a aussi un effet chimique, ayant une structure amorphe à la présence de la portlandite et de l'eau, elle donne des CSH (minéral responsable de la résistance à la compression) et des CAH, ce qui va faire augmenter les propriétés mécaniques du béton à court et à long terme.

➤ Résistance à la compression :

- ✓ Après 24h : une supériorité de : 29.7% par rapport au BAP à base de calcaire, 62.8% par rapport au BAP à base de pouzzolane.
- ✓ Après 28 jours : une supériorité de : 4.6% par rapport au BAP à base de calcaire, 20% par rapport au BAP à base de pouzzolane.

➤ Résistance à la flexion :

- ✓ Après 24h : une supériorité de : 21.8% par rapport au BAP à base de calcaire, 34.5% par rapport au BAP à base de pouzzolane.
- ✓ Après 28 jours : une supériorité de : 24.2% par rapport au BAP à base de calcaire, 3.8% par rapport au BAP à base de pouzzolane.

Cependant le BAP à base de pouzzolane a obtenu de faibles résistances à la compression et à la flexion après 24h comparée aux deux autres. Mais sa résistance à la flexion a presque atteint celle du BAP à base de fumée de silice après 28 jours.

Après 28 jours le BAP à base de fillers calcaire a présenté des résistances à la compression plus hauses par rapport au BAP à base de pouzzolane de 14.7%.

Et pour cause, les fillers de calcaire agissent favorablement sur les propriétés mécaniques des BAP. En plus de leur rôle granulaire entraînant une compacité élevée et par conséquent des résistances élevées à court et à long terme. Elles peuvent avoir un effet accélérateur et participent à la formation des espèces hydratées suite à leur interaction avec le silicate tricalcique. L'activité chimique des fillers varie suivant leurs origines, dans notre cas elle est originaire de Meftah reconnue pour ses activités chimiques élevées après un broyage très fin.

IV.3.1.4 Essais de l'ultrason

La vitesse de propagation du son à travers les différents BAP mesurer après 28 jours est représenté dan le tableau suivant :

Tableau IV.8 : La vitesse de propagation des différents bétons non étuvés.

Bétons	BAP C	BAP P	BAP F
Vitesse de propagation du son (m/s)	4810	4790	4840

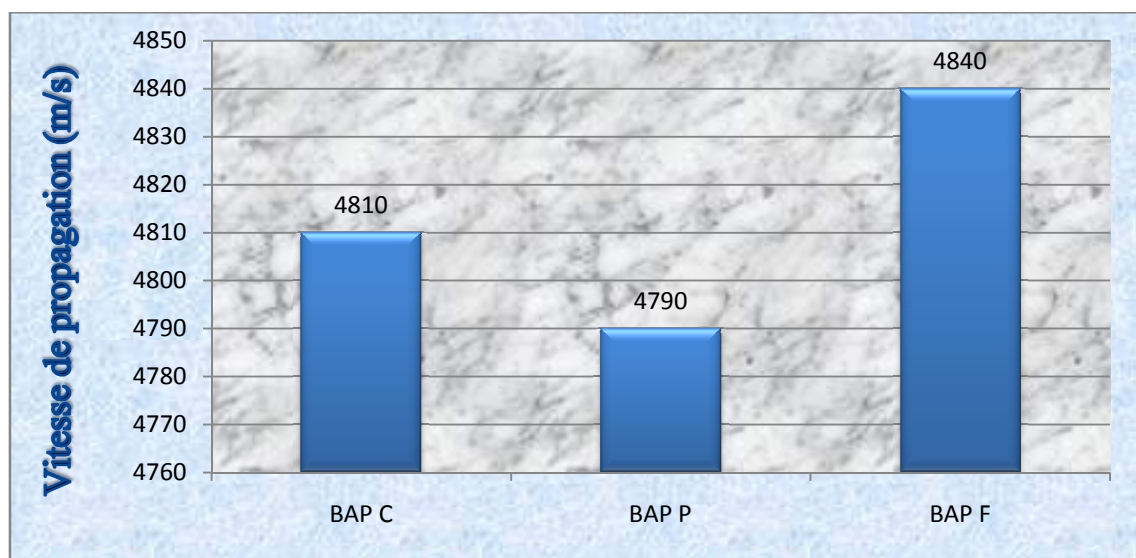


Figure IV.8 : Résultats des vitesses de propagation du son a travers les BAP non étuvés.

IV.3.2 Résultats des essais sur les BAP étuvés

IV.3.2.1 Masse volumique

Les masses volumiques des BAP étuvés sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.9 : Masse volumique a l'état durcis des BAP étuvés.

Bétons	BAP C	BAP P	BAP F
Mv (Kg/m ³)	2415	2435	2447

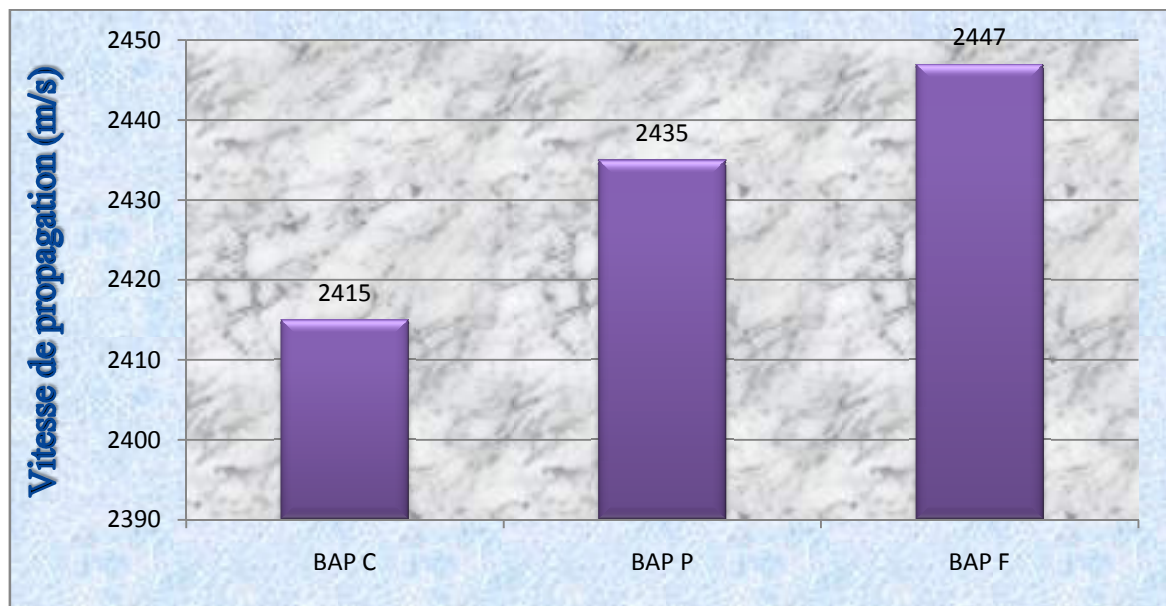


Figure IV.9 : La masse volumique des BAP étuvés a l'état durci.

- Interprétation des résultats :**

Ces résultats sont conformes à la norme des exigences des BAP.

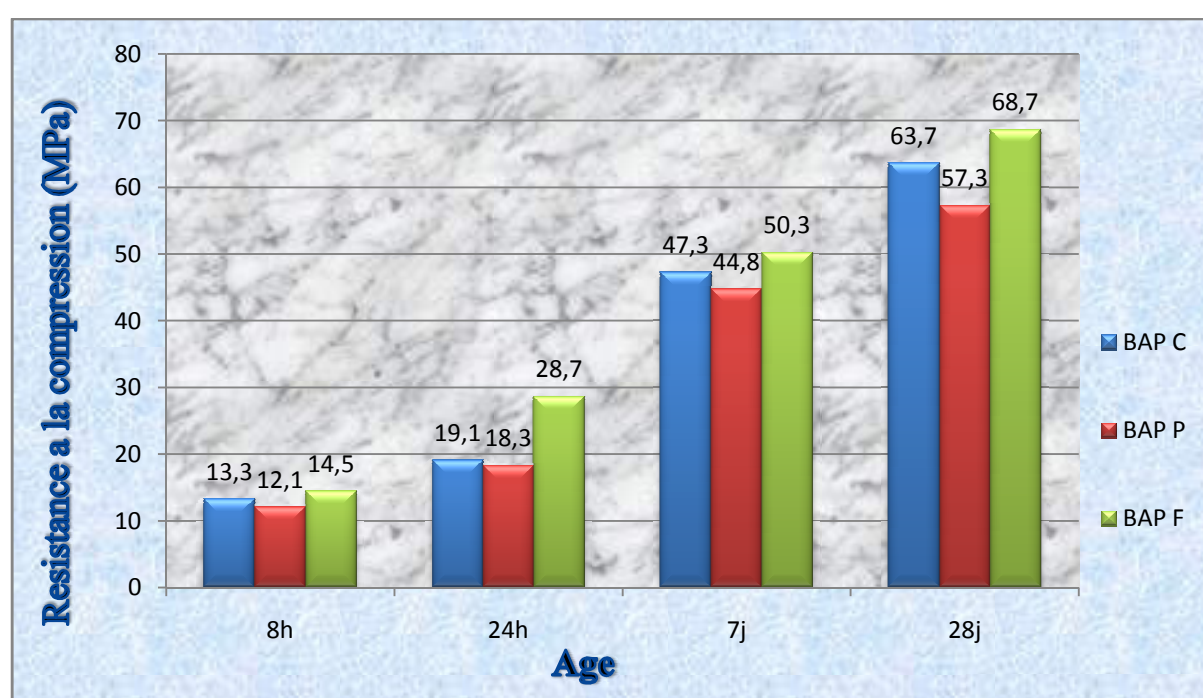
On remarque aussi une légère augmentation par rapport à la masse volumique des bétons non étuvés à jeun âge (24h) ceci est dû à l'accélération de durcissement et la formation des cristaux causés par le traitement thermique qui permet de conserver la chaleur d'hydratation et cette dernière assure une bonne hydratation et la bonne cure de béton.

IV.3.2.2 Résistance à la compression

L'évolution de la résistance à la compression des bétons étuvés sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.10 : Résistance a la compression des bétons étuvés.

Type de béton	PAP C				BAP P				BAP F			
âge	8h	24h	7j	28j	8h	24h	7j	28j	8h	24h	7j	28j
Résistance a la compression (MPa)	13.3	19.1	47.3	63.7	12.1	18.3	44.8	57.3	14.5	28.7	50.3	68.7

**Figure IV.10 :** Evolution de la résistance a la compression des BAP étuvés.

IV.3.2.3 Résistance à la flexion :

L'évolution de la résistance à la flexion des bétons étuvés sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.11 : Résistance a la flexion pour les bétons étuvés.

Type de béton	BAP C			BAP P			BAP F		
Age	24h	7j	28j	24h	7j	28j	24h	7j	28j
Résistance a la flexion(MPa)	3.66	5.25	8.28	4.3	6.23	8.6	4.5	8.01	8.9

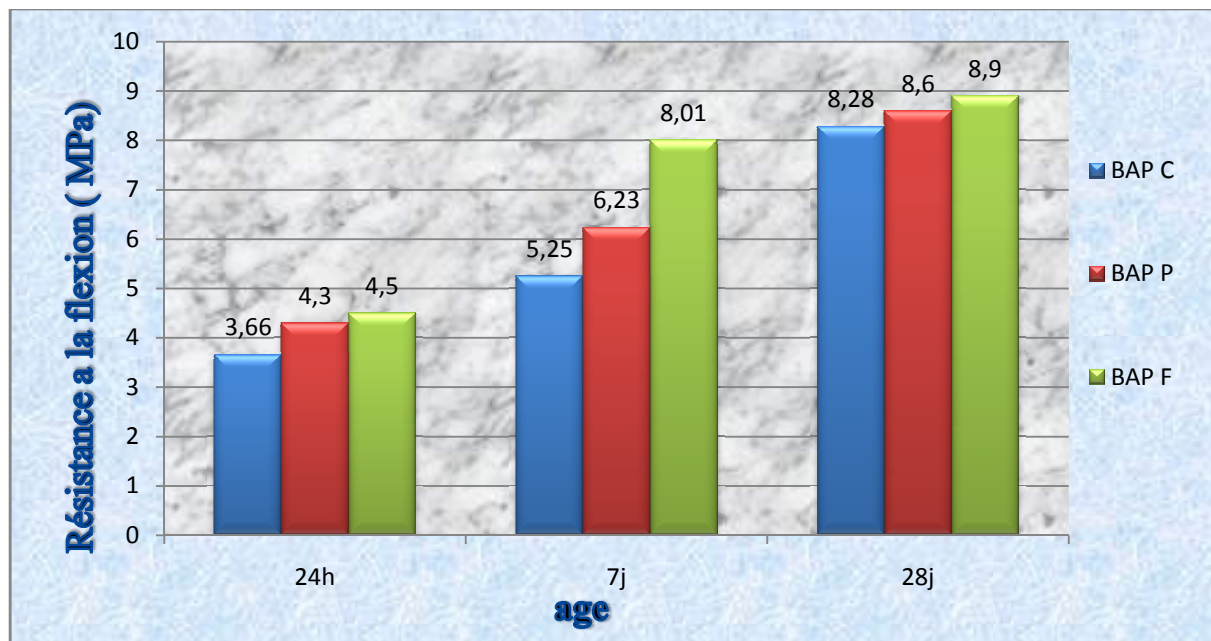


Figure IV.11 : Evolution de la résistance a la flexion des BAP étuvés.

❖ Discussion des résultats :

Même après étuvage, le BAP à base de fumée de silice a présenté de meilleurs résultats comparés aux deux autres BAP, que ce soit pour la résistance à la compression ou à la résistance à la flexion.

On remarque que les proportions de supériorités sont restées les mêmes pour les résistances des BAP étuvés comparés aux résistances des BAP non étuvés : le BAP à base de pouzzolane a présenté de faibles résistances à la compression par rapport au BAP à base de fillers de calcaires mais de meilleures résistances à la flexion.

