

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DEBOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie des Matériaux

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Master

Spécialité : Génie des matériaux

Option : Contrôle –Qualité des Matériaux(MCQ)

THEME

**Etude comparative des propriétés physiques et
mécaniques du BAP avec et sans étuvage**

Réalisé Par :

Sujet Proposé et suivi par :

- ABDERRAHIM AISSA.M^r TAZROUT M
- MAZARI KEBIR KAMEL

Devantle jury :

- P^R:BEN MONAH.A
- P^R:KHEREBAT.R
- D^R:SAMAR.M

Boumerdes 2016 –2017

Sommaire

Présentation de l'entreprise
Liste des tableaux
Liste des figures

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Béton autoplaçant.

I.1. Historique	3
I.2. Définition des bétons autoplaçants (BAP).....	3
I.3. Les avantages des BAP.....	3
I.4. Concept du béton autoplaçant.....	4
I.5. Principe de formulation des BAP.....	5
I.6. Constituantes de BAP.....	5
6.1. Ciment5	
6.1.1. Définition	5
6.1.2. Différents types de ciments.....	5
6.1.3. Propriétés des ciments.....	6
6.2. Les granulats	9
6.2.1. Définition des granulats	9
6.2.2. Caractéristiques principales des granulats	10
6.2.3. Différents types de granulats	14
6.2.4. Le gravier	15
6.2.5. Le sable	15
6.3. L'eau de gâchage.....	16

6.4. Les adjuvants.....	16
6.4.1. Généralités	16
6.4.2. Les type d'adjuvants	17
6.5. Les ajoutes cimentaires	17
6.5.1. Définition	17
6.5.2. Classification des ajouts	18
6.5.3. Différents types d'ajout.....	18
I.7. Caractérisation d'un béton autoplaçant.....	21
7.1. Propriétés des BAP à l'état frais	21
7.2 .Propriétés des BAP à l'état durci	23
I.8. Méthodes de formulation des BAP.....	25
8.1 Approche Japonaise	26
8.2. Approche Suédoise.....	27
8.3. Approche Française.....	27
8.4. Autres Méthodes.....	28
I.9. Fabrication et transport.....	28

Chapitre II : Béton précontraint.

II.1. Introduction	29
II.2. Définitions	29
2.1. Définition de la précontrainte	29
II.3.Le principe du béton précontraint	30
II.4. Avantages du béton précontraint	31
II.5.Types de précontrainte	32
5.1. Pré-tension.....	32
5.2. Post-tension	33
II.6.Armatures de précontrainte.....	34
6.1. Fils	34
6.2. Les torons	35
6.3. Barre	35
6.4. Les câbles	36

II.7. Les domaines d'emploi de la précontrainte	36
7.1. La post-tension	36
7.2. La pré-tension.....	37

Chapitre III : Etuvage.

III.1. Introduction.....	38
III.2. Définition	38
III.3. Conditions générales à respecter	39
3.1. L'homogénéité des températures du béton	39
3.2. La régularité des températures	39
3.3. L'isolation thermique des équipements	39
3.4. La saturation de l'air en contact avec le béton.....	39
3.5. L'absence de chocs thermiques importants	40
III.4. Les différents types du traitement thermique	40
4.1. Le chauffage du béton avant sa mise en place « béton chaud »	40
4.2. Le chauffage du béton après sa mise en place	40
4.3. La conservation de la chaleur d'hydratation « auto-étuvage »	41
4.4. Apport de chaleur externe	42
4.4.1. Systèmes de chauffage externes pour les moules fixes	42
4.4.2. Systèmes de chauffage externes pour moules ou plateaux mobiles en tunnels ou râteliers	42
4.4.3. Systèmes de chauffage externes dans des chambres ou cellules fixes	44
4.5. Apport de chaleur interne.....	47
III.5. Cycles de traitement thermique des bétons	48
III.6. L'étuvage des produits en béton	49
6.1. Propriété du béton étuvé.....	49
6.2. Les phases de réalisation d'étuvage	49
6.2.1. La phase de prétraitement (avant t1).....	49
6.2.2. La phase de montée en température (t1 à t2).....	50
6.2.3 La phase de maintien à la température de palier (t2à t3).....	50
6.2.4 La phase de refroidissement (t3 à t4)	50
6.3. Cycles d'étuvages.....	51
6.3.1. Cycles d'étuvage théoriques	51
6.3.2. Cycle d'étuvage standard.....	52
6.4. L'effet de traitement thermique sur le comportement des bétons	53

6.4.1. Béton à l'état frais	53
6.4.2. Béton à l'état durci	55
III.7.Conclusion	57

Chapitre.IV : Partie expérimentale.

IV.1 Méthodologie du travail.....	58
• Matériel utilisé.....	58
IV.2. Caractéristiques des constituants.....	59
2.1 .Ciment59	
2.1.1. Caractéristiques physiques du ciment.....	59
2.1.2. Caractéristiques mécaniques du ciment.....	60
2.1.3. Composition chimique du ciment.....	60
2.1.4.Composition minéralogique du ciment.....	60
2.2. Les ajouts.....	60
2.2.1. Filler de calcaire.....	60
Caractérisation physique des fillers de calcaire.....	61
La composition chimique.....	61
La composition minéralogique	61
2.2.2. La Fumée de silice	61
• Caractéristiques physiques.....	61
• Caractéristiques chimiques	62
2.3 Les adjuvants.....	62
2.3.1. Caractéristiques de l'adjuvant chryso fluide optima 220	62
2.4 L'eau de gâchage.....	62
2.5 Les granulats	62
2.5.1. Le sable	63
• Sable HACHIMIA ENG	63
Caractéristiques physiques du sable de HACHIMIA ENG.....	63
Analyse granulométrique du sable.....	64
• Sable de correction (Sable 0/2 Oued Souf).....	65
Caractéristiques physiques du sable correcteur.....	65
Analyse granulométrique du sable 0/2 Oued Souf	65
2.5.2. Le gravier	66
Propriétés physiques du gravier d'AZROU KEDDARA	66
Analyse granulométrique du gravier 3/8 (AZROU KEDDARA)	67
Analyse granulométrique du gravier 8/15 (AZROU KEDDARA)	67

 Courbe de granulométrie des différents granulats	68
IV.3 Formulation des bétons BAP	69
3.1. Formulation préliminaire d'un béton autoplaçant.....	69
3.1.1. Calcul de composition.....	69
3.1.2. Les données de base.....	70
3.2. Optimisation de la composition du BAP	70
3.2.1. Calcul de la formulation à base de calcaire	70
3.2.2. Calcul de la formulation à base de fumée de silice.....	71
3.2.3. Les compositions des deux BAP	72
3.3. Malaxage de béton	73
IV.4 Résultats et interprétations.....	73
4.1 Essais sur béton frais	73
4.1.1. Essais d'étalement au cône d'Abrams	73
4.1.2. Essai de la boîte en « L »	75
4.1.3. Essai de stabilité au tamis	76
IV.5. Traitement thermique	77
5.1. Procédure de traitement thermique	77
5.2. Confection des éprouvettes	78
5.3. Conservation des éprouvettes.....	79
IV.6. Essais à l'état durci.....	80
6.1. Essai de compression	80
6.2. Essai de traction par flexion.....	80
6.3. Essai de traction par fendage.....	81
6.4. Béton à base de fillers calcaire.....	81
6.5. Béton à base fumée de silice	84
• Discussion des résultats	86
6.6. Comparaison entre les deux BAP étuvés	87
• Discussion des résultats	90
Conclusion générale	91
Recommandations	93

Liste des tableaux

Chapitre I : Béton autoplaçant.

Tableau.I.1 : Caractéristiques chimiques des ciments.

Tableau.I.2 : Caractéristiques mécaniques des ciments.

Tableau.I.3 : Classe granulaire.

Tableau I.4 : les valeurs préconisées pour (E.S.V et E.S.P) par DREUX.

Tableau I.5 : classification par rapport au type de granulats.

Chapitre IV : Partie expérimentale.

Tableau. IV.1 : Les caractéristiques physiques du ciment (CPJ CEMII 42.5N).

Tableau. IV.2 : Résistance à la compression et à la flexion du ciment (CPJ CEMII /A 42.5N).

Tableau .IV.3: Composition chimique du ciment (CPJ CEMII 42.5N).

Tableau .IV.4 : Composition minéralogique du ciment (CPJ CEMII 42.5N).

Tableau. IV.5 : les Caractéristiques physiques du filler calcaire.

Tableau. IV.6: Composition chimique des fillers calcaire.

Tableau. IV .7 : La composition minéralogique de filler calcaire.

Tableau. IV.8 : Composition physique de la fumée de silice.

Tableau. IV.9 : Composition chimique de la fumée de silice.

Tableau IV.10 : Caractéristiques de l'adjuvant (chryso fluide optima 220).

Tableau IV.11: Les Caractéristiques physiques du sable **HACHIMIA ENG**

Tableau.IV.12 : Analyse granulométrique du sable **HACHIMIA ENG** selon la norme (NF EN 1260).

Tableau IV.13 : Les Caractéristiques physiques du sable **oued souf** .

Tableau.IV.14 : Analyse granulométrique du sable **oued souf**.

Tableau .IV. 15 : Résumé des résultats des essais physiques de G 3/8 et G8/15.

Tableau.IV. 16 : Analyse granulométrique de G3/8.

Tableau.IV. 17 : Analyse granulométrique de G8/15.

Tableau IV.18: Formulation des deux BAP.

Tableau. IV.19 : Résultats de l'essai au cône d'Abrams.