IV.3.2.4 Essais de l'ultrason

La vitesse de propagation de son à travers les différents BAP sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau IV.12 : la vitesse de propagation du son des différents bétons étuvés.

Bétons	BAP C	BAP P	BAP F
Vitesse de propagation du son (m/s)	4790	4770	4810

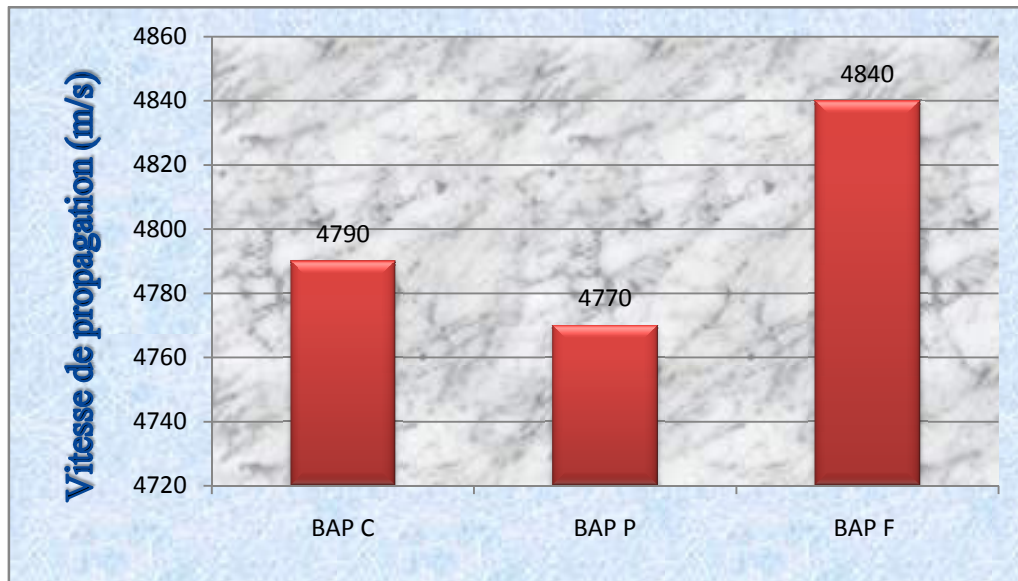


Figure IV.12 : Vitesse de propagation du son a travers les BAP étuvés.

III.3.3 Comparaison entre les bétons étuvés et les bétons non étuvés :

III.3.3.1 Masse volumique

Les masses volumiques des BAP étuvés et non étuvés à l'état durcis son représentés dans le diagramme suivant :

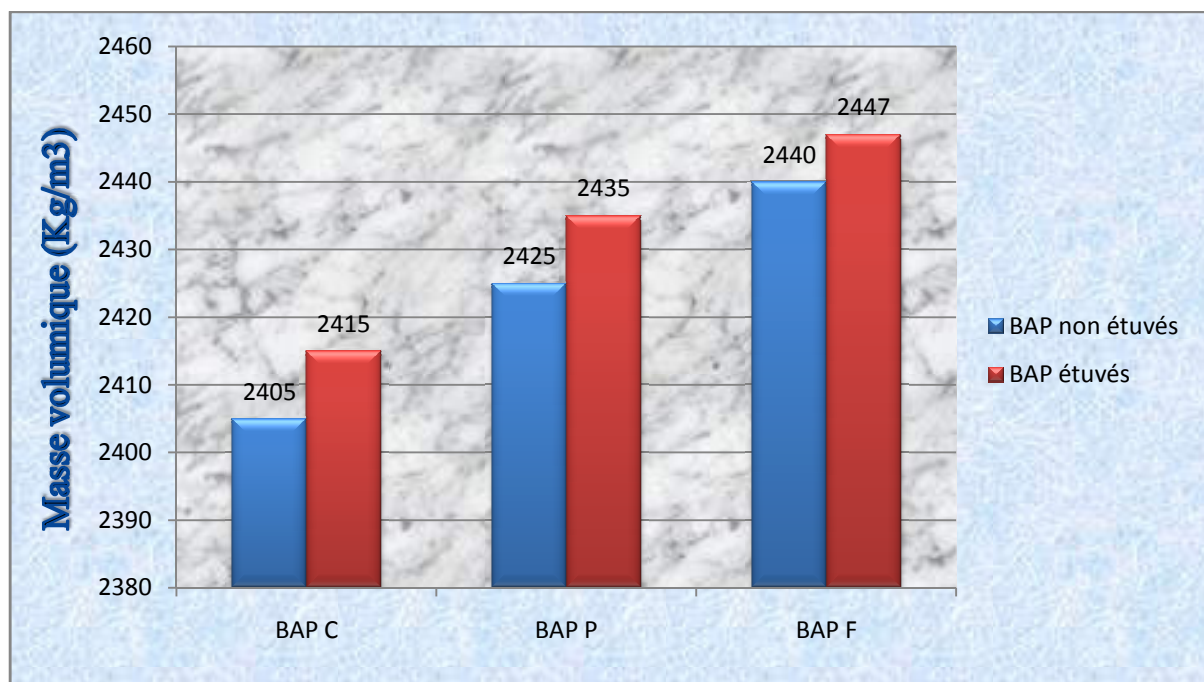


Figure IV.13 : Masse volumique à l'état durci des BAP étuvés et non étuvés.

❖ Discussion des résultats :

On remarque aussi une légère augmentation par rapport a la masse volumique des bétons non étuvés a jeun âge (24h) ceci est du a l'accélération de durcissement et la formation des cristaux causé par le traitement thermique.

III.3.3.2 Résistance a la compression :

Les résultats de la résistance a la compression des bétons étuvés et non étuvés sont données dans les diagrammes suivants :

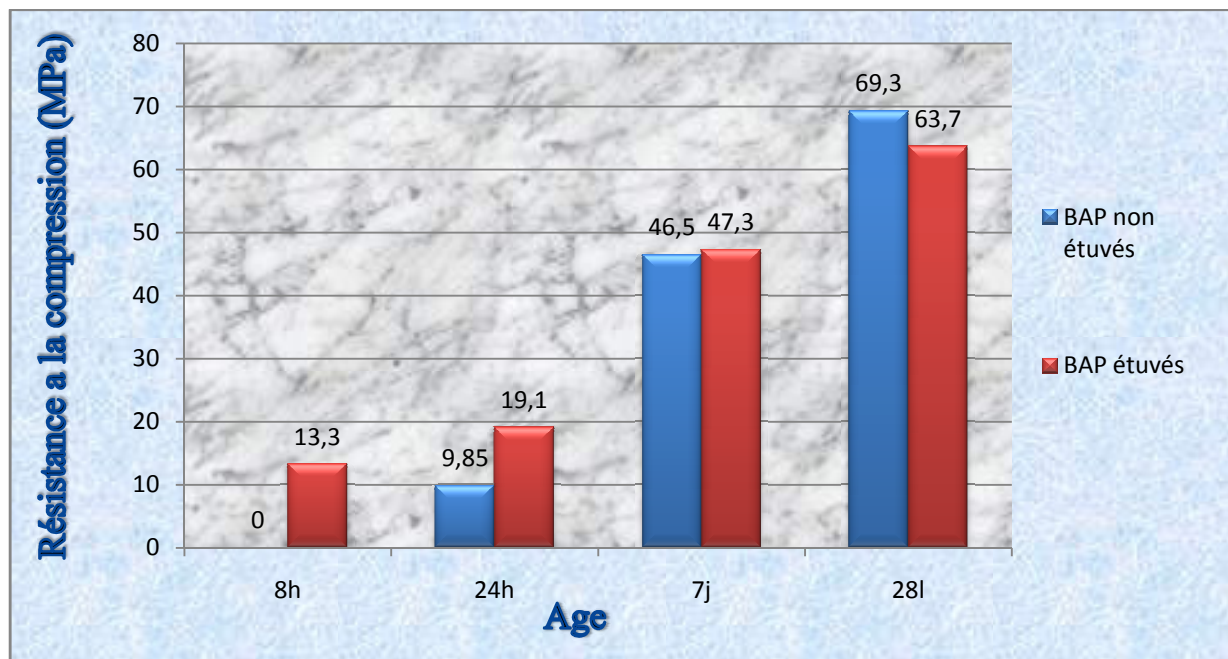


Figure IV.14 : Evolution de la résistance a la compression des BAP a base de calcaire étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.

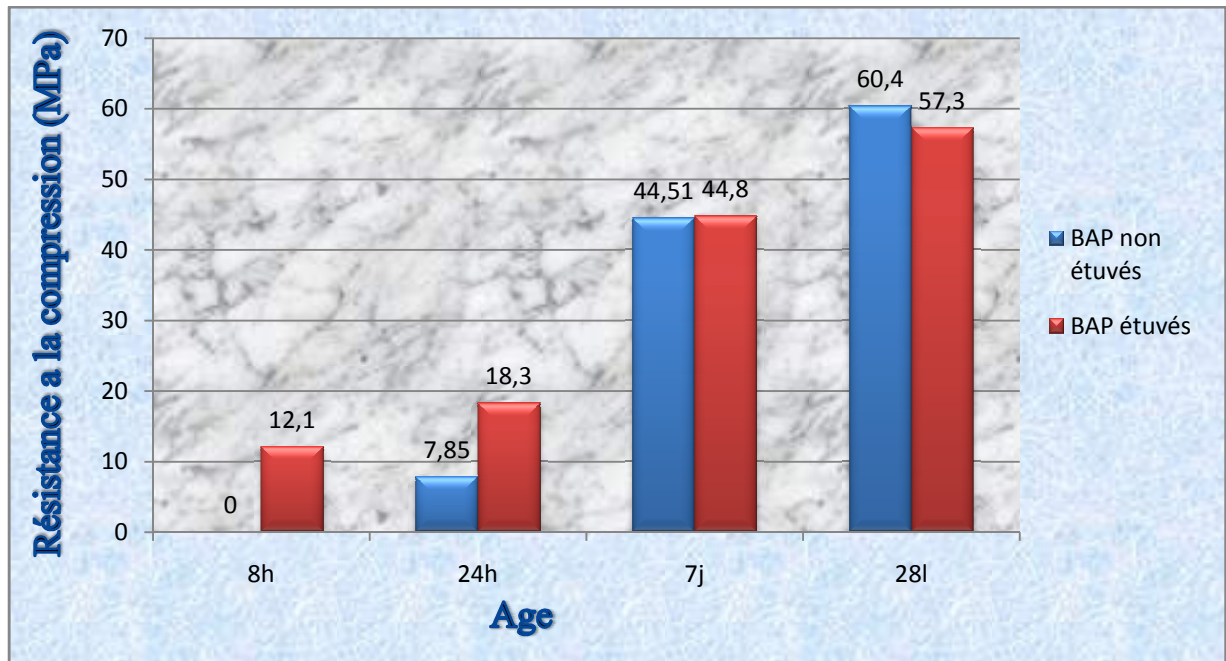


Figure IV.15 : Evolution de la résistance a la compression des BAP à base de pouzzolane étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.

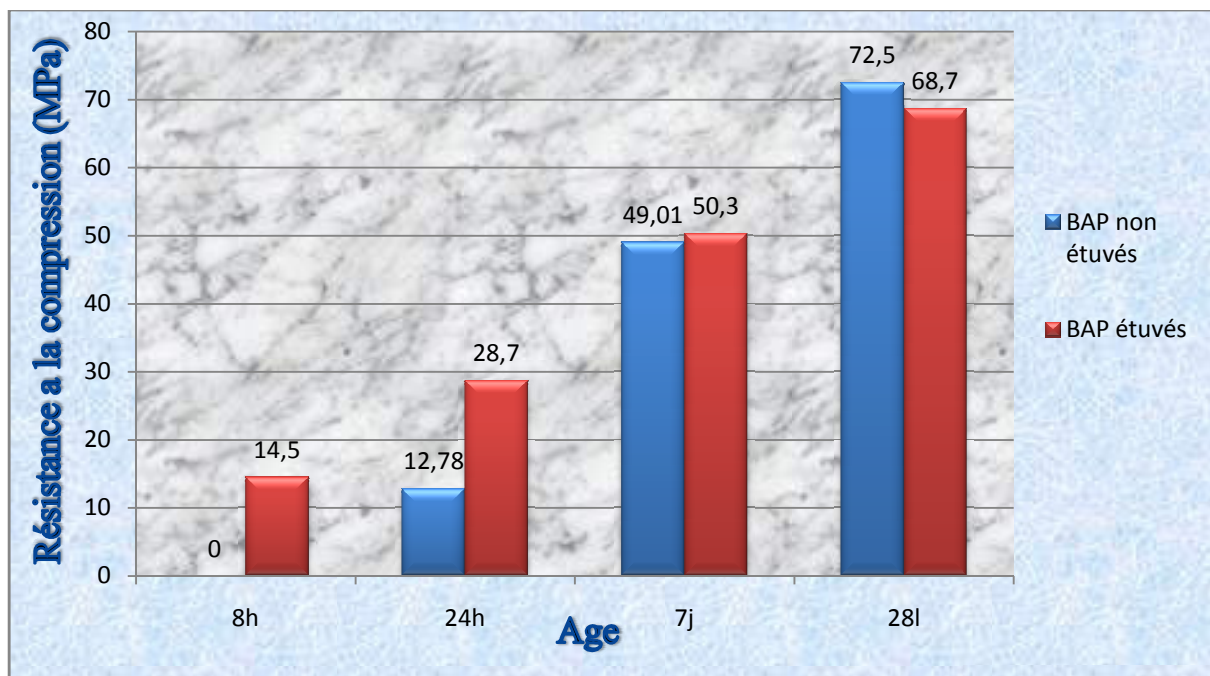


Figure IV.16 : Evolution de la résistance a la compression des BAP a base de fumé de silice étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.

III.3.3.3 Résistance a la flexion :

Les résultats de la résistance a la flexion des bétons étuvés et non étuvés sont données dans les figure suivantes :

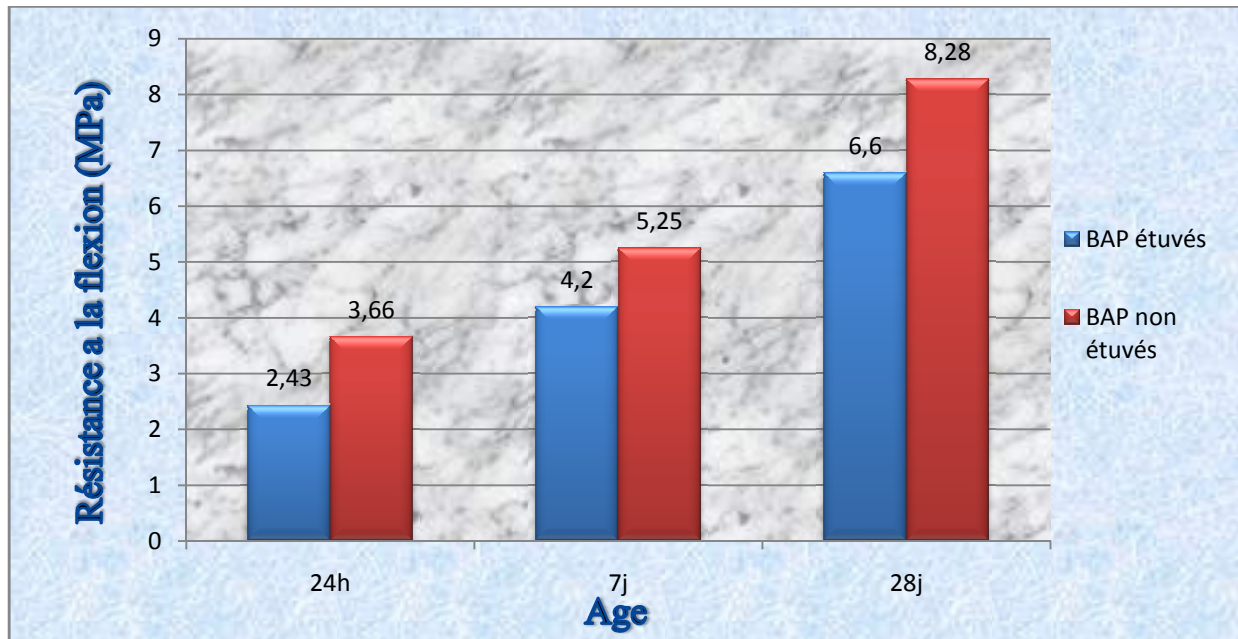


Figure IV.17 : Evolution de la résistance a la flexion des BAP a base de calcaire étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.

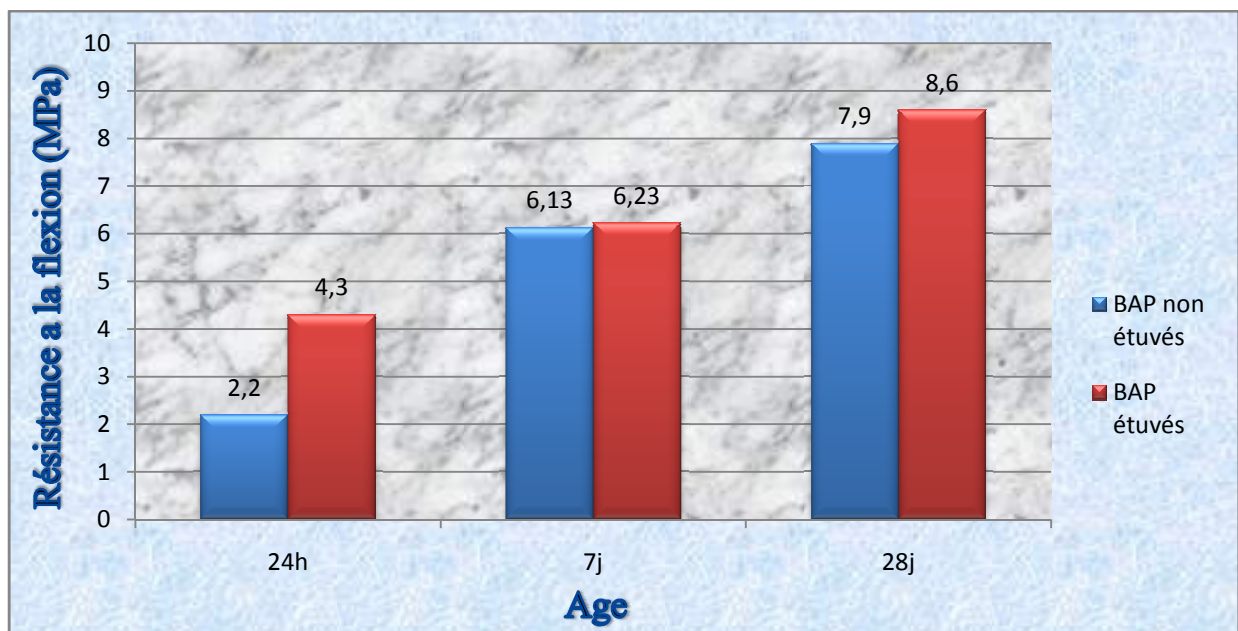


Figure IV.18 : Evolution de la résistance a la flexion des BAP a base de pouzzolane étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.

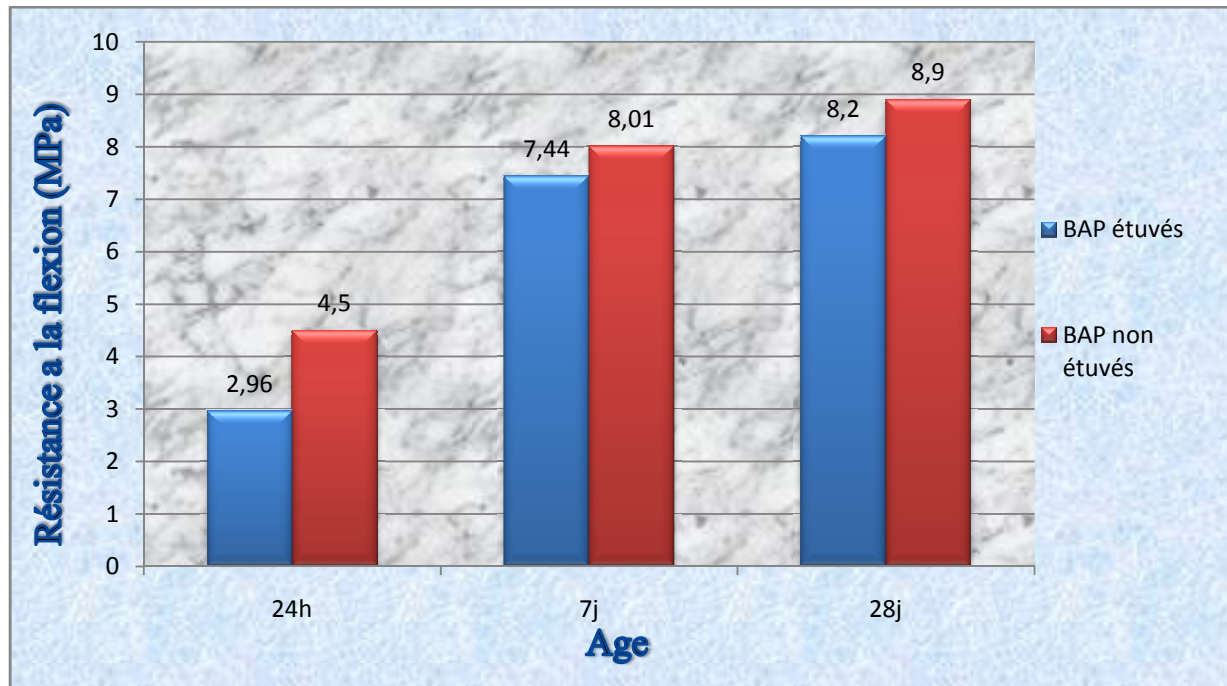


Figure IV.19 : Evolution de la résistance a la flexion des BAP à base de fumé de silice étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.

❖ Discussion des résultats

➤ Résistance à la compression

D'après les figures comparatifs entre les trois (3) BAP utilisés on remarque que :

- ✓ De 8h à 24h : Pour tous les BAP testés, on remarque que les BAP étuvés montrent de meilleures résistances après 8h que les BAP non étuvés après 24h avec les proportions suivantes : Une supériorité de 35% pour les BAP à base de fillers de calcaire, de 54% pour les BAP à base de pouzzolane, de 13.4% pour les BAP à base de fumée de silice.

On notera aussi qu'après 24h les BAP étuvés présentent au minimum une supériorité de résistance de 94% par rapport aux BAP non étuvés (BAP avec fumée de silice : 124.6%, BAP avec fillers de calcaire : 94%, BAP avec pouzzolane : 133%).

- ✓ Après 7 jours : Les BAP étuvés ont presque les mêmes résistances que les BAP non étuvés avec une supériorité maximale de 2.4% (BAP avec fumée de silice : 2.4%, BAP avec fillers de calcaire : 1.7%, BAP avec pouzzolane : 0.65%)

- ✓ Après 28 jours : Les BAP non étuvés sont devenus plus résistants à la compression que les BAP étuvés de : 5.5% pour les BAP avec fumée de silice, 5.4% pour les BAP avec pouzzolane, 8.8% pour les BAP avec des fillers de calcaire.

❖ Interprétation

Le traitement thermique des BAP nous a permis d'obtenir des résistances élevées après 24h pour un démoulage rapide, toutefois ces avantages mécaniques vont diminuer après 28 jours comparés aux BAP sans traitement.

Ces accélérations de performances mécaniques à jeune âge est dû au fait que ce traitement permet un durcissement plus rapide du BAP en accélérant les réactions chimiques pour une formation rapide des cristaux même après 24h d'écoulement. Ce phénomène d'accélération va s'affaiblir au fur et à mesure mais en donnant des résistances à la compression très acceptable.

➤ Résistance à la flexion

Ce genre de traitement thermique aux BAP avec les trois (3) additions (Fillers de calcaire, pouzzolane et fumée de silice), a permis d'obtenir de biens meilleurs résistances à la flexion après : 24 heures, 7 et 28 jours. On conseillera donc l'utilisation de ce genre de traitement pour les BAP où la résistance à la flexion est un paramètre important.

III.3.3.4 Essais de l'ultrason

Les résultats de la vitesse de propagations du son à travers les BAP étudiés sont représentés dans le diagramme suivant :

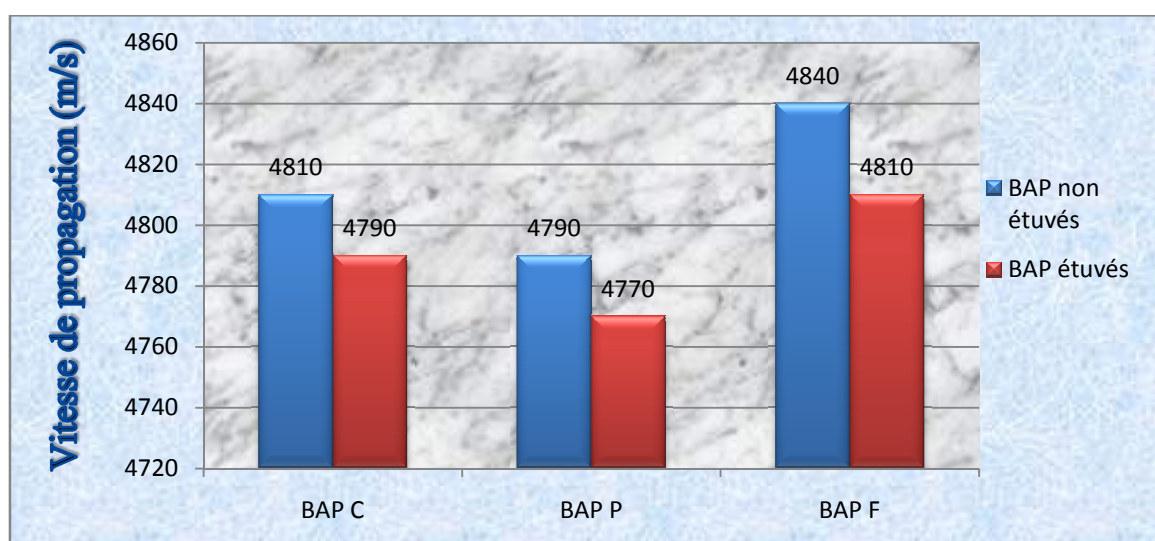


Figure IV.20 : Résultats de la vitesse de propagation du son à travers les BAP étuvés et non étuvés.

❖ Interprétations :

Tout les BAP utilisés que ce soit étuvés ou non étuvés sont classés des BAP à très haute résistance.

Le BAP avec fumée de silice a présenté une vitesse de propagation du son élevée par rapport aux autres BAP, suivi par le BAP avec des fillers de calcaire et du BAP avec pouzzolane en dernier.

L'essai d'ultrason permet de connaître la compacité de la structure interne du béton, plus la vitesse est grande et plus le béton est compacte et donc plus résistant aux sollicitations mécaniques, c'est le cas du BAP avec fumée de silice, à titre comparatif, ou la résistance à la compression/flexion était la plus grande avec une vitesse de propagation des ondes plus rapide.

CHAPITRE IV :

Résultats et discussions

VI.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on a étudié les différents résultats des essais rhéologiques et mécaniques sur les bétons autoplaçants à base de trois types d'ajouts minéraux (Calcaire, Pouzzolane, Fumée de silice) avec et sans étuvage, à partir de ces résultats des interprétations seront également présentés.

IV.2 RESULTATS DES ESSAIS SUR LES BAP A L'ETAT FRAIS

IV.2.1 Masse volumique (NF EN 12350-6)

Les masses volumiques des différents BAP sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Masse volumique a l'état frais des différents BAP.