Tableau. IV.20 : Résultats de la boîte en L.

Tableau. IV.21 : Résultats de l'essai de stabilité au tamis.

Tableau. IV.22:Résultats des essais à l'état frais.

Tableau. IV.23 : Résistances à la de compression.

Tableau. IV.24:Résistance à la traction par fendage.

Tableau. IV.25: Essai de traction par flexion.

Tableau. IV.26:Résistances à la de compression.

Tableau. IV.27: Essai de traction par fendage.

Tableau. IV.28: Essai de traction par flexion.

Tableau. IV.29: Résistance à la compression entre les deux BAP étuvés.

Tableau. IV.30:Résistance à la traction par fendage entre les deux BAP étuvés.

Tableau. IV.31:Résistance à la traction par flexion entre les deux BAP étuvés.

Liste des figures

Chapitre I : Béton autoplaçant.

Figure I.1 : Les granulats.

Figure I.2 : Exemple de courbes granulométriques d'un sable et de deux gravillons.

Figure I.3 : Foisonnement des différents sables en fonction de l'humidité.

Figure I.4 : l'eau de gâchage.

Figure I.5 : Poudre de filler calcaire.

Figure I.6 : La poudre de cendre volante.

Figure I.7 : La poudre de fumée de silice.

Figure I.8 : Pouzzolanes naturelles.

Figure I.9 : Laitier de hauts fourneaux.

Figure I.10 : Essai au cône d'Abrams.

Figure I.11 : Essai de boîte en L.

Figure I.12 : Essai au tamis.

Figure I.13 : Eprouvettes cylindriques.

Figure I.14 : Machine d'essai de compression.

Figure I.15: Machine d'essai de Traction par fendage.

Figure I.16: Machine d'essai de Traction par flexion.

Chapitre II : Béton précontrainte.

Figure II.1 : *Le pont du Jardin des plantes de Grenoble.*

Figure II.2: Principe de la précontrainte en prenant une poutre comme exemple.

Figure II.3: Principe de la méthode par pré-tension.

Figure II.4: Banc de précontrainte.

Figure II.5: Exemple de la méthode par pré-tension.

Figure II.6: Mise en tension d'un câble (post-tension).

Figure II.7: Procédés de production par démoulage différé : Seacisol (a), dalle alvéolée GA (b) et système Tridal GA (c).

Figure II.8: Procédés de production par démoulage immédiat : Poutrelle Gf et dalle alvéolée SEAC Gf.

Figure II.9: Dispositif constructif d'un plancher « poutrelle-hourdis ».

Figure II.10: Possibilités de montage avec les poutrelles Gf.

Figure II.11: Platelages de l'usine de Blagnac (31).

Figure II.12: Positionnement des fils sur la piste(a) et vérin monocâble de tension(b).

Figure II.13: Mouleuse Prensoland (a) et son approvisionnement(b).

Figure II.15: Bâchage des éléments avant l'étuvage.

Figure II.16: différents types d'éléments de plancher préfabriqué.

Figure II.17 :Planchers alvéolaires.

Figure II.18 :Planchers prédalles.

Figure II.19 :Planchers nervurées.

Figure II.20: fils d'aciers précontraints.

Figure II.21: Torons d'aciers précontraints.

Figure II.22: Barre d'aciers pour béton précontraint.

Figure II.23: Câbles d'aciers.

Figure II.24: l'un des cas les plus courants d'utilisation des poutres précontraintes :
Les parkings.

Figure II.25: poutrelles standard précontraintes par pré-tension.

Chapitre III : Etuvage.

Figure III.1: tunnels d'étuvage pour moules de voussoirs.

Figure III.2: tunnel circulaire et échangeur air- eau pour le chauffage.

Figure III.3: cellules isolées avec portes automatiques.

Figure.III.4 : détail d'un rideau d'air à l'entrée des chambres.

Figure.III.5 : grande chambre à rayonnage avec rideau d'air à l'entrée et brassage par Circulation.

Figure.III.6 : schéma de circulation d'air dans les cellules de durcissement.

Figure.III.7 : Exemple de chambre mobile avec bâches « accordéons suspendus».

Figure.III.8 : Exemple de chambres mobiles avec bâches« baldaquins».

Figure.III.9: cellules fixes avec plafond amovible manipulé par pont robotisé.

Figure.III.10: forme générale d'un cycle.

Figure.III.11 : cycles d'étuvage théoriques de quatre sites du groupe SEAC.

Figure.III.12:cycle d'étuvage standard.

Chapitre IV : Partie expérimentale.

Figure. IV.1: Malaxeur utilisé pour la fabrication du béton.

Figure.IV.2 : Eprouvette cylindrique (16×32).

Figure.IV.3 : Eprouvette prismatique (10×10×40).

Figure. IV.4 : Bac de conservation des éprouvettes.

Figure. IV.5 : Cycle d'étuvage appliqué aux éprouvettes.

Figure. IV.6 : étuve pour le traitement thermique.

Figure. IV.7 : Essai d'étalement (cône d'Abrams).

Figure. IV.8 : évolution de l'étalement.

Figure. IV.9 : Essai de la boîte en L.

Figure. IV.10 : évolution de taux de remplissage.

Figure. IV.11 : Essai de stabilité au tamis.

Figure. IV.12 : évolution de stabilité au tamis.

Figure. IV.13 : Essai de compression.

Figure. IV.14 : Eprouvette après la compression.

Figure. IV.15: appareil de traction par flexion.

Figure. IV.16 : Essai de traction par flexion.

Figure. IV.17: appareil de traction par fendage.

Figure. IV.18 : Essai de traction par fendage.

Figure. IV.19 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge de BAPC étuvé et non étuvé.

Figure. IV.20 : Evolution de la résistance à la traction par fendage en fonction de l'âge de BAPC étuvé et non étuvé.

Figure. IV.21 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des BAPC étuvé en non étuvé en fonction de l'âge.

Figure. IV.22 : Gain ou Perte de résistance de BAPC étuvé à 24h avec BAPC non étuvé à différents âges.

Figure. IV.23: Evolution de la résistance à la compression des BAPF étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.

Figure. IV.24 : Evolution de la résistance à la traction par fendage des BAPF étuvé en non étuvé en fonction de l'âge.

Figure. IV.25 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des BAPF étuvé en non étuvé en fonction de l'âge.

Figure. IV.26 : Gain ou Perte de résistance de BAPF étuvé à 24h avec BAPF non étuvé à différents âges.

Fig. IV. 27 : Evolution de la résistance à la compression des BAPC et BAPF étuvés en fonction de l'âge.

Fig. IV.28 : Evolution de la résistance à la traction par fendage des BAPC et BAPF étuvés en fonction de l'âge.

Fig. IV.29 : Evolution de la résistance à la traction par fendage des BAPC et BAPF étuvés en fonction de l'âge.

Fig. IV.30 : Gain de résistance de BAPF avec BAPC étuvés.

Remerciements

Nous tenons à remercier vivement notre promoteur

Mr : TAZROUT

Pour avoir dirigé ce projet.

Sans oublier de remercier tous les enseignants

du département

GÉNIE DES MATÉRIAUX.

*Nous tenons aussi à remercier tous les personnels
de laboratoire **ALCAHYD BOUDOUAOU.***

*Nos sincères remerciements à toutes les personnes qui
nous ont aidé, conseillé, orienté et encouragé.*

KAMEL ET AISSA.



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

*Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire
et de réfléchir, la force d'y croire, la patience
d'aller jusqu'à bout du rêve.*

A mes chers parents, frères et sœurs.

A toute la famille

MAZARI KEBIR et ABDERRAHIM

Et spécialement à meryem koufi et fatima maleha

A mes adorables amis hakim ,walid, alilo ,kamre din ,mustafa.

A tout le groupe MCQ15.

*A ceux qui cherchent leur nom ici, cette marque d'affection me va
droit au cœur :(beaucoup de noms me sont venus à l'esprit en
rédigeant ces linges et la peur d'en oublier un, me
poussent à cette écriture implicite).*

Kamel et Aissa.

Introduction générale

Les bétons autoplaçants possèdent une plage d'utilisation très large : des résistances couvrant la gamme des bétons ordinaires aux bétons à hautes performances, mais également des utilisations diverses (de l'habitation aux ouvrages d'art).

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux très fluides, dont la spécification est de se mettre en place sous l'effet de leur poids propre sans apport de vibration externe ou interne. Leur utilisation ne cesse de s'étendre en Europe et sur le continent nord-américain en raison de l'intérêt économique et des possibilités techniques qu'ils représentent :

- Diminution du temps de réalisation lors de la mise en place du béton sur chantier,
- Diminution de la pénibilité du travail sur chantier,
- Possibilités techniques nouvelles : coulages de zones fortement ferraillées, dans des coffrages à géométrie complexe ou très encombrée, réparation des zones difficilement accessibles.

Cette mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une très grande fluidité du matériau mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat des superplastifiants et de fines et ou l'emploi d'agents de viscosité. Parallèlement à cela, les BAP présentent les particularités de compositions suivantes comparativement aux bétons vibrés : volume de pâte élève, dosage élève en fines, rapport G/S proche de 1 et un diamètre maximal de granulats D_{max} réduit.

La présente étude a pour objectif de formuler un béton autoplaçant à base de la taille des granulats et des ajouts cimentaires (filler calcaire ou la fumée de silice). Et envisageant l'étude de l'influence du traitement thermique sur les propriétés physico mécaniques de 2 types de BAP : avec et sans traitement thermique (étuvage).

Pour cela, ce mémoire est divisé en deux parties ; une partie bibliographique et une partie expérimentale.