Béton	BAP C	BAP P	BAPF
Mv (Kg/m ³)	2400	2420	2430

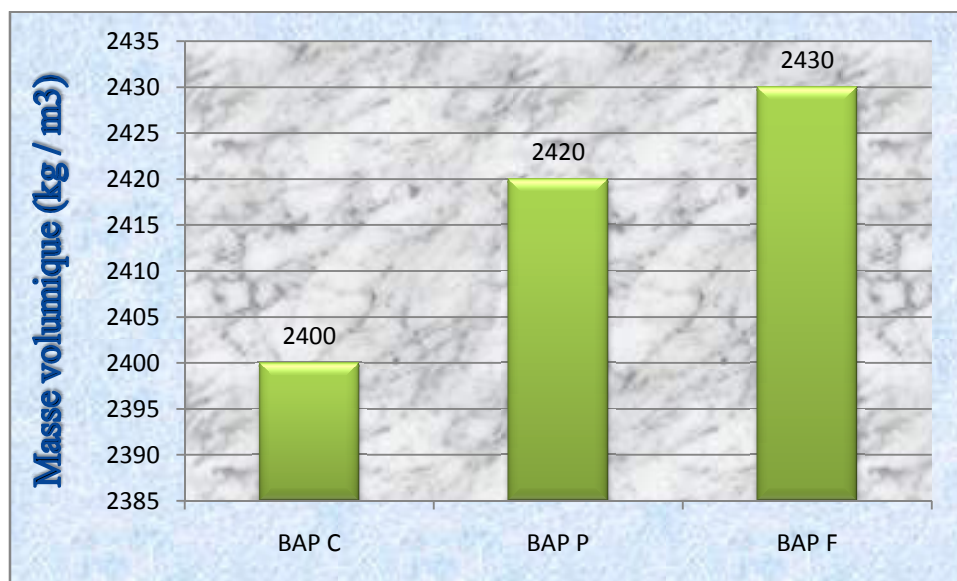


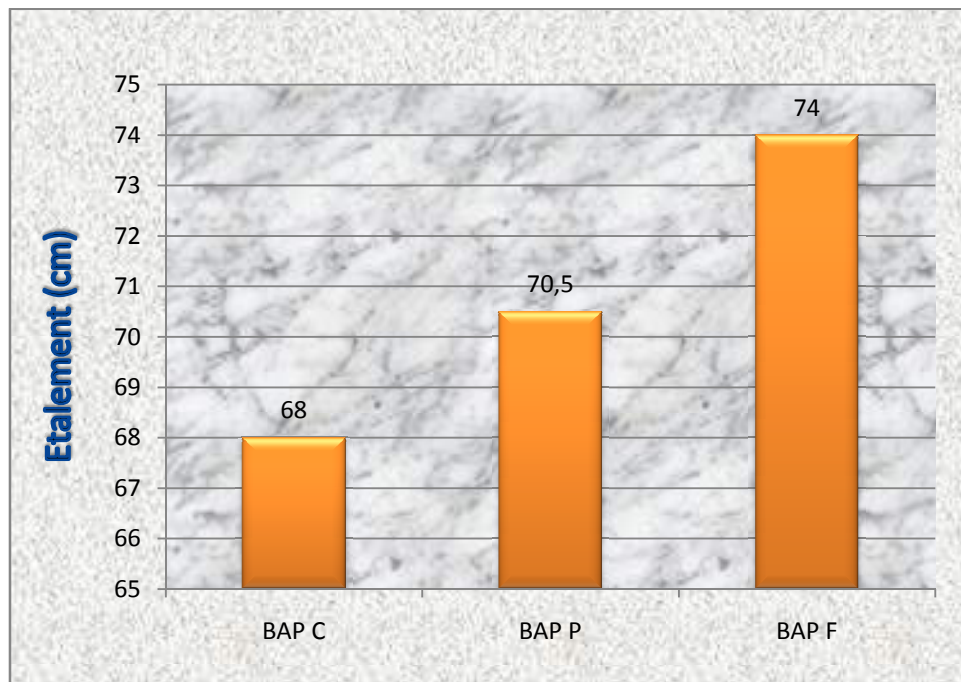
Figure IV.1 : Masse volumique des différents BAP a l'état frais.

IV.2.2 Essais d'étalement au cône d'Abrams : (Norme de référence NF EN 12350-8)

Les résultats de l'essai de l'étalement sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 : Résultats de l'essai d'étalement

Type de béton Essais	BAP C	BAP P	BAP F
Etalement cône d'Abrams (cm)	68	70,5	74

**Figure IV.2** : Evolution de l'étalement.

D'après les résultats obtenus on peut constater que les trois BAP respectent le critère d'étalement. L'étalement était compris entre 60 et 75 cm, bien qu'une limite ne soit donnée pour les temps d'étalement, les temps mesurés pour atteindre une galette de 50 cm de diamètre (t_{50}) sont proches des valeurs couramment rencontrées (3 secondes). Cependant le béton avec fumée de silice a un étalement légèrement supérieur au béton à base des fillers calcaire et de fillers pouzzolane cela est dû à la forme et la nature des particules de la fumée de silice, étant sphériques et lisses qui peuvent améliorer mieux l'écoulement de béton autoplacant.

IV.2.3 Essai de la boîte en L :(norme de référence NF EN 12350-10)

Les résultats de la boîte en L sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 : résultats de boîte en L.

Type de BAP Essai	BAP C	BAP P	BAP F
Taux de remplissage	82%	84%	87%

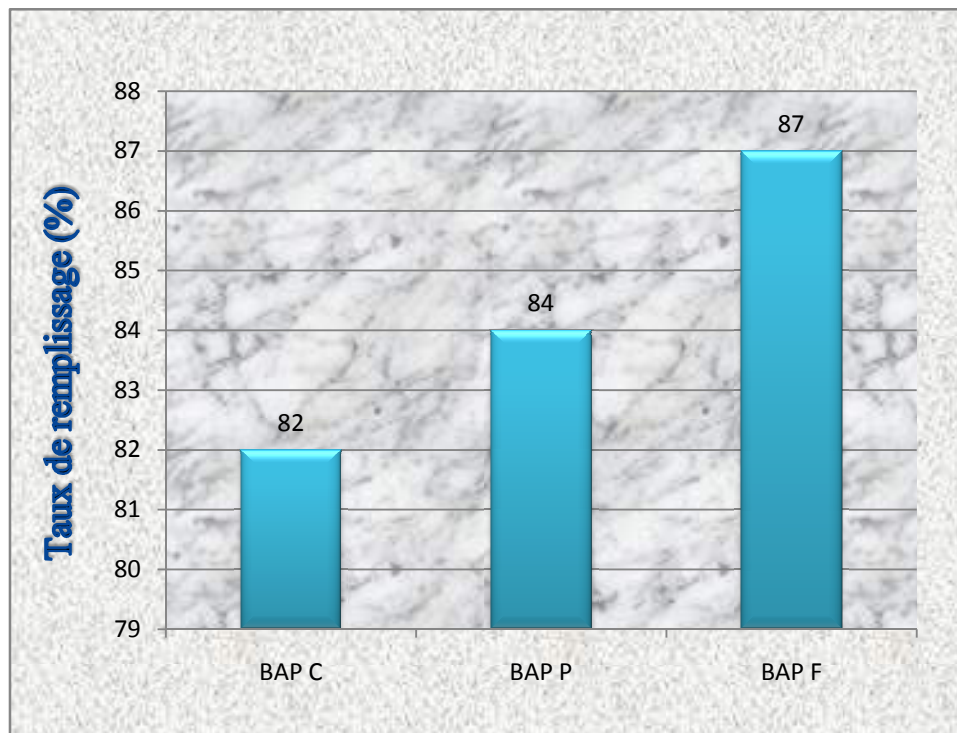


Figure IV.3 : Evolution de taux de remplissage.

Les résultats obtenus sont conformes à ce que l'on peut attendre d'un béton autoplaçant. Cependant, le plus important dans cet essai est que le béton testé s'écoule à travers les armatures correctement. Les compositions étudiées ne montrent aucun signe de blocage durant le passage à travers les armatures, aucun problème n'est à signaler pour les trois BAP. Les trois bétons présentent des taux de remplissage supérieur à 0.80, qui s'inscrivent dans le domaine des BAP.

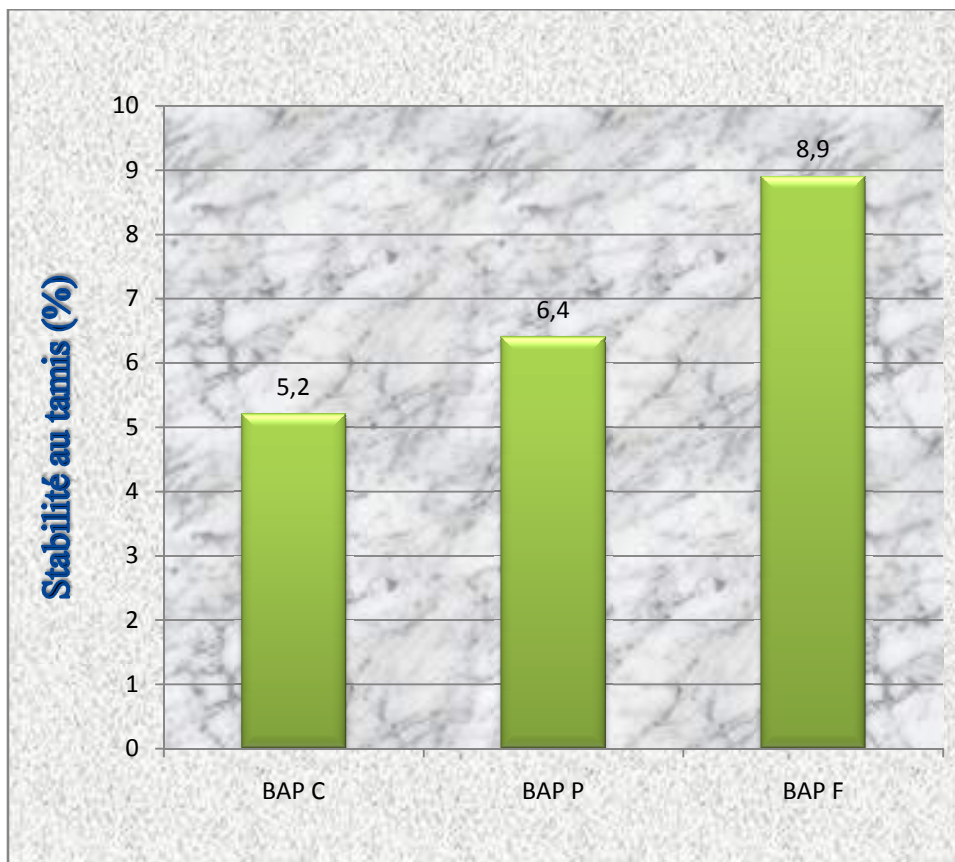
Cependant on note que le taux de remplissage le plus élevé était celui de la fumée de Silice suivie par celui de la pouzzolane et le calcaire en dernier.

IV.2.4 Essais de stabilité au tamis : (Norme de référence NF I N 12350-11)

Le tableau suivant représente les résultats de l'essai de la stabilité au tamis :

Tableau IV.4 : Résultats de l'essai de stabilité au tamis.

Type de BAP Essais	BAP C	BAP P	BAP F
Stabilité en tamis	5.2%	6.4%	8.9%

**Figure IV.4 :** Evolution de stabilité au tamis.

L'essai de stabilité au tamis permet de calculer le taux de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Les trois BAP ont un taux de ségrégation inférieur à 15%, il ne dépasse pas 7%, ce qui traduit par une bonne résistance à la ségrégation, synonyme d'une stabilité correcte.

❖ **Discussion et interprétation :**

D'après les résultats obtenus à travers les différents essais sur nos trois (3) BAP à l'état frais on remarque que le BAP avec fumée de silice avait des performances supérieures aux deux

(2) autres BAP utilisés (BAP avec fillers de calcaire et pouzzolane).

Cela est dû aux propriétés physiques de la fumée de silice : une forme sphérique qui aide à la maniabilité avec un SSB très élevé par rapports aux deux autres ajouts.

Les trois bétons utilisés sont conformes aux normes des BAP.

IV.3 RESULTATS DES ESSAIS SUR BAPA L'ETAT DURCI

IV.3.1 BAP non étuvé

IV.3.1.1 Masse volumique

Les masses volumiques a l'état durcis des bétons non étuvés sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.5 : Masse volumique a l'état durcis des bétons non étuvés.

Bétons	BAP C	BAP P	BAP F
Mv (Kg/m ³)	2405	2427	2440

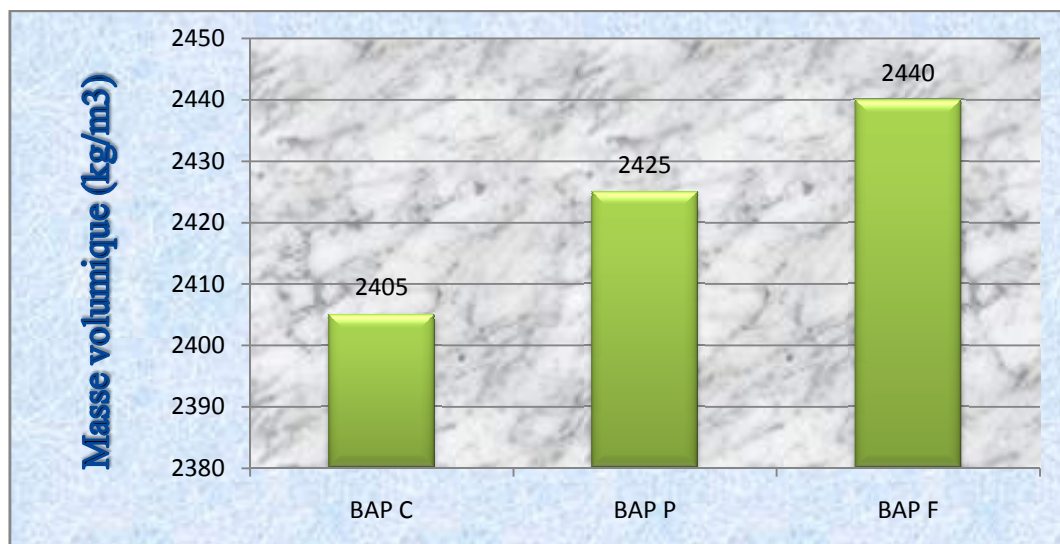


Figure IV.5 : Masse volumique des BAP non étuvés a l'état durci.

Ces résultats sont conformes a la norme des exigences des BAP.

IV.3.1.2 Resistance a la compression

Le tableau suivant représente les résistances à la compression des bétons non étuvés

Tableau IV.6 : Résistance à la compression des bétons non étuvés

Type de BAP	BAP C			BAP P			BAP F		
âge	24h	7j	28j	24h	7j	28j	24h	7j	28j
Resistance a la compression (MPa)	9.85	46.5	69.3	7.85	44.51	60.4	12.78	49.01	72.5

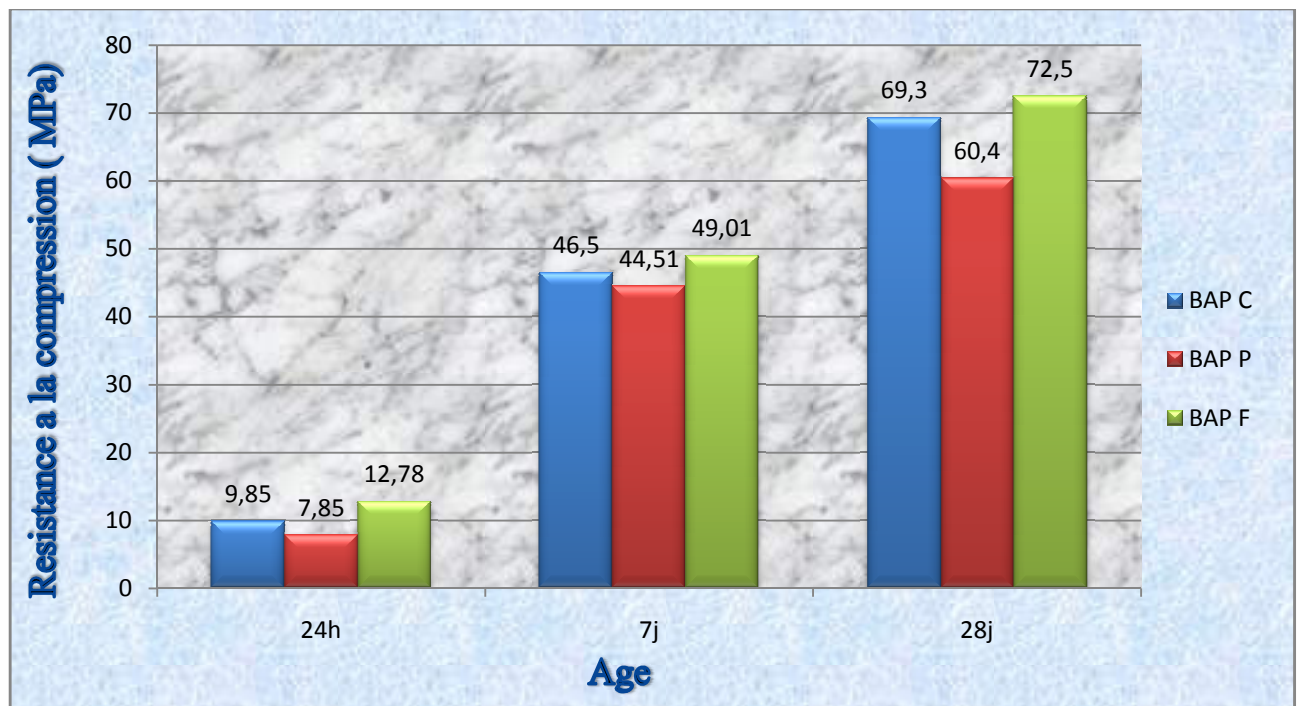


Figure IV.6 : Evolution de la résistance à la compression des BAP non étuvés.

IV.5.3.1.3 Résistance a la flexion

Ce tableau suivant représente les résistances à la flexion des bétons non étuvés :

Tableau IV.7 : Résistance a la flexion des bétons non étuvés.

Type de béton	BAP C			BAP P			BAP F		
Age	24h	7j	28j	24h	7j	28j	24h	7j	28j
Résistance a la flexion(MPa)	2.43	4.2	6.6	2.2	6.6	7.9	2.96	7.44	8.2

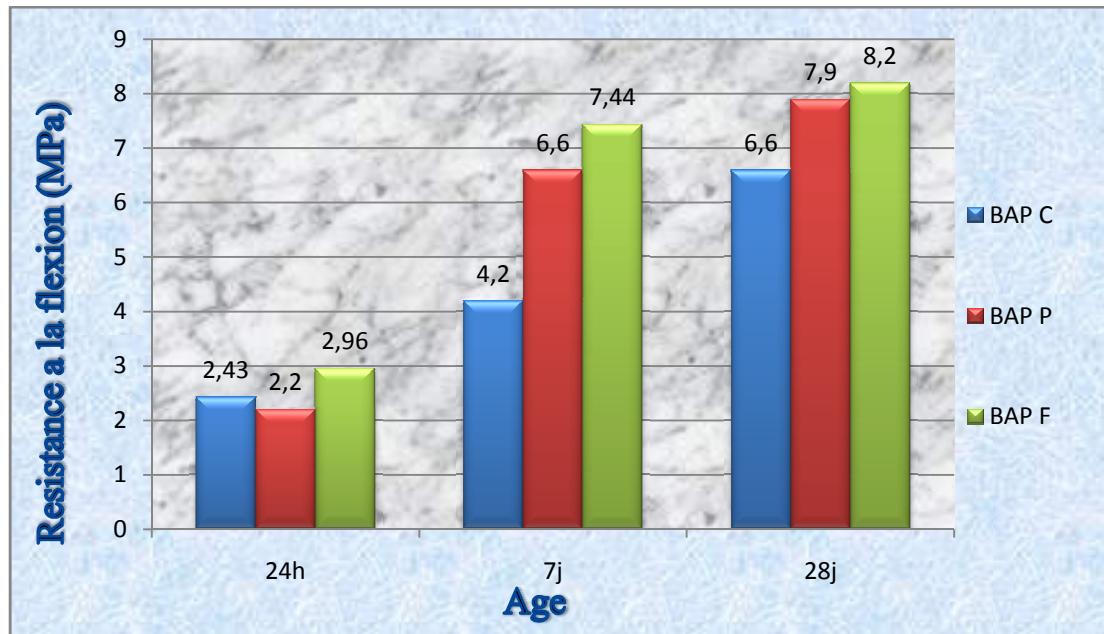


Figure IV.7 : Evolution de la résistance à la flexion pour les BAP non étuvés.

❖ Discussion des résultats :

Le BAP à base de fumée de silice à tout les âges donne de bien meilleurs résultats soit à la résistance à la compression soit à la flexion, à cause de sa finesse élevée ($23\text{m}^2/\text{gr}$) qui occupe les vides entre les grains du ciment provoquant l'augmentation de la compacité de la matrice cimentaire. Elle a aussi un effet chimique, ayant une structure amorphe à la présence de la portlandite et de l'eau, elle donne des CSH (minéral responsable de la résistance à la compression) et des CAH, ce qui va faire augmenter les propriétés mécaniques du béton à court et à long terme.

➤ Résistance à la compression :

- ✓ Après 24h : une supériorité de : 29.7% par rapport au BAP à base de calcaire, 62.8% par rapport au BAP à base de pouzzolane.
- ✓ Après 28 jours : une supériorité de : 4.6% par rapport au BAP à base de calcaire, 20% par rapport au BAP à base de pouzzolane.

➤ Résistance à la flexion :

- ✓ Après 24h : une supériorité de : 21.8% par rapport au BAP à base de calcaire, 34.5% par rapport au BAP à base de pouzzolane.
- ✓ Après 28 jours : une supériorité de : 24.2% par rapport au BAP à base de calcaire, 3.8% par rapport au BAP à base de pouzzolane.

Cependant le BAP à base de pouzzolane a obtenu de faibles résistances à la compression et à la flexion après 24h comparée aux deux autres. Mais sa résistance à la flexion a presque atteint celle du BAP à base de fumée de silice après 28 jours.

Après 28 jours le BAP à base de fillers calcaire a présenté des résistances à la compression plus hauses par rapport au BAP à base de pouzzolane de 14.7%.

Et pour cause, les fillers de calcaire agissent favorablement sur les propriétés mécaniques des BAP. En plus de leur rôle granulaire entraînant une compacité élevée et par conséquent des résistances élevées à court et à long terme. Elles peuvent avoir un effet accélérateur et participent à la formation des espèces hydratées suite à leur interaction avec le silicate tricalcique. L'activité chimique des fillers varie suivant leurs origines, dans notre cas elle est originaire de Meftah reconnue pour ses activités chimiques élevées après un broyage très fin.

IV.3.1.4 Essais de l'ultrason

La vitesse de propagation du son à travers les différents BAP mesurer après 28 jours est représenté dan le tableau suivant :

Tableau IV.8 : La vitesse de propagation des différents bétons non étuvés.

Bétons	BAP C	BAP P	BAP F
Vitesse de propagation du son (m/s)	4810	4790	4840

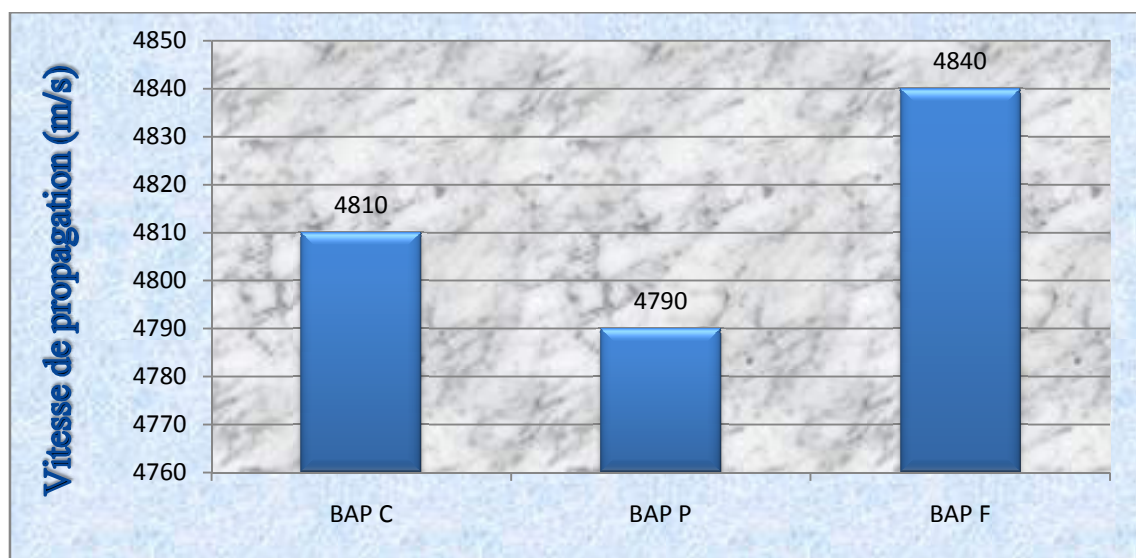


Figure IV.8 : Résultats des vitesses de propagation du son a travers les BAP non étuvés.

IV.3.2 Résultats des essais sur les BAP étuvés

IV.3.2.1 Masse volumique

Les masses volumiques des BAP étuvés sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.9 : Masse volumique a l'état durcis des BAP étuvés.

Bétons	BAP C	BAP P	BAP F
Mv (Kg/m ³)	2415	2435	2447

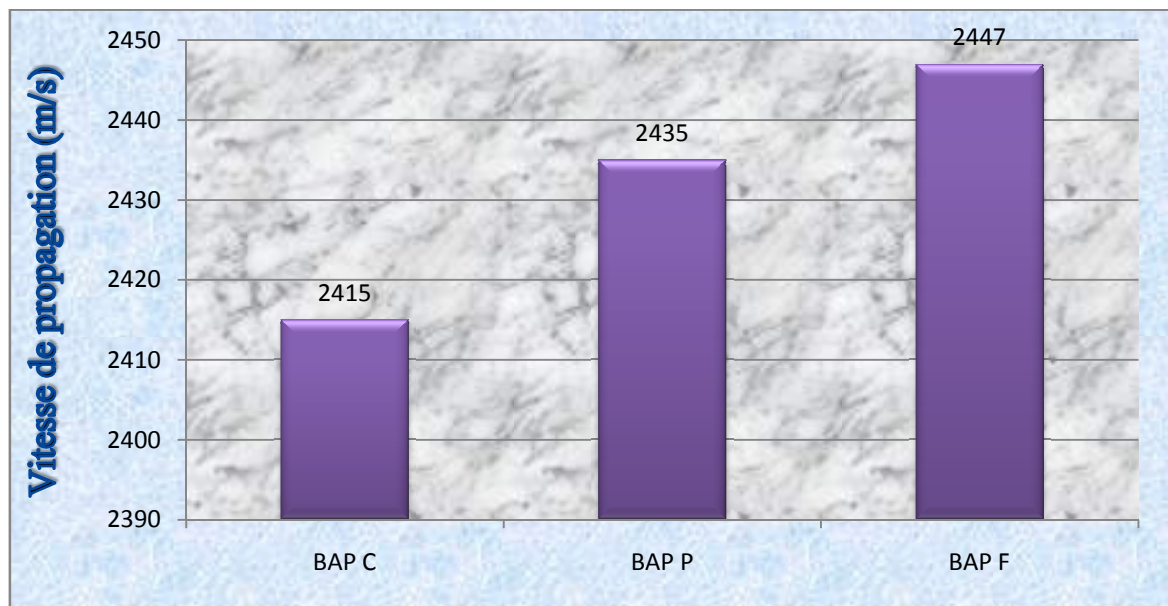


Figure IV.9 : La masse volumique des BAP étuvés a l'état durci.

- Interprétation des résultats :**

Ces résultats sont conformes à la norme des exigences des BAP.