* La première partie, comporte un chapitre, consacré à la recherche bibliographique.

● Le chapitre I : présente l'introduction, définition des bétons auto-plaçant, concept du BAP, constituant du BAP (ciment, l'eau, les ajouts cimentaires, les adjuvants, les granulats), méthode de formulation des BAP, caractérisation d'un BAP (l'état frais et l'état durci) et l'influence des additions sur les propriétés des BAP ainsi que sur la fabrication transport et mise en place des BAP.

Chapitre II : Etude sur le béton précontraint.

Chapitre III : traitement thermique des bétons autoplaçants.

* Le deuxième partie: C'est une démarche expérimentale qui consiste à caractériser tous les matériaux utilisés (ciment, agrégats, superplastifiant, eau, ajout), en suite caractérisation des bétons que ce soit à l'état frais et durci (tous les bétons sont formulés avec un seul adjuvant).

Introduction générale

A L'issue de cette étude les résultats des performances obtenues des bétons autoplaçants élaborés sont comparés :

BAP sans traitement thermique et BAP avec traitement thermique.

A travers les résultats obtenus, c'est tout l'intérêt de l'application de la technique d'étuvage des BAP qui mise en évidence par des calculs de perte et de gain de résistance mécanique.

Le but recherche est le thermoactivation du BAP à l'état jeune et long terme pour réduire la période de durcissement et afin d'augmenter la production et réduire les immobilisations

Enfin, une conclusion générale et recommandations des nouvelles perspectives en termes d'utilisation de ce type de matériau sont présentés.

Présentation :

L'algérienne des canalisations hydrauliques (ALCAHYD), est une société située à BOUDOUAOU wilaya de Boumerdes, fondée en octobre 2004 par le Groupe AMENHYD qui s'est spécialisé dans la production des éléments préfabriqués en béton pour les secteurs du bâtiment, travaux publics et hydrauliques.

Nos produits sont destinés pour:

I. Assainissement des eaux usées et pluviales:

- Canalisation en béton armé.
- Les regards de visite.
- Les dalots préfabriqués.

II. Aménagement et VRD:

- Les différents types de bordures et caniveaux
- Pavés auto bloquant.
- Parpaing et Hourdis

Dans le souci de répondre aux besoins grandissant du marché national, ALCAHYD a été renforcée par la réalisation d'une deuxième unité de fabrication située dans la wilaya d'AIN DEFLA. Cette dernière est dotée d'une capacité de production nettement supérieure à celle de BOUDOUAOU et équipée d'un ensemble d'automatisme de haute technologie, permettant de satisfaire les attentes d'une clientèle de plus en plus exigeante.

A travers cette stratégie d'investissement soutenue par un encadrement qualifié, nous visons à garantir régulièrement des produits de qualité, certifiés et conformes aux normes internationales, marquant ainsi notre contribution à la réalisation des grands projets, attribués aux grandes sociétés nationales et multinationales comme:

Présentation de la société

Un produit de qualité pour un investissement durable

Le savoir-faire d'ALCAHYD contribue à la protection de l'environnement, en réalisant des solutions pérennes et étanches en béton armé.

destinées aux réseaux d'eaux pluviales et d'eaux usées. ALCAHYD propose une proximité géographique qui couvre tout le territoire pour répondre aux besoins les plus particuliers des clients, quelle que soit leur localisation.



Le service ALCAHYD, c'est :

- Assurer la prise en compte, depuis l'étude jusqu'à la réalisation, de la totalité du besoin du client pour les réseaux d'assainissement
- Garantir la pérennité et l'étanchéité des composants des réseaux d'assainissement
- Garantir un service de proximité, une production adaptée, des livraisons maîtrisées
- Accompagner ses clients pour la mise en œuvre des produits sur chantier
- Innover et développer

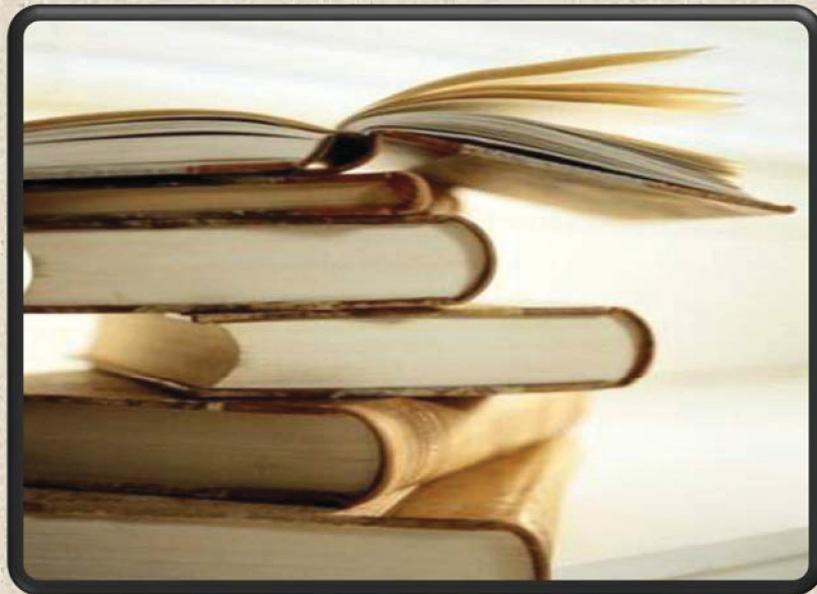
Alcahyd offre des solutions adaptées pour:



- Réseaux d'assainissement (tuyaux, regards de visite, accessoires de branchement,
- ouvrages de raccordement, etc.) Ouvrages de bassins
- Eléments de voirie (bordures, caniveaux,
- Produits de génie civil

Partie 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUES



chapitre 1

Béton autoplaçant

I.1.Historique :

L'idée de produire un béton autoplaçant est apparue au Japon pour la première fois en 1986, les Japonais ont été le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique.

Afin de satisfaire les conditions habituellement contradictoires (déformabilité et résistance à la ségrégation), on a fait appel à la technique de béton coulé sous l'eau, en effet, la première génération des bétons autoplaçants est formulée de la même manière que les bétons destinés aux structures submergées, mais avec une viscosité plus faible et donc une maniabilité plus élevée.

L'utilisation de cette nouvelle gamme de béton est en train de devenir la plus répandue dans le monde. En effet depuis son développement, le nombre d'ouvrages réalisés avec les bétons autoplaçants ne cesse d'augmenter surtout au Japon où l'utilisation de ce nouveau matériau, est répandue dans le domaine de la construction.

Les bétons autoplaçants offrent un grand nombre de possibilités très intéressantes dans de nombreux domaines de la construction tels : le renforcement et la réparation d'ouvrage d'art (application des couches minces dans des endroits d'accès difficiles), la construction des éléments préfabriqués à haute résistance, moulage et mise au point de béton pour toute utilisation (béton coulé sous l'eau pour réparation, béton confiné, pieux, etc.).

I.2.Définition des bétons autoplaçant (BAP) :

C'est un béton de la haute technologie qui est très fluide qui permet une mise en œuvre sans aucun apport d'énergie de vibration (par l'effet de gravité ou de son propre poids) ; tout en ne permettant aucun risque de ségrégation, dont la consistance est modifiée par l'utilisation des adjuvants spéciaux.

I.3.Les avantages des BAP :

Le BAP présente de nombreux avantages :

- Mise en œuvre sans vibration.
- Bétonnages plus rapides et optimisation de productivité sur chantier.
- Coulage de murs verticaux de grande hauteur.
- Bétonnage de formes complexes avec un excellent remplissage.
- Plus grande fluidité pour un meilleur pompage.
- Enrobage des armatures amélioré.
- Optimisation de la qualité de parement.
- Amélioration des conditions de travail sur le chantier.

I.4. Concept du béton autoplaçant :

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. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons auto-compactants ("self-compacting, concrete", traduit par béton auto-plaçant ou béton autonivellant). Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier. [1]

Le rôle de la pâte est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement.

Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un défloculant, sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée. Le début du développement des BAP en France coïncide d'ailleurs à l'arrivée des superplastifiants de type polycarboxylate, à fort pouvoir défloculant. Ces adjuvants ont un double effet, électrique et stérique, qui leur permet de disperser au mieux les particules. La quantité de fines n'est pas non plus toujours suffisante pour empêcher la ségrégation. On a recours alors aux agents de viscosité. Ces adjuvants sont souvent des polymères, composés de longues molécules organiques, qui augmentent la viscosité de l'eau de gâchage. Ils assurent une meilleure stabilité du béton et le rendent moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats, courantes en centrale à béton. Cela étant, en pratique leur utilisation est au contraire peu répandue, car ils entraînent un surcoût, qui s'ajoute aux surcoûts dus au superplastifiant et aux additions. Evidemment, un béton est qualifié d'auto-plaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais. Il existe de part le monde divers essais pour caractériser l'ouvrabilité des BAP.

I.5. Principe de formulation des BAP :

Les BAP doivent présenter une grande fluidité et pouvoir s'écouler avec un débit suffisant sans apport d'énergie externe (vibration) à travers des zones confinées (armatures) en présence d'obstacles ou se mettre en place dans des coffrages de grande hauteur. Ils doivent s'opposer à la ségrégation « dynamique » (en phase de coulage) et à la ségrégation « statique

» (une fois en place) afin de garantir l'homogénéité des caractéristiques et de ne pas présenter de ressuage ou de tassement. Ils doivent aussi être pompables.

Pour ce faire la formulation des BAP repose sur trois critères.