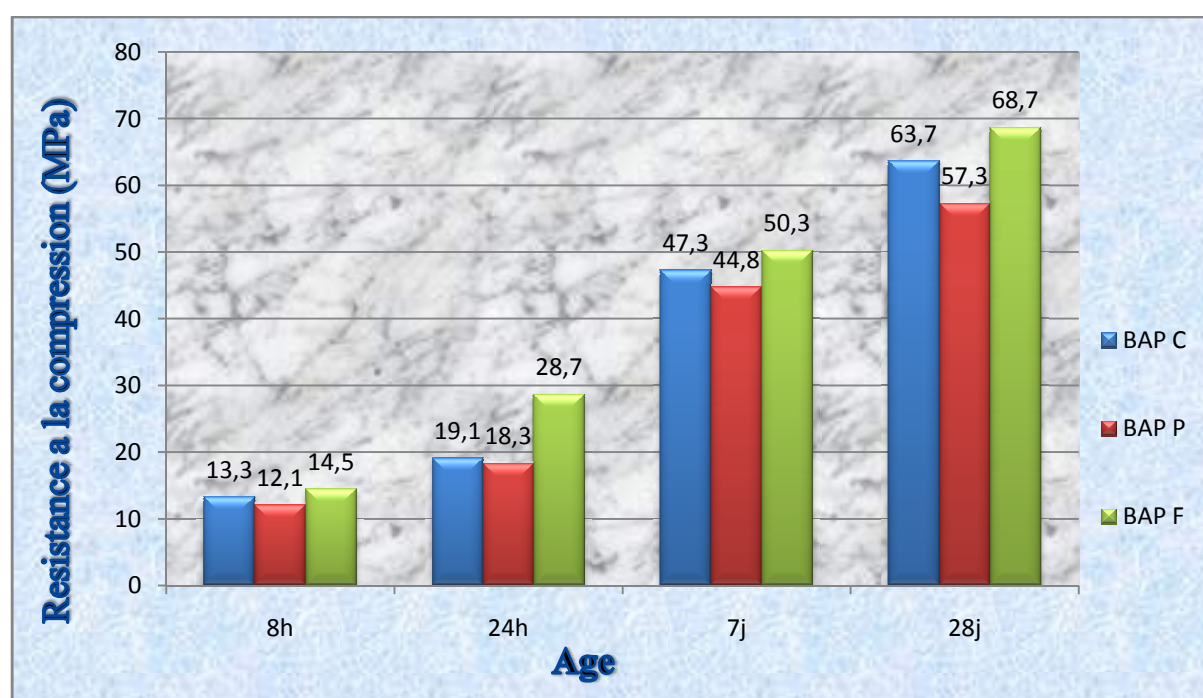
On remarque aussi une légère augmentation par rapport à la masse volumique des bétons non étuvés à jeune âge (24h) ceci est dû à l'accélération de durcissement et la formation des cristaux causée par le traitement thermique qui permet de conserver la chaleur d'hydratation et cette dernière assure une bonne hydratation et la bonne cure de béton.

IV.3.2.2 Résistance à la compression

L'évolution de la résistance à la compression des bétons étuvés sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.10 : Résistance a la compression des bétons étuvés.

Type de béton	PAP C				BAP P				BAP F			
âge	8h	24h	7j	28j	8h	24h	7j	28j	8h	24h	7j	28j
Resistance a la compression (MPa)	13.3	19.1	47.3	63.7	12.1	18.3	44.8	57.3	14.5	28.7	50.3	68.7

**Figure IV.10 :** Evolution de la résistance a la compression des BAP étuvés.

IV.3.2.3 Résistance à la flexion :

L'évolution de la résistance à la flexion des bétons étuvés sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.11 : Résistance a la flexion pour les bétons étuvés.

Type de béton	BAP C			BAP P			BAP F		
Age	24h	7j	28j	24h	7j	28j	24h	7j	28j
Resistance a la flexion(MPa)	3.66	5.25	8.28	4.3	6.23	8.6	4.5	8.01	8.9

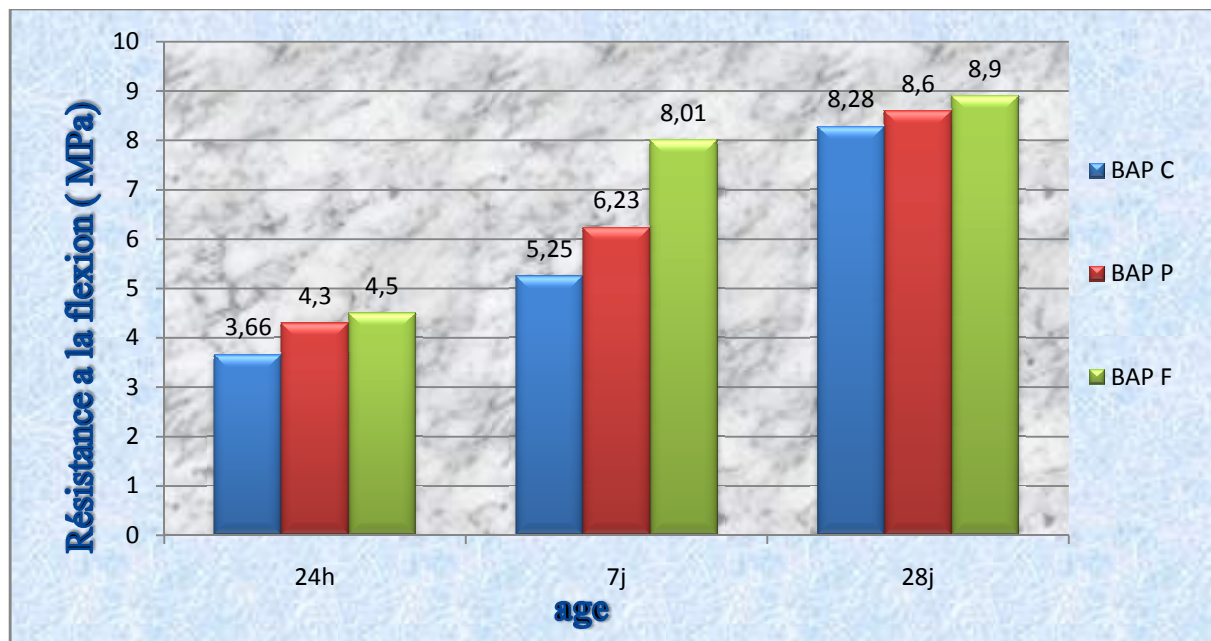


Figure IV.11 : Evolution de la résistance a la flexion des BAP étuvés.

❖ Discussion des résultats :

Même après étuvage, le BAP à base de fumée de silice a présenté de meilleurs résultats comparés aux deux autres BAP, que ce soit pour la résistance à la compression ou à la résistance à la flexion.

On remarque que les proportions de supériorités sont restées les mêmes pour les résistances des BAP étuvés comparés aux résistances des BAP non étuvés : le BAP à base de pouzzolane a présenté de faibles résistances à la compression par rapport au BAP à base de fillers de calcaires mais de meilleures résistances à la flexion.

IV.3.2.4 Essais de l'ultrason

La vitesse de propagation de son à travers les différents BAP sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau IV.12 : la vitesse de propagation du son des différents bétons étuvés.

Bétons	BAP C	BAP P	BAP F
Vitesse de propagation du son (m/s)	4790	4770	4810

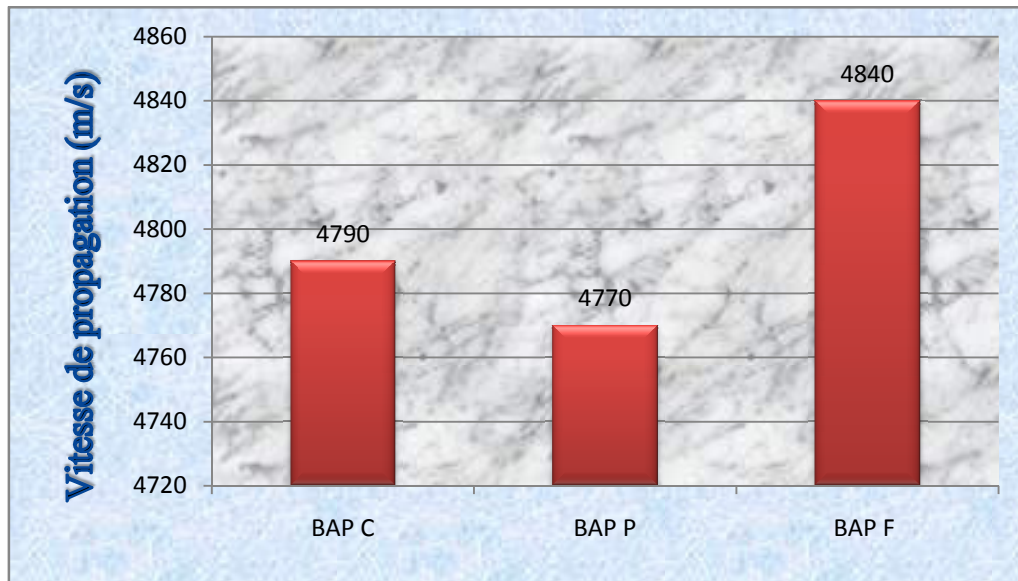


Figure IV.12 : Vitesse de propagation du son a travers les BAP étuvés.

III.3.3 Comparaison entre les bétons étuvés et les bétons non étuvés :

III.3.3.1 Masse volumique

Les masses volumiques des BAP étuvés et non étuvés à l'état durcis son représentés dans le diagramme suivant :

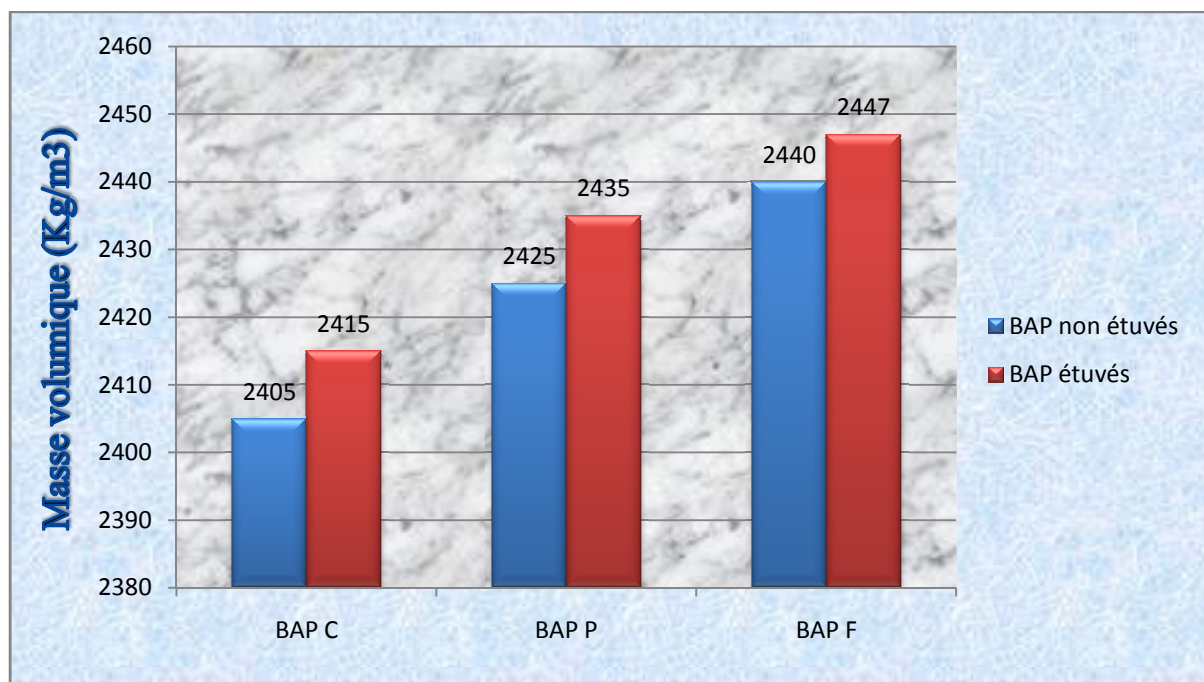


Figure IV.13 : Masse volumique à l'état durci des BAP étuvés et non étuvés.

❖ Discussion des résultats :

On remarque aussi une légère augmentation par rapport a la masse volumique des bétons non étuvés a jeun âge (24h) ceci est du a l'accélération de durcissement et la formation des cristaux causé par le traitement thermique.

III.3.3.2 Résistance a la compression :

Les résultats de la résistance a la compression des bétons étuvés et non étuvés sont données dans les diagrammes suivants :

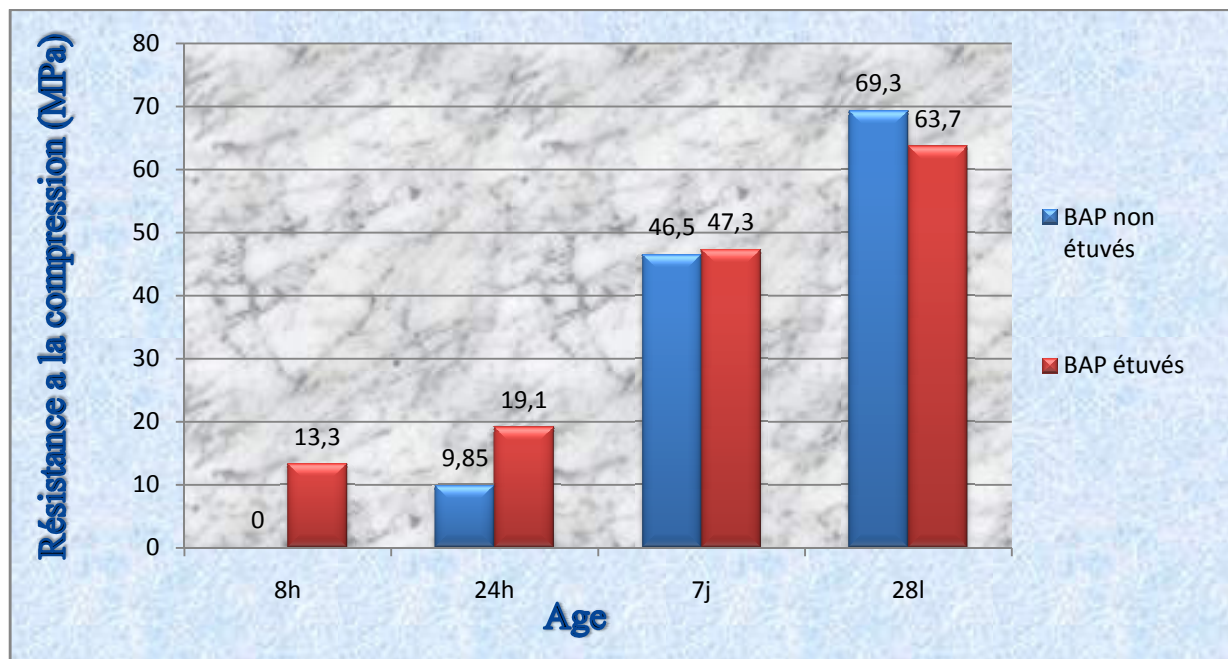


Figure IV.14 : Evolution de la résistance a la compression des BAP a base de calcaire étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.