- Fluidification de la pâte: elle est obtenue sans ajout d'eau par utilisation de superplastifiants à fort pouvoir défloculant.
- Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement: la taille des granulats qui peuvent être concassés ou roulés est généralement plus faible; le volume de pâte et la quantité de fines sont plus importants que pour un béton mis en œuvre par vibration.
- Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation: elle est obtenue par l'emploi d'agents de viscosité et l'incorporation d'additions (fillers, cendres volantes, laitier moulu, fumées de silice).

I.6. Constituantes de BAP :

6.1. Ciment :

6.1.1. Définition :

Le ciment est un liant hydraulique, sous forme d'une poudre minérale fine. La réaction chimique entre la poudre de ciment et l'eau produit un minéral artificiel insoluble. Plus les grains de ciment sont fins, plus cette réaction (hydratation) s'opère rapidement. Le durcissement a lieu aussi bien à l'air que sous l'eau. [2]

6.1.2. Différents types de ciments :

Les ciments incorporent les composants suivants en diverses proportions : clinker et laitier de haut fourneau, éventuellement cendres volantes siliceuses et Calcaire.

Suivant la proportion de chacun de ces éléments on peut les classer de manière standardisée. La désignation des ciments est en effet normalisée. Les ciments peuvent être classés en cinq grandes familles et vingt-sept variantes principales pour plus de détails:

- Ciment Portland (noté CEMI)-Clinker.
- Ciment Portland décomposé (noté CEMII)-Clinker principalement, associé à un deux ou trois des autres composants.
- Ciments de hauts fourneaux (noté CEMIII)-Mélanges de clinker et de laitier de haut fourneau.
- Ciments pouzzolaniques (noté CEMIV)
- Ciments au laitier et aux cendres ou ciment composé (noté CEMV).

- Ciment blanc (différent des précédents par sa composition chimique et la méthode de fabrication).

6.1.3. Propriétés des ciments :

A- Caractéristiques physiques:

Comportement physico-chimique de la pâte:

Le ciment est constitué essentiellement de :

- ❖ **C3S : Silicate tricalcique**
- ❖ **C2S : Silicate bicalcique**
- ❖ **C3A : Aluminate tricalcique**
- ❖ **C4AF : Alumino-ferrite-tétracalcique**

Une fois la poudre de ciment mélangée à l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système constituant des hydrates stables avec formation des cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise.

Prise:

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié à de nombreux paramètres :

- ✓ Le type de ciment ;
- ✓ La finesse de mouture, le début de prise est d'autant plus rapide que la finesse est plus poussée ;
- ✓ La température ambiante, la prise étant stoppée à 0 °C, alors qu'elle est accélérée dès que T° dépasse 30 °C ;
- ✓ La présence de matières organiques dans l'eau ;
- ✓ L'excès d'eau de gâchage qui agit alors comme retardateur de prise.

La norme spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

- ✓ 1 h 30 pour les ciments de classes 32,5 ;
- ✓ 1 h pour les ciments des classes 42,5 et 52,5 ;

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h 30 pour la majorité des ciments pour une température ambiante de 20°C.

Durcissement :

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent de croître.

Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classes élevées et de préférence de classe « R » c'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire « rapide ». Il est également possible d'utiliser du ciment alumineux fondu CA qui après quelques jours a atteint la quasi-totalité de sa résistance.

Finesse de mouture :

La finesse de mouture, est appelée aussi « finesse Blaine », exprimée en m^2/kg , représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1kg de ciment. Elle est, d'une façon générale, comprise entre 300 et 350 (notons que la finesse s'exprime également en cm^2/g ;

Il ressort qu'une finesse de 300 m^2/kg correspond à 3000 cm^2/g). Certaines ciments tels que les ciments prompts naturels « CNP » ont une Blaine supérieure à 450 m^2/kg . Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'éventement du ciment sont accrus.

Retrait :

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16cm de longueur et d'une section droite de 4×4 cm, conservées dans l'air à une température de 20 °C et une hygrométrie de 50 %.

La norme impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

- ✓ 800 $\mu m/m$ pour les ciments Portland CPA-CEM I et CPJ-CEM II de la classe 32,5.
- ✓ 1000 $\mu m/m$ pour des types de ciment identiques mais des classes 32,5 R-42,5 et 42,5 R.

Expansion :

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux CaO ou de magnésie libre MgO.

Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

La stabilité se détermine par l'essai Le Chatelier, qui consiste à mesurer l'écartement de deux aiguilles solidaires d'un moule rempli de la pâte de ciment à tester, et conservé dans l'eau

bouillante. La valeur de l'expansion mesurée doit être inférieure à 10mm pour tous les types de ciments courants.

Le pourcentage maximal de magnésie est limité ; sa valeur, spécifiée par la norme, doit être au plus égale à 5 % pour les CPA-CEM I ainsi que pour le clinker.

✚ Gonflement :

Bien que non normalisé, il est utile de rappeler qu'alors qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est émergé dans l'eau, ses variations dimensionnelles étant environ le 1/10e de celles constatées dans l'air.

B- Caractéristiques chimiques :

Elles sont déterminées sur le tableau ci-dessous :

Tableau.I.1 : Caractéristiques chimiques des ciments.

Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale en % de la masse
Perte au feu	CPA –CEMI CHF-CEM III CLK- CEM III	Toute classe	≤ 5
Oxyde de magnésium MgO	CPA- CEM I	Toute classe	≤ 5
Résidu insoluble	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes classes	≤ 5
Sulfates SO ₃ limite supérieure	CPA-CEM I CPJ-CEM II	32.5 32.5 R 42.5	≤3.5
	CPZ-CEM IV CLC-CEM V CHF-CEM III	42.5 52.5 52.5 R Toutes classes	≤ 4 ≤ 4
Chlorures	Tous types de ciment	52.5 R Toutes les autres classes	≤ 0.05 ≤ 0.10

C- Caractéristiques mécaniques :

Il y a trois classes différentes en fonction de la résistance normalisée à 28J ; et sous –classe < R > associées à ces trois classes principales, pour designer des ciments.

On cite la classe 32,5 - classe 42,5 - classe 52,5.

Tableau.I.2 : Caractéristiques mécaniques des ciments.

Classe	Résistance à la compression (MP) [EN 196_1]				Retrait De prise P 15-433 [µm/m]	Début De prise EN196-3 [min]	stabilité EN196- 3 [min]
	au jeune âge		à 28 jours				
	2 jours	7 jours	Mini	Maxi			
32.5	.	(17.5)	≥32.5(30)	≤52.5	≤800	≥90	≤10
32.5R	≥13.5(12)	.	≥32.5(30)	≤52.5	≤1000	≥90	≤10
42.5	≥12.5(10)	.	≥42.5(40)	≤62.5	≤1000	≥60	≤10
24.5R	≥20(18)	.	≥42.5(40)	≤62.5	≤1000	≥60	≤10
52.5	≥20(18)	.	≥52.5(50)	.	.	≥60	≤10
52.5R	≥30(28)	.	≥52.5(50)	.	.	≥60	≤10

6.2. Les granulats :

6.2.1. Définition des granulas:

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes: fillers; sablons; sables; graves; gravillons; ballast; enrochements.

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.



Figure I.1 : Les granulats.

6.2.2. Caractéristiques principales des granulats :

Les granulats sont les principaux composants du béton (70 % en poids). Les performances mécaniques des granulats vont donc conditionner la résistance mécanique du béton et leurs caractéristiques géométriques et esthétiques, en particulier, l'aspect des parements des ouvrages. Le choix des caractéristiques des granulats (roulés ou concassés, teintés, dimensions) est déterminé par les contraintes mécaniques, physico-chimiques et esthétiques du projet à réaliser et de mise en œuvre du béton (critère de maniabilité, enrobage).

A. Caractéristiques géométriques :

Classe granulaire :

Les granulats sont désignés selon leur classe granulaire d/D (avec d: dimension inférieure et D: dimension supérieure). L'intervalle d/D est appelé classe granulaire. Les classes granulaires sont spécifiées en utilisant des séries de dimensions de tamis (en mm).

- ✓ Série de base: 1 / 2 / 4 / 8 / 16 / 31,5 / 63
- ✓ Série de base + série 1 : 1 / 2 / 4 / 5,6 / 8 / 11,2 / 16 / 22,4 / 31,5 / 45 / 63
- ✓ Série de base + série 2 : 1 / 2 / 4 / 6,3 / 8 / 10 / 12,5 / 14 / 16 / 20 / 31,5 / 40 / 63

Tableau.I.3 : Classe granulaire.

<i>Les granulats les plus utilisés</i>		
<i>Familles</i>	<i>Dimensions</i>	<i>Caractéristiques</i>
<i>Fillers</i>	0/D	D < 2 mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
<i>Sables</i>	0/D	d = 0 et D ≤ 4 mm
<i>Graves</i>	0/D	D ≥ 6,3 mm
<i>Gravillons</i>	d/D	d ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm
<i>Ballasts</i>	d/D	d = 31,5 mm et D = 50 ou 63 mm

Les intervalles d/D et 0/D sont appelés classes granulaires.

granularité :

La granularité représente la distribution dimensionnelle des grains contenus dans un granulat. Elle est déterminée par tamisage (avec une série de tamis, de dimensions d'ouvertures décroissantes) et exprime le pourcentage massique de granulats passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis. La proportion de particules retenues par un tamis s'appelle le refus, son complément le passant.

Elle est représentée par une courbe granulométrique représentant les dimensions de tamis en abscisses et en ordonnées les pourcentages de passants cumulés à travers les tamis successifs(en poids de grains).

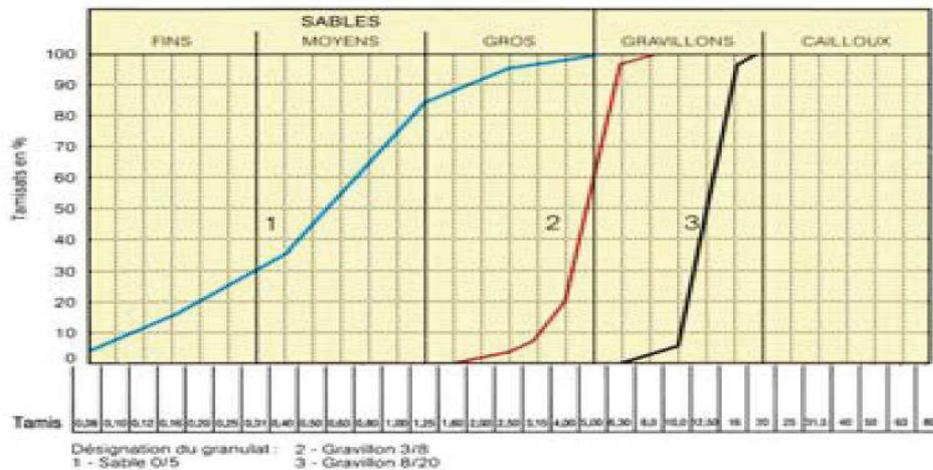


Figure I.2 : Exemple de courbes granulométriques d'un sable et de deux gravillons.

+ forme des gravillons :

- **Coefficient d'aplatissement :**

Forme des gravillons est déterminée par l'essai d'aplatissement (A). Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Plus A est élevé, plus le gravillon contient d'éléments plats. Une mauvaise forme à une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation.

- **Module de finesse :**

Les sables sont caractérisés par le module de finesse (MF). Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages, sur différents tamis. Le module de finesse surtout utilisé pour les sables permet de caractériser leur granularité par une seule valeur. Celle-ci dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin. Un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.

B. Caractéristiques physico-chimiques :

✚ La masse volumique absolue :

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains.

La densité absolue est le rapport de la masse absolue d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse du même volume d'eau distillée à la même température.

✚ La masse volumique apparente :

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

La densité apparente à l'état compacté ou non compacté sera obtenue en établissant le rapport de la masse apparente d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse d'une même quantité d'eau distillée à même température.

✚ La porosité et la compacité :

- **La porosité** : En général la porosité est le rapport du volume des vides au volume total on peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent.

$$p = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}}$$

- **La compacité** : La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total. Ou volume des pleins par unité de volume apparent.

$$c = \frac{\text{plein}}{\text{vide} + \text{plein}}$$

La porosité et la compacité sont liées par la relation: $p + c = 1$

✚ La teneur en eau :

La teneur en eau d'un matériau est le rapport de la masse d'eau contenu dans ce matériau à la masse du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le masse d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec.

$$W = \frac{E}{P_s} = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

E = Poids d'eau dans le matériau.

P_s = Poids du matériau sec.

P_h = Poids matériau humide

Si W est exprimé en % :

$$W\% = 100 \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

Les granulats utilisés pour la confection du béton contiennent généralement une certaine quantité d'eau variable selon les conditions météorologiques. L'eau de gâchage réellement utilisée est par conséquent égale à la quantité d'eau théorique moins l'eau contenue dans les granulats. Il faut par conséquent disposer de moyens pour mesurer combien il y a d'eau dans les granulats.

✚ Foisonnement :

Le foisonnement est l'augmentation du volume total du granulat fin à l'état humide par rapport à l'état sec. La tension superficielle de l'humidité éloigne les particules, provoquant un accroissement de volume. Même compacté au préalable, un granulat fin humide (tel le sable) foisonne lorsqu'on le manipule à la pelle ou qu'on le déplace lorsqu'il est humide [10].

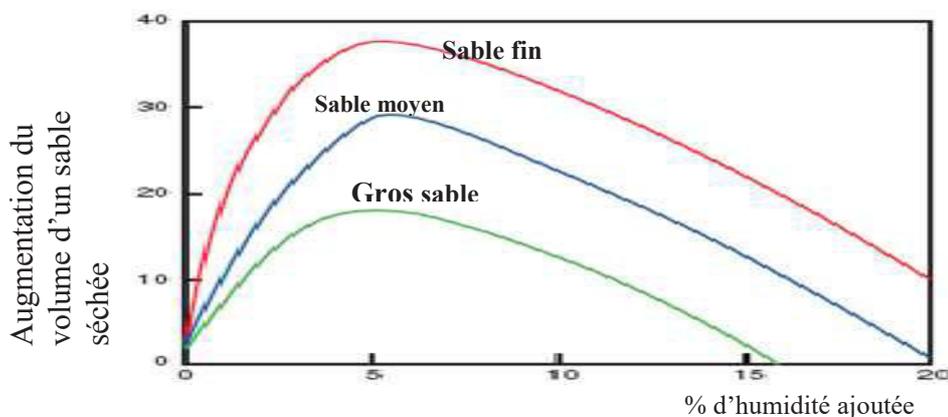


Figure I.3 : Foisonnement des différents sables en fonction de l'humidité.

✚ La propreté :

Le granulat doit être propre. La loi interdit tout déchet nuisible à la résistance du béton tel que : les sciures de bois, la ferraille ... le pourcentage est inférieur à 1%. Le granulat ne doit pas aussi contenir des huiles et la matière organique...la présence de l'argile diminue l'adhérence entre mortier et gravier, Donc diminue la résistance. Un excès de fines entraîne un dosage important en eau, mais un manque des fines conduit à des bétons peu malléables. Pour les sables, la propreté est mesurée par la détermination de l'équivalent de sable (E.S).

Principe:

On agite une quantité de sable dans une solution la vente, on laisse repose et mesurer la hauteur du dépôt de sable visible, égale à h_1 et la hauteur total avec le floculât est h_2 le E.S est calculé suivant la formule :

$$E.S = \frac{h_1}{h_2} \times 100$$

On rencontre le E.S à vue et le E.S à piston (E.S.V et E.S.P) :

Tableau I.4 : les valeurs préconisées pour (E.S.V et E.S.P) par [DREUX]

E.S.V	E.S.P	Types de sables	Influences
<65	<60	Argileux	Risque retrait ou gonflement
>65	<75	Très argileux	Retrait assez fort
75 – 85	70 – 80	Bon sable	Béton haute qualité
>85	>80	Manque de fines argiles	Manque de plasticité

C. Caractéristiques mécaniques :

La nature du matériau est caractérisée par la roche ou le produit constituant le grain : basalte calcaire, grés, barytine... le grain peut être un produit naturel obtenu par criblage (grain plus ou moins arrondi) ou un produit de concassage (grain plus ou moins anguleux). La quantité des fines doit être déterminée par des essais d'écrasement ou d'usure, on peut citer :

Los angles (LA) :

Il consiste à introduire dans un cylindre horizontal une quantité de granulat à étudier en présence de boules d'aciers et à vérifier la quantité des fines particules obtenues pendant un certain temps de rotation, la norme permet la classification suivante par rapport au type de granulat :

Tableau I.5 : Classification par rapport au type de granulat.

Types	Vss
A	30
B	40
C	40
D	50

6.2.3. Différents types de granulats :

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être :

- ✚ **Naturel:** d'origine minérale, issu de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- ✚ **Artificiel:** D'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.
- ✚ **Recyclé:** Obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

6.2.4. Le gravier :

Grains de dimension allant de 1 à 125 mm, d'après la norme NFP18-591 [3] l'essai de propreté des graviers consiste à déterminer le pourcentage d'éléments < 0.5 mm, le pourcentage de vase et argiles, éliminées lors de l'essai doit être ≤ 1.5 % pour gravillons n'ayant pas subi de concassage, et ≤ 3 % pour ce qui ont subi le concassage. La granularité du gravier est fixée par le D prescrit ou admissible pour le béton à préparer, l'absorption d'eau (la norme NFP18-591 [3] fixe à 5% la valeur maximale pour les bétons hydrauliques).

6.2.5. Le sable :

C'est un produit provenant de la désagrégation naturelle de la pierre siliceuse (quartz) et/ou du silex (silicium), Il se compose de grains meubles n'ayant aucune cohésion.

La dimension des grains peut varier de 0.15 à 4.76 mm; si le grain est plus petit que 0.6 mm parle de «sable fin» ; s'il atteint presque 1.2 mm «sable moyen» et s'il atteint enfin presque 4.76 mm, c'est le «gros sable»; ce dernier ayant des grains de plus de 2 mm ressemble à du gravier fin, appelé alors «sable graveleux».

Grains de dimension allant de 0 à D où $1 < D \leq 6.3$ mm, à l'essai dit équivalent de sable «ES» la norme NF P18-598 [4] sont préférable les sables ayant un «ES» compris entre 75 et 85 % [5], de granularité définie principalement par les paramètres suivant:

- ✓ Teneur en fines (passant à 0.08 mm ≤ 12 %);
- ✓ Le module de finesse ($M_f = 1.8$ à 3.2) le meilleur compromis résistance-maniabilité-maintien de l'homogénéité est situé à 2.5 ± 0.35 environ ;
- ✓ Une bonne continuité de la courbe granulométrique est nécessaire pour la maniabilité du béton (norme NFP18-541 [6]).