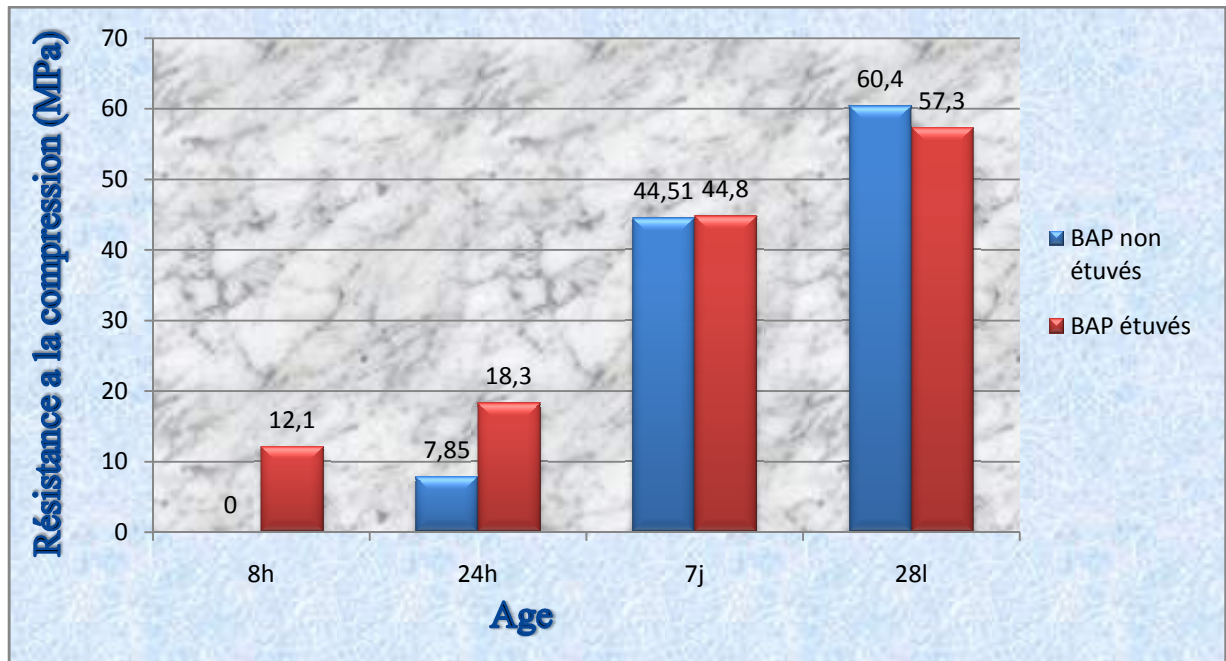


Figure IV.15 : Evolution de la résistance a la compression des BAP à base de pouzzolane étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.

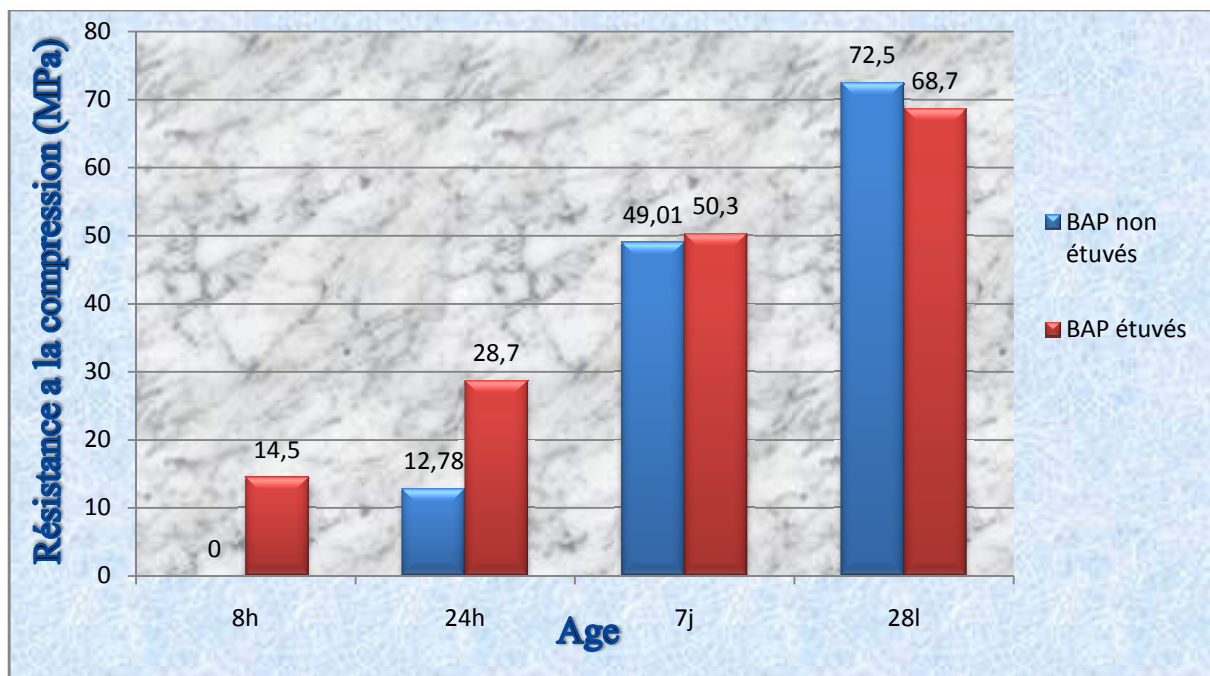


Figure IV.16 : Evolution de la résistance a la compression des BAP a base de fumé de silice étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.

III.3.3.3 Résistance a la flexion :

Les résultats de la résistance a la flexion des bétons étuvés et non étuvés sont données dans les figure suivantes :

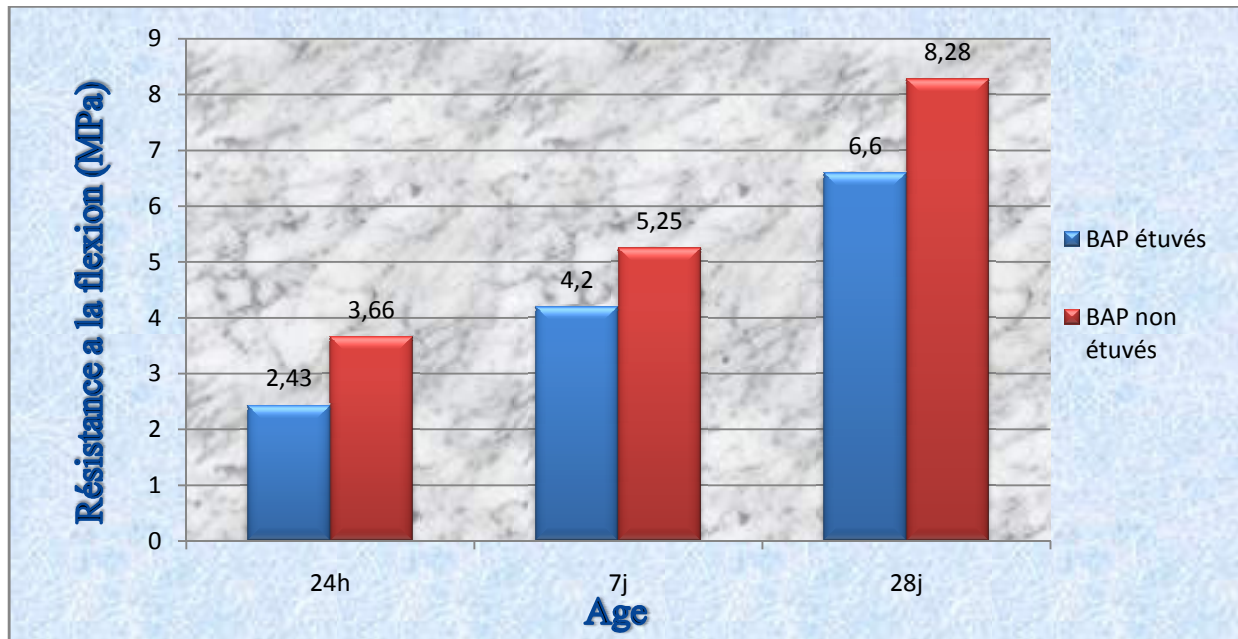


Figure IV.17 : Evolution de la résistance a la flexion des BAP a base de calcaire étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.

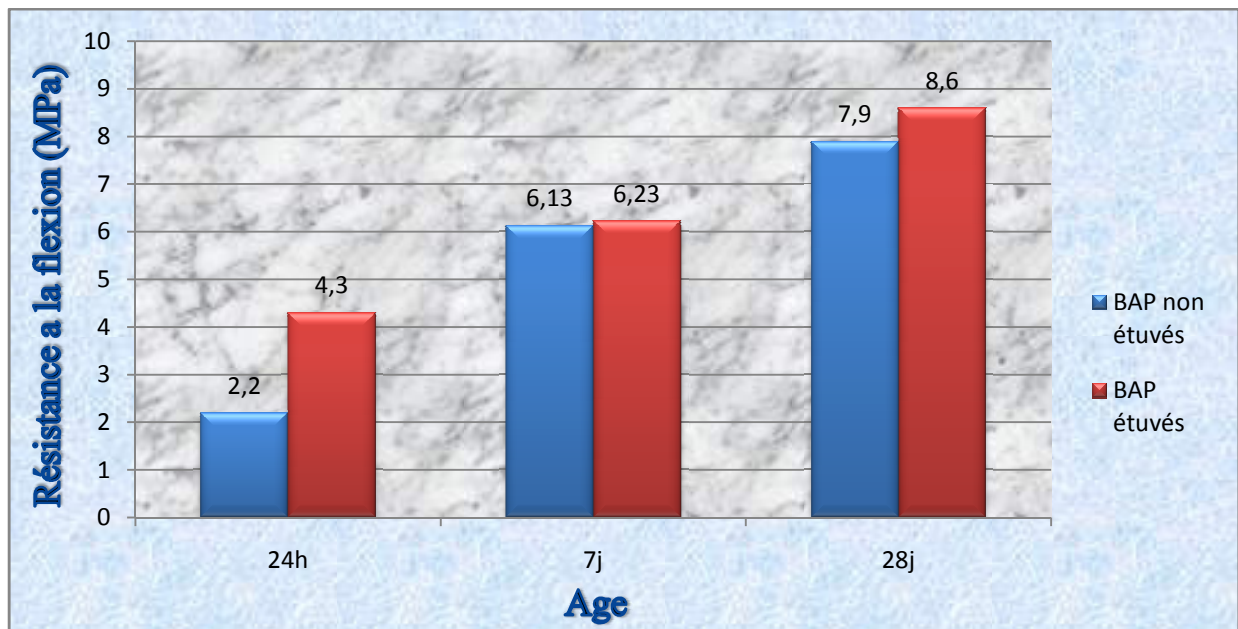


Figure IV.18 : Evolution de la résistance a la flexion des BAP a base de pouzzolane étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.

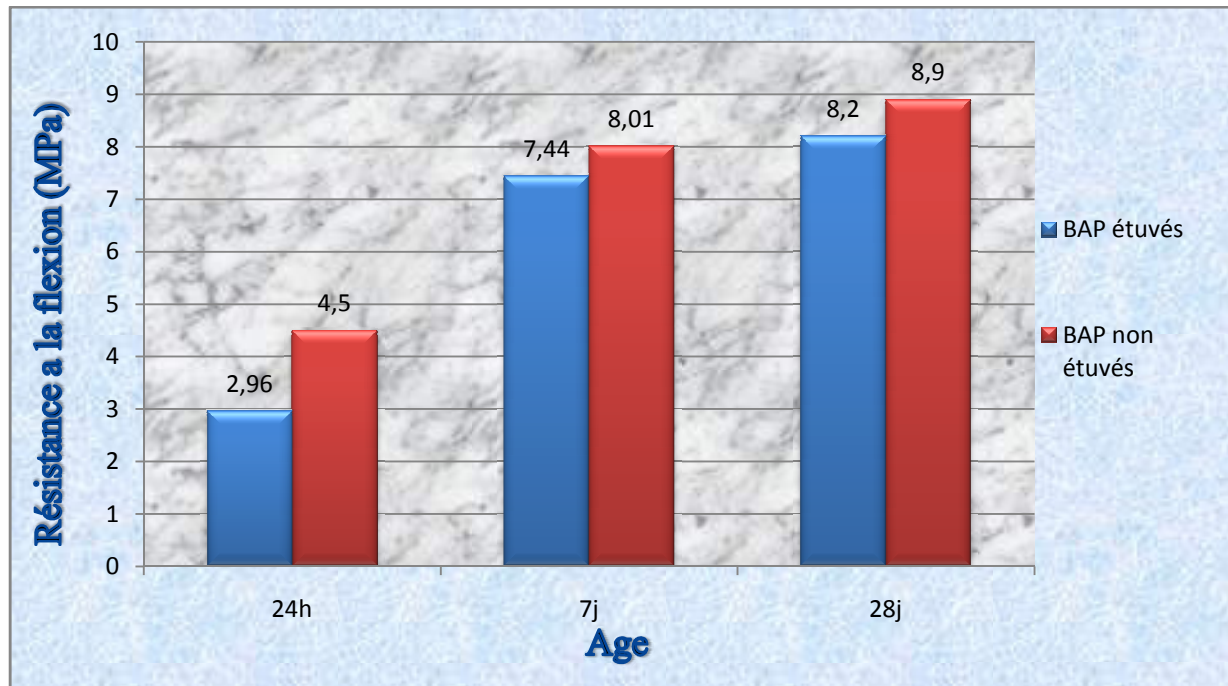


Figure IV.19 : Evolution de la résistance a la flexion des BAP à base de fumé de silice étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.