D'autant meilleur qu'il est composé de grains de dimension différentes; les grains moyens

bouchent les vides entre les plus gros et les très fins bouchent entre les moyens, on obtient ainsi une bonne consistance, et on prescrit les modules de finesse suivants:

- ✓ Sable pour béton pour constructions : entre 1.40 et 3.40 ;
- ✓ Sable pour béton maigre pour fondations : entre 0.90 et 3.40 ;
- ✓ Sable pour mortier de maçonnerie : entre 0.90 et 1.70 ;
- ✓ Sable pour mortier de carrelage : entre 0.90 et 1.70 ;
- ✓ Sable pour plafonnage : entre 0.90 et 3.40 ;
- ✓ Sable pour couche de fondation pour dallage : entre 0.90 et 2.50 ;

6.3. L'eau de gâchage :

Toutes eaux durées eau public d'eau potable convient à la fabrication de BAP. Les eaux recyclées de gâchage et de lavage ne conviennent que sous certaines

Conditions restrictives. En raison d'éventuels effets indésirables sur les propriétés du béton. Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable sur la viscosité et la capacité de remplissage du BAP, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est ainsi très important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats et tout spécialement du sable. Cas échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants.



Figure I.4 : l'eau de gâchage.

6.4. Les adjuvants:

6.4.1. Généralités :

Les adjuvants fournissent au formateur de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur fabrication au temps froid ou au temps chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés du béton durci, voir même lui conférer des propriétés nouvelles.

Ce sont eux, par exemple, qui ont rendu possible et donné son extension au concept actuel de hautes performances. Ils contribuent à faire de la formulation, un métier dont le savoir-faire, la capacité de répondre aux besoins du maître d'œuvre et de l'entrepreneur peut être l'objet d'un progrès continu. [7]

d'après la norme NF P18 103, un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieur à 5% de la masse de ciment) aux bétons, mortiers ou coulis lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque les modifications recherchées de tel ou tel de leurs propriétés à l'état frais ou durci. [8]

6.4.2. Les type d'adjuvants :

- **Les plastifiants (NF P18 335) :**

Ces adjuvants ont pour fonction principale, à teneur en eau égale, d'augmenter l'ouvrabilité du béton sans en diminuer la résistance mécanique.

Ce sont des savons anioniques, Lignon sulfonâtes, détergents, synthétiques non ionique,...etc. Les plastifiants jouent sur la viscosité de la pâte de ciment en défloculant les grains, diminuent les frottements inter granulaires par effet de lubrification et modifient les charges électriques de surface. Et l'amélioration de la plasticité des bétons facilite la mise en place, et en n'altère pas les résistances.

- **Les plastifiants réducteurs d'eau (NF P18 336) :**

Ces adjuvants ont pour fonction principale, à même ouvrabilité de conduire à une augmentation des résistances mécaniques par une réduction de la teneur en eau d'un béton.

Ils sont à base de Lignon sulfonâtes de sucres, de savons de résine, de mélamine ou naphthalène.

La diminution de la teneur en eau de 10 à 35 litres par m³ de béton entraîne une augmentation de sa compacité, par conséquent de sa durabilité. Cette amélioration des caractéristiques résulte de la diminution des vides dus à l'excès d'eau.

- **Les super plastifiants (NF P18 333) :**

Introduit dans un béton en général peu avant sa mise en œuvre, ils ont pour fonction principale de provoquer un fort accroissement de l'ouvrabilité du mélange.

Ce sont en général des produits de synthèse organique, les plus utilisés sont les dérivés de mélamines ou de naphthalène. Ils peuvent être aussi fabriqués à partir de sous-produits de l'industrie du bois purifié et traité.

Ces superplastifiants sont particulièrement utiles pour la réalisation des fondations, dallage, sols industriels...etc, et leurs effets ont une durée limitée dans le temps (30 à 60 mn).

6.5. Les ajouts cimentaires :

6.5.1. Définition :

Les ajouts sont des matières premières naturelles, artificielles, sous-produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluants, ils sont ajoutés soit au mélange

de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leurs pourcentages dans la masse varient suivant le but de l'addition et le rôle qu'elle peut jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. [9]

6.5.2. Classification des ajouts :

Il existe deux types d'ajouts selon leurs origines :

A. Les ajouts inertes :

Les ajouts inertes sont des éléments naturels ou artificiels chimiquement inertes qui ne jouent aucun rôle dans le processus de fabrication, d'hydratation, ou de durcissement du ciment portland mais peuvent modifier les propriétés finales du produit, ils sont généralement utilisés au niveau du broyage du clinker [10].

Les roches carbonatées telle que le calcaire, craie, dolomie, sont largement utilisées comme ajouts naturels inertes au ciment. La priorité est accordée aux roches les plus dures pour éviter un éventuel colmatage de la matière lors du broyage [11].

Les ajouts inertes sont moins connus dans la pratique de l'industrie cimentière, ils sont habituellement utilisés lorsque la cimenterie ne dispose pas de source d'ajouts minéraux actifs [12].

B. Les ajouts actifs :

Il existe deux types des ajouts minéraux actifs :

✚ **Les ajouts actifs naturels :** Les ajouts minéraux actifs d'origine sédimentaire sont les dolomites, les tripolis et les gaizes, ils se rapprochent par leurs compositions chimiques. Les ajouts minéraux actifs d'origines volcaniques sont représentés par les pouzzolanes, les cendres, le tuf et la pierre ponce.

✚ **Les ajouts actifs artificiels :** Parmi les ajouts actifs artificiels on peut citer:

- ✓ Les déchets siliciques actifs.
- ✓ Les argiles cuites (déchets de briques et de tuiles)
- ✓ Les cendres des combustibles.
- ✓ Les laitiers métallurgiques.
- ✓ Les déchets siliciques actifs obtenus à la suite de l'extraction de l'alumine à partir de l'argile renferment souvent l'anhydrite sulfurique à quantité élevée.

6.5.3. Différents types d'ajouts :

1) Filler calcaire :

Les fillers calcaires sont généralement utilisées pour limiter le dégagement de chaleur réduire le ressuage et augmenter la résistance à la compression, en effet, lorsque les particules calcaires sont bien défloculées par les superplastifiants, l'hydratation du ciment s'en trouve facilitée et l'obtention d'une matrice cimentaire de structure plus dense est favorisée quel que soit le type de fillers calcaires dans la formulation des BAP l'augmentation du dosage des fillers en remplacement du ciment conduit à un dosage en superplastifiants plus faible pour un étalement donné (figure I.5). [11].



Figure I.5 : Poudre de filler calcaire.

2) Les cendres volantes :

Le remplacement d'une partie du ciment par des cendres volantes a une faible influence sur le seuil et la viscosité des pâtes de ciment. Certains auteurs remarquent cependant que leur utilisation peut améliorer la Fluidité, car leur forme sphérique permet de réduire les frottements entre les grains de ciment. [Ferraris] et al montrent par ailleurs que le diamètre moyen des cendres volantes a une légère influence sur la valeur du seuil d'écoulement, les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines (diamètre moyen 3,1 μm) (Figure I.7). Associées à un superplastifiant, les cendres volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire à l'obtention d'une certaine fluidité.



Figure I.6 : La poudre de cendre volante.

3) Fumée de silice :

L'influence des fumées de silice doit être clarifiée. Elles augmentent les valeurs du seuil et de la viscosité en augmentant la compacité des mélanges de matériaux cimentaires. [Ferraris] et Al Montrent que l'utilisation de fumées de silice (Figure I.8) augmente la demande en eau et en superplastifiants que ce soit pour des pâtes de ciment ou pour des bétons. [7]



Figure I.7 : La poudre de fumée de silice.

4) Pouzzolanes naturelles :

La pouzzolane (Figure I.9) est un matériau siliceux ou aluminosiliceux qui, finement broyée et à température ambiante en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium $[Ca(OH)_2]$ libéré par l'hydratation du ciment portland pour former des composés possédant des propriétés liantes. [7]



Figure I.8 : Pouzzolanes naturelles.

5) Laitiers de hauts fourneaux :

Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux (Figure I.10) permet globalement de réduire le seuil et la viscosité des pâtes de ciment. [Shi et Al]. Montrent par exemple que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent les superplastifiants. Il est donc possible que la demande en superplastifiants soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou valeur de seuil. [7]



Figure I.9 : Laitier de hauts fourneaux.

I.7. Caractérisation d'un béton autoplaçant :

7.1. Propriétés des BAP à l'état frais :

Il n'existe pas d'essai standard, ni de critère bien défini pour s'assurer qu'un béton est effectivement autoplaçant. En effet, le comportement spécifique des BAP à l'état frais rend quasi inadaptes la plupart des essais classiques sur les bétons traditionnels.

Les essais au maniabilimètre ne sont pas possibles en l'absence de vibration et l'essai classique d'affaissement au cône d'Abrams est inopérant, l'affaissement étant icitotal. C'est pourquoi les chercheurs et les industriels ont développé toute une série d'essais plus ou moins complémentaires, mais dont l'interprétation reste bien souvent subjective et dépendante de l'opérateur. Illustre la diversité des dispositifs expérimentaux proposés. [13]

- **Mesure d'étalement au cône d'Abrams :**

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

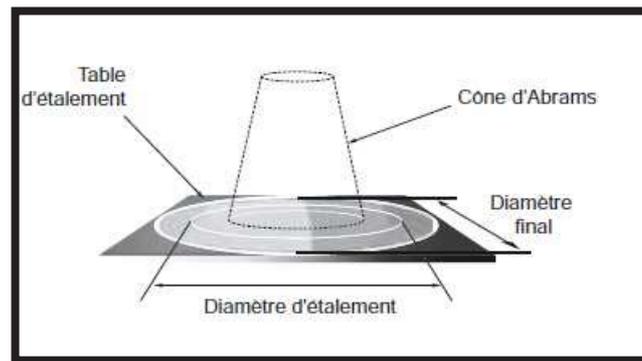


Figure I.10 : Essai au cône d'Abrams.

- **Essai de la boîte en L, écoulement en milieu confiné :**

La cohésion du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée peut se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures. La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte, puis en levant une trappe à laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre et le diamètre des armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticales (H_1) et horizontale (H_2). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage H_2/H_1 . Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP.

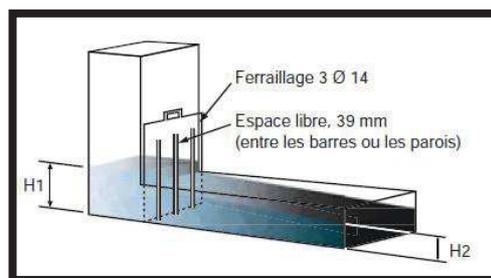


Figure I.11 : Essai de boîte en L.

- **Essai de stabilité au tamis :**

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de béton (2 litres) sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm. Le pourcentage en poids de laitance ayant traversé le tamis par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 % et 20 %.

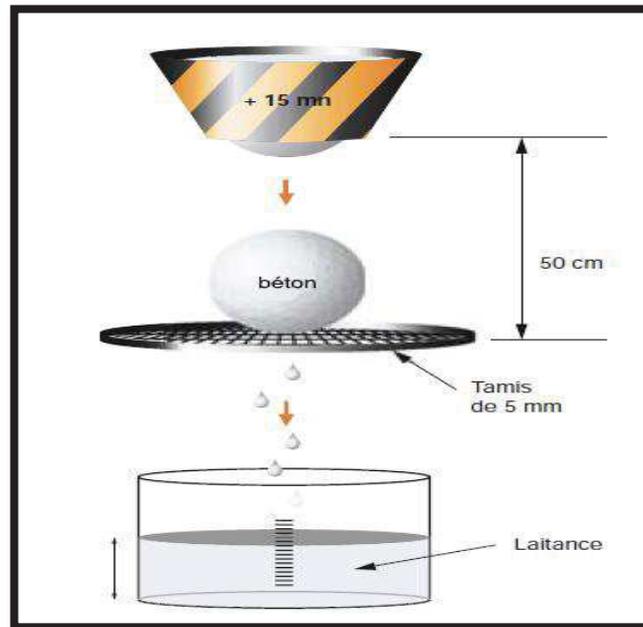


Figure I.12 : Essai au tamis.

7.2. Propriétés des BAP à l'état durci :

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.

- **Essai de la résistance à la compression :**

Les résistances mécaniques d'un BAP sont, comme pour la plupart des bétons directement liées à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment, elles dépendent aussi de la composition du liant. L'optimisation de ces paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistances jusqu'à des BAP à hautes performances (80 à 100 MPa) aux 28^{ème} jours [10]. La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur selon la norme Française 12390-1 (Essai pour béton durci – Partie 1 : Dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules : indice de classement P 18-438).



Figure I.13 : Eprouvettes cylindriques.

Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée l'essai déterminer selon la norme Française 12390-4(Essai pour béton durci – Partie 4: Résistance en compression d'essai caractéristiques des machines : indice de classement [P 18-441]).



Figure I.14 : Machine d'essai de compression.

- **Essai de la résistance à la traction par fendage :**

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton placé suivant deux génératrices opposées entre les deux plateaux de la presse selon la norme Française 12390-6 (Essai pour béton durci – Partie 6: Résistance en traction par fendage des éprouvettes : indice de classement [P 18-434]) La résistance en traction par fendage est donnée par l'équation suivante :

$$F_{ct} = \frac{2 F}{\pi D L}$$



Figure I.15: Machine d'essai de Traction par fendage.

Où :

F_{ct} : est la résistance en traction par fendage (MPa) ou (N/mm²) ;

F: est la charge maximale(N) ;

L: est la longueur de la ligne de contact de l'éprouvette (mm) ;

D: est le diamètre nominal de l'éprouvette (mm).

- **Essai de la résistance à la traction par flexion :**

L'essai consiste à rompre une éprouvette prismatique de dimensions 7 x 7 x 28 (cm) sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs.

La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée. La résistance en traction par fendage est donnée par l'équation suivante :

$$F_t = \frac{3 F L}{2 b h^2}$$



Figure I.16: Machine d'essai de Traction par flexion.

L'essai d'écrasement doit être réalisé selon la norme Française 12390-5 (Essai pour béton durci – Partie 6: Résistance en traction par flexion des éprouvettes) Où :

F_t : est la résistance en traction par fendage(MPa) ou (N/mm²) ;

F: est la charge maximale (N) ;

L: écartement entre les appuis (mm) ;

B: épaisseur de l'éprouvette (mm).

I.8. Méthodes de formulation des BAP :

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés désirées et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation .La diversité des bétons actuels, aux propriétés extrêmement variables, ne permet pas d'imaginer un principe de formulation commun. Généralement, la formulation sera orientée vers les propriétés

principales demandées au matériau et adaptée en fonction des propriétés secondes aires recherchées.

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. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

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

- **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 super plastifiant :**

Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir. [14]

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

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

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée.

Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat. [14]

8.3. Approche Française (Méthode française (LCPC) : proposée par [De Larrard et al, 1994]) :

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

- a) les distributions granulaires ;
- b) les proportions du mélange ;
- c) la compacité propre ;
- d) la densité apparente.

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

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

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

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle.

La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes [14].

8.4. Autres Méthodes :

D'autres méthodes de formulation, que nous ne développerons pas dans cette étude bibliographique, ont été publiées tels que la méthode reposant sur la théorie de «l'excès de pâte » : proposée par [Oh et al, 1999] ; la méthode d'évaluation simple utilisée par [Ouchi et al, 1999] (étudie l'interaction entre les granulats et les particules fines du mortier frais) etc...

I.9. Fabrication et transport :

La formulation des BAP plus pointue que celles des bétons traditionnels, nécessite la mise en place de procédures de fabrication et de contrôles adaptées.

La plupart des malaxeurs peuvent fabriquer des BAP; le temps de malaxage est toutefois légèrement plus long que pour un béton classique. Il faut que le mélange, riche en éléments fins et en adjuvants, soit le plus homogène possible. Certaines formules peuvent nécessiter des séquences de malaxage spécifiques (ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur, temporisation, temps de malaxage adaptés...)

L'un des points les plus importants de la fabrication est le contrôle strict de la teneur en eau du mélange en tenant compte de façon permanente de celle des granulats. Un contrôle renforcé des constituants doit être mis en place tout au long de la fabrication afin de maintenir la régularité de l'ensemble des performances. L'hyper fluidité du béton conduit, à prendre des dispositions spécifiques pour éviter des déversements et à adapter l'ouvrabilité au temps de transport et de mise en œuvre.

chapitre 2

Précontrainte

II.1. Introduction :

L'existence du béton revient à l'époque romaine, mais son principe fut perdu jusqu'à sa découverte en 1756 par l'ingénieur britannique John Smeaton.

Popularisé depuis le XIXe siècle notamment grâce au ciment de Portland et à Louis Vicat en France, le béton de ciment est, à l'heure actuelle, le matériau de construction le plus utilisé.

L'image suivante représente le premier ouvrage au monde en béton coulé, construit en 1855 par Joseph et Louis Vicat.



Figure II.1 : Le pont du Jardin des plantes de Grenoble. [14]

Le terme béton est un terme générique désignant un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Au temps actuel il existe plusieurs types de béton qui sont classés selon différents paramètres. Le béton peut être classé en fonction :

- La masse volumique (béton lourd, léger, normal).
- La nature du liant (béton de ciment, béton silicate, béton de gypse, béton asphalt).
- La nature de l'ajout avec lequel est renforcé (les fibres métalliques, synthétiques ou minérales), d'où on aura un béton renforcé de fibre BRF.

Aussi il existe le béton armé, les BHP, bétons autoplaçants, béton autonivellants et les bétons précontraints qui est le sujet de notre exposé.

II.2. Définitions :

2.1. Définition du béton précontraint :

Selon M. Freyssinet, il définit le béton précontraint comme suit : « A aucun degré, le béton précontraint n'est du béton armé amélioré. Il n'a, avec le béton armé, aucune frontière

commune ». Selon M. Guyon : « Dans la poutre en béton précontraint, l'acier n'est pas une armature, c'est une force ».

II.3. Le principe du béton précontraint :

Le béton résistant mieux en compression qu'en traction, le but du précontraint est d'obtenir des pièces qui ne travailleront qu'à la compression. Les forces de traction engendrées par les charges appliquées à l'ouvrage viendront en déduction des forces de compression créées par la mise en tension des câbles des précontrainte.

Soit par exemple une poutre en béton armé reposant sur deux appuis simples. Si on la soumet à une charge, elle se déforme. La section transversale, au droit de l'application de la charge se trouve comprimée à la fibre supérieure et tendue à la fibre inférieure. Lorsque la charge est trop forte, des fissures apparaissent à la partie inférieure de la poutre.

Supprimons dans cette poutre l'armature de traction classique pour la remplacer par une gaine courbe suivant la déformée de la poutre et contenant des câbles de précontrainte.

En tirant sur les câbles, on comprime la poutre. Dans la section transversale, la fibre supérieure se trouve tendue et la fibre inférieure comprimée. Si l'on applique une charge au centre de la poutre, la fibre inférieure va se tendre et la fibre supérieure se comprimer.