❖ Discussion des résultats

➤ Résistance à la compression

D'après les figures comparatifs entre les trois (3) BAP utilisés on remarque que :

- ✓ De 8h à 24h : Pour tout les BAP testés, on remarque que les BAP étuvés montrent de meilleures résistances après 8h que les BAP non étuvés après 24h avec les proportions suivantes : Une supériorité de 35% pour les BAP à base de fillers de calcaire, de 54% pour les BAP à base de pouzzolane, de 13.4% pour les BAP à base de fumée de silice.

On notera aussi qu'après 24h les BAP étuvés présentent au minimum une supériorité de résistance de 94% par rapport aux BAP non étuvés (BAP avec fumée de silice : 124.6%, BAP avec fillers de calcaire : 94%, BAP avec pouzzolane : 133%).

- ✓ Après 7 jours : Les BAP étuvés ont presque les mêmes résistances que les BAP non étuvés avec une supériorité maximale de 2.4% (BAP avec fumée de silice : 2.4%, BAP avec fillers de calcaire : 1.7%, BAP avec pouzzolane : 0.65%)

- ✓ Après 28 jours : Les BAP non étuvés sont devenus plus résistants à la compression que les BAP étuvés de : 5.5% pour les BAP avec fumée de silice, 5.4% pour les BAP avec pouzzolane, 8.8% pour les BAP avec des fillers de calcaire.

❖ Interprétation

Le traitement thermique des BAP nous a permis d'obtenir des résistances élevées après 24h pour un démoulage rapide, toutefois ces avantages mécaniques vont diminuer après 28 jours comparés aux BAP sans traitement.

Ces accélérations de performances mécaniques à jeune âge est dû au fait que ce traitement permet un durcissement plus rapide du BAP en accélérant les réactions chimiques pour une formation rapide des cristaux même après 24h d'écoulement. Ce phénomène d'accélération va s'affaiblir au fur et à mesure mais en donnant des résistances à la compression très acceptable.

➤ Résistance à la flexion

Ce genre de traitement thermique aux BAP avec les trois (3) additions (Fillers de calcaire, pouzzolane et fumée de silice), a permis d'obtenir de biens meilleurs résistances à la flexion après : 24 heures, 7 et 28 jours. On conseillera donc l'utilisation de ce genre de traitement pour les BAP où la résistance à la flexion est un paramètre important.

III.3.3.4 Essais de l'ultrason

Les résultats de la vitesse de propagations du son à travers les BAP étudiés sont représentés dans le diagramme suivant :

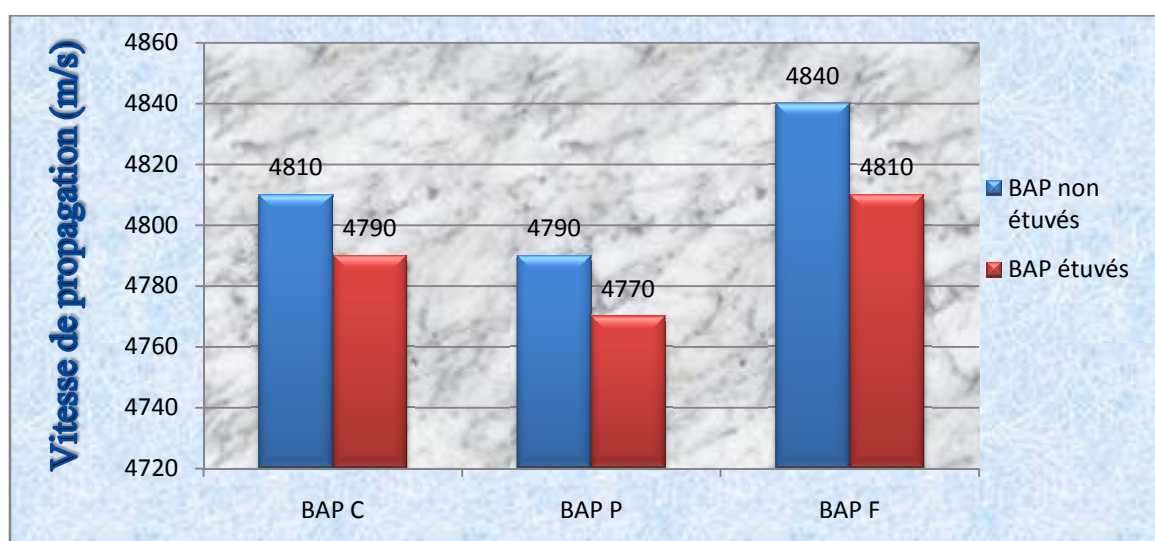


Figure IV.20 : Résultats de la vitesse de propagation du son à travers les BAP étuvés et non étuvés.

❖ Interprétations :

Tout les BAP utilisés que ce soit étuvés ou non étuvés sont classés des BAP à très haute résistance.

Le BAP avec fumée de silice a présenté une vitesse de propagation du son élevée par rapport aux autres BAP, suivi par le BAP avec des fillers de calcaire et du BAP avec pouzzolane en dernier.

L'essai d'ultrason permet de connaître la compacité de la structure interne du béton, plus la vitesse est grande et plus le béton est compacte et donc plus résistant aux sollicitations mécaniques, c'est le cas du BAP avec fumée de silice, à titre comparatif, ou la résistance à la compression/flexion était la plus grande avec une vitesse de propagation des ondes plus rapide.

Conclusion générale et recommandations

Conclusion général

CONCLUSION GENERAL

Notre étude a pour but d'étudier l'effet du traitement thermique sur les caractéristiques physicomécaniques du béton autoplaçant à base de trois différents ajouts : fumée de silice, fillers de calcaire et la pouzzolane.

D'après les résultats obtenus on peut tirer les conclusions suivantes:

- ✓ Toutes les compositions de béton que se soit avec addition de fillers calcaire, de fumée de silice ou de pouzzolane, présentent un étalement qui correspond à un béton autoplaçant, donc on peut dire qu'on a réussi à formuler un béton autoplaçant qui présente une bonne capacité de remplissage, une bonne résistance à la ségrégation, on conclut donc que les trois BAP respectent les critères de béton autoplaçant à l'état frais.
- ✓ Les résultats des résistances mécaniques des BAP à l'état durci montrent que l'ajout de la fumée de silice améliore les résistances à la compression et à flexion par rapport aux deux autres ajouts, suivie par les fillers de calcaire et au final l'ajout de la pouzzolane, qui a obtenu les résultats les plus faibles à titre comparatif.
- ✓ La finesse élevée et l'activité pouzzolanique de la fumée de silice permet d'améliorer la structure interne et une quantité supplémentaire de C.S.H au sein du BAP pour des caractéristiques mécaniques élevées.
- ✓ La partie expérimentale nous permet d'évaluer notamment l'effet du traitement thermique sur la résistance des trois BAP avec trois différentes additions, les résultats nous permettent de confirmer que l'étuvage participe à l'augmentation de la résistance mécanique à jeune âge.
- ✓ L'application du traitement thermique dans les bétons permet de gagner un temps considérable car on aura des résistances élevées à jeune âge.
- ✓ Même après étuvage le BAP avec fumée de silice affiche de meilleurs résultats mécaniques après un, sept et 28 jours, comparés aux autres BAP.
- ✓ Les BAP étuvés montrent de meilleures résistances après 8h que les BAP non étuvés après 24h avec les proportions suivantes : Une supériorité de 35% pour les BAP à base de fillers de calcaire, de 54% pour les BAP à base de pouzzolane, de 13.4% pour les BAP à base de fumée de silice.

Conclusion général

- ✓ Après 24h les BAP étuvés présentent au minimum une supériorité de résistance de 94% par rapport aux BAP non étuvés (BAP avec fumée de silice : 124.6%, BAP avec fillers de calcaire : 94%, BAP avec pouzzolane : 133%).
- ✓ Cependant les BAP étuvés montrent une perte de résistance mécanique après 28jours comparés aux BAP non étuvés

On conclura que ce genre de traitement est favorable aux éléments préfabriqués qui nécessitent une forte résistance mécaniques à jeune âge pour un décoffrage rapide, pour un gain de temps avec une qualité supérieure.

Références bibliographique

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1]-Association Française de Génie Civil, "Bétons auto-plaçants - Recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000.
- [2] WALRAVEN, Structural aspect of self-compacting concrete, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 15-22.
- [3] SEDRAN T. « Les bétons autonivelants – synthèse bibliographique », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 196 p53-60 Mars-Avril 1995.
- [4]Okamura H, K OZAWA and M .ouchi<< self-compacting concrete.structural concrete>>MARSH-2000
- [5]Association française de génie civil<<béton autoplacant –recommandation provisoire>>, annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000
- [6] SEDRAN.T. Rhéologies et rhéométrie des bétons.application au béton autonivlant
- [7] Khélifa R., «Influence des ciments à base d’ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons, Thèse de Magistère en Génie Civil, Université Mentouri de Constantine, le 11 Juillet 2001.
- [8] Khelifa R., «L’impact des cimenteries sur l’environnement – Cas de la cimenterie de Ain-Touta», Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d’Orléans, le 18 Septembre 2002.
- [9] Rapport d’essais préliminaires, «Etude de ciments aux ajouts», Entreprise Régionale des Cimenterie de l’Est ERCE, Cimenterie de Ain-Touta, 2005.
- [10]Baron J., Ollivier J.P., "Les bétons – Bases et données pour leur formulation", Editions Eyrolles, 1996.
- [11]Larrard F., "Structures granulaires et formulations des bétons", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, avril 2000
- [12] George Dreux, Jean FESTA, « NOUVEAU GUIDE DU BETON » 8ème Édition ;
- [13] PARK, NOH, Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, Cement and concrete research, 2005, vol 35, pp 842-849.
- [14] SHI and AL., A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste, Transactions of the Japan Concrete Institute, 1998, vol 20, pp 9-14.
- [15] CARISWARD et AL., Effect of constituents on the workability and rheology of selfcompacting concrete, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 143-153.

Références bibliographique

- [16] FERRARIS, OBLA et AL, Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, Cement and concrete research, 2001, vol 31, pp245-255.
- [17] Abd EL FODIL. Elaboration d'un béton autoplaçant à base de fillers Calcaires.
- [18] Journée d'Information sur les Ciments, les Bétons et les Adjuvants, «Les adjuvants, définitions et opportunités d'utilisation», ERCE - CTC Est - GRANITEX, Alger, 2004.
- [19] Comparet C., Thèse de Doctorat en Chimie - Physique, «Etude des interactions entre les phases modèles représentatives d'un ciment Portland et des superplastifiants du béton», Université de Bourgogne – UFR des Sciences et Techniques, Ecole doctorale Carnot, le 8 Octobre 2004.
- [20] Skarendahl.A , Petersson.O, "Self-Compacting Concrete: State-of-the-art report of RILEM Technical Commite 174-SCC", RILEM Publications, France, 2001.
- [21] Legrand.C, "La structure des suspensions de ciment", Le Béton Hydraulique, Presses de l'ENPC, 1982.
- [22]- Walraven .J, "Structural aspects of self compacting concrete", Proceedings of the fourth CANMET/ACI/JCI International Symposium: Advances in Concrete Technology, Tokushima, Japan, 1998.
- [23]- Projet Région "Amélioration des constructions par la maîtrise des BAP" Conseil Régional Midi-Pyrénées dans la thématique de recherche "l'homme et sa région", 2005.
- [24] Grünwald.S, Walraven.J.C, "Rheological measurements on self- compacting fibre reinforced concrete", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 49-58, 2003.
- [25] Nielsson.I, Wallewick.O.H, "Rheological evaluation of some empiric methods – preliminary results", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 59-68, 2003.
- [26]-Utsi.S, Emborg.M, Carlswärd.J, "Relation between workability and rheological parameters", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 154-164, 2003.
- [27]-Bui .V.K, Akkaya .Y, Shah .S.P, "Rheological Model for self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, 99, 6, pp. 549-559, novembre-décembre2002.
- [28] BOUKNI Bariza tenue au feu des betons autoplacants
- [29] Baron J., Ollivier J.P., "Les bétons – Bases et données pour leur formulation", Editions Eyrolles, 1996.
- [30] Sedran.T, De Larrard.F, "Optimization of self compacting concrete thanks to packing model", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 321-332, 1999.

Références bibliographique

- [31] De Larrard.F, Sedran.T, "Mixture-proportioning of high-performance concrete", Cement and Concrete Research, 32, 11, pp. 1699-1704, 2002.
- [32] Jie Shen, Ismail Yurtdas*, Cheikhna Diagana & Alex li une nouvelle méthode de formulation des bétons autoplaçants (BAP)
- [33] PERA J., HUSSON S. and GUILHOT B., "Influence of finely ground limestone on cement hydration", Cement and Concrete Composites, pp. 99-105, 1999.
- [34]Burak Felekog, Selcuk Turkel, Bulent Baradan, "Effect of water/cement"
- [35] Assié.S, "Durabilité des bétons autoplaçants", Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2004.
- [36] MAMILAN (M.).- « Préchauffage du béton : utilisation de la chaleur d'hydratation ». Annales de L'TBTP ,n°387,oct(1980).
- [37] ACKER (P.). – « Effet thermique dans les betons en cours de fabrication et applications aux ouvrages d'art de nouveaux outils, pour une optimisation simultanée du cout et de la qualité ».Annales de L'TBTP n° 422,Série béton 235, p.61-77,Fév.(1986).
- [38] DARCEMONT (M.). – « L'accélération du durcissement de produits en béton par traitement thermique ». CERIB, Monographie n°9, mars (1977).
- [39] Thèse de l'université PAUL SABASTIER de TOULOUSE par FRANCK CASSAGNABERE.