Il est possible de déterminer l'effort de précontrainte nécessaire pour que la poutre soit toujours comprimée quelles que soient les charges appliquées. Lors d'un chargement les efforts de traction viennent alors en déduction des efforts de compression créés par la précontrainte mais toutes les fibres restent comprimées. [16]

En réalité, dans les grosses poutres, il y a de nombreuses gaines. La disposition exacte de ces câbles et leur nombre dépend de nombreux paramètres (dimensions et forme de la poutre, charges à supporter, etc.). Leur position relevée vers les extrémités est destinée à améliorer la résistance à l'effort tranchant.

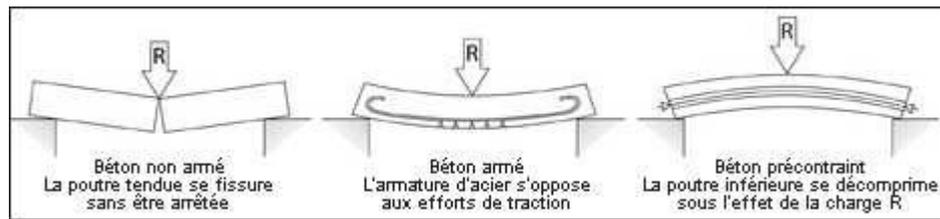


Figure II.2: principe de la précontrainte en prenant une poutre comme exemple.

Nous avons décrit le principe de la précontrainte en prenant une poutre comme exemple, mais tous les éléments de construction peuvent être réalisés en béton précontraint.

II.4. Avantages du béton précontraint :

Les principaux avantages du béton précontraint sont les suivants :

- Meilleure utilisation de la matière puisqu'en béton armé, le béton tendu est considéré comme fissuré et ne peut être pris en compte dans la résistance. Il est inutilisé, il ne joue qu'un rôle de poids mort.
- L'action ascendante des câbles de précontrainte due à leur courbure, agit en sens inverse des charges extérieures, limitant ainsi les déformées. Il en résulte une diminution des flèches des poutres.
- Possibilité de franchir de plus grandes portées qu'avec des ouvrages en béton armé.
- Lorsque le béton situé autour des armatures de précontrainte est comprimé, les risques de corrosion des aciers sont limités.
- Les aciers utilisés en béton précontraint sont moins chers, à force égale, que les aciers de béton armé.
- Possibilité d'assembler des éléments préfabriqués par serrage, sans échafaudage, ni bétonnage de deuxième phase (Parc des Princes, stade olympique de Montréal, etc.).

Cependant, ces avantages nécessitent :

- De fabriquer des bétons plus résistants, principalement avant 28 jours.
- De disposer d'un personnel qualifié pour la vérification de la pose des gaines et câbles et pour la mise en tension des câbles.
- L'obligation d'attendre que la mise en tension soit faite pour continuer l'avancement du chantier.
- Des calculs en général plus détaillés que pour les ouvrages en béton armé.

II.5. Types de précontraint :

Il existe deux méthodes de mise en tension des câbles dans une structure. A chacune de ces méthodes sont associées des technologies de précontrainte spécifiques.

5.1. Pré-tension :

C'est une méthode utilisée en usine, pour préfabriquer des poutres précontraintes destinées à être incorporées dans des constructions en tant que « produits ».

Les câbles sont tendus préalablement au coulage de la poutre, sur un banc de préfabrication capable de reprendre les efforts engendrés (ce qui nécessite des installations spécifiques, qui ne sont généralement pas disponibles sur chantier). Ils sont généralement rectilignes d'un bout à l'autre du banc de préfabrication. On coule ensuite des éléments directement au contact avec les câbles. [17]

Après prise du béton, les câbles sont relâchés à leurs extrémités, et coupés à la sortie des poutres, entraînant la mise en précontrainte de la poutre grâce à un transfert par adhérence de l'effort entre les câbles et le béton.

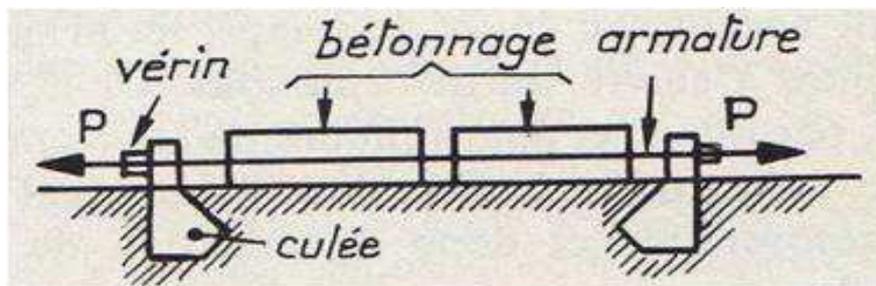


Figure II.3: principe de la méthode par pré-tension.

Les câbles ne sont pas gainés en partie courante, puisqu'ils doivent permettre une parfaite adhérence avec le béton. Il est toutefois possible de gainer certains câbles à leurs extrémités, pour diminuer la précontrainte aux abouts (elle peut en effet avoir des effets défavorables près des abouts).

La précontrainte par pré-tension est réalisée à l'aide de fils crantés à haute limite d'élasticité (HLE), ou de torons constitués de 3 ou 7 fils élémentaires. La pré-tension s'accompagne des autres techniques liées à la préfabrication : formulation adaptée des bétons, étuvage des poutres pour accélérer la prise du béton et permettre un décintrement et une mise en

précontrainte rapide. Les conditions d'emploi de la pré-tension sont conditionnées par plusieurs facteurs :

- possibilités de manutention et transport des poutres (liées à leur poids et à leur encombrement),
- dimensions des bancs de préfabrication en usine.

La précontrainte par pré-tension est très utilisée dans le domaine du bâtiment. Toutefois, il est difficile en France de dépasser des longueurs de poutres supérieures à 30m.



Figure II.4: banc de précontrainte

Figure II.5: exemple de la méthode par pré-tension

5.2. Post-tension :

La technique de post-tension consiste à prendre appui sur le béton déjà durci pour tendre le câble de précontrainte. L'élément en béton est donc coulé au préalable, avec des réservations pour le passage ultérieur de la précontrainte. Lorsque le béton atteint une résistance suffisante, la précontrainte est enfilée et tendue à l'aide de vérins.

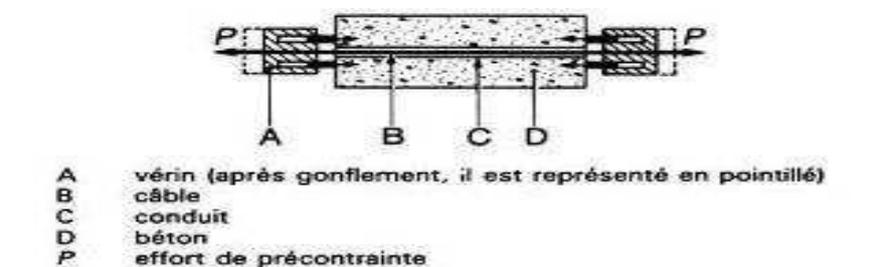


Figure II.6: mise en tension d'un câble (post-tension).

La post-tension permet de mettre en œuvre des forces de précontrainte beaucoup plus importantes que la pré-tension, puisque la résistance du banc de préfabrication n'est plus un

facteur limitant. La post-tension est très utilisée en ouvrages d'art pour les grandes portées. Les matériaux utilisés pour la précontrainte par post-tension peuvent être :

- Des câbles constitués de torons.
- Des câbles préfabriqués constitués de fils boutonnés.
- Des barres de précontrainte.

La précontrainte peut être :

- intérieure au béton : les câbles sont entièrement noyés dans la structure ; une fois tendus ils sont injectés au coulis de ciment et ne sont plus inspectables.

- extérieure au béton : en partie courante, les câbles restent visibles, ils ne sont noyés dans la structure qu'au niveau des extrémités et en des points singuliers permettant de les dévier. Ils sont généralement injectés à la cire. Par le passé, ces câbles ont souvent été injectés au coulis de ciment. [18] <http://www.prensoland.com>, site internet d'information de la mouleuse PRENSOLAND, 2007.

II.6.armatures de précontrainte :

Les armatures de précontrainte sont en acier à haute résistance. Elles se présentent sous forme de fils, de torons, de barres ou de câbles. Elles peuvent être intérieures au béton :

- pré-tendues et adhérentes.
- post-tendues et adhérentes ou non.

Elles peuvent aussi être extérieures au béton être liées à la structure au niveau des ancrages et des déviateurs uniquement. [15]

6.1. Fils :

Par convention, les fils ont un diamètre inférieur ou égal à 12,2 mm, ce qui permet de les livrer en couronnes. Ils peuvent être soit ronds et lisses (pour la post-tension) soit au contraire nervurés, ou crantés, ou ondulés afin d'améliorer leur adhérence au béton (pré-tension). Les fils les plus couramment utilisés ont des diamètres de 5 mm, 7 mm ou 8 mm.



Figure II.19: fils d'aciers précontraint.

6.2. Les torons :

Les torons sont un assemblage de plusieurs fils (le fil est produit par déformation à froid (tréfilage) d'un fil machine).

- Torons 3 fils: 3 fils enroulés sur un axe théorique commun (utilisation en précontrainte par pré-tension uniquement).
- Torons 7 fils: 6 fils disposés en hélice autour d'un fil central d'un diamètre plus important.

Les torons sont caractérisés par leur nombre de fils (et la section du fil) et leur diamètre. Les classes de résistance des torons sont: 1670, 1770, 1860 et 1960 M Pa.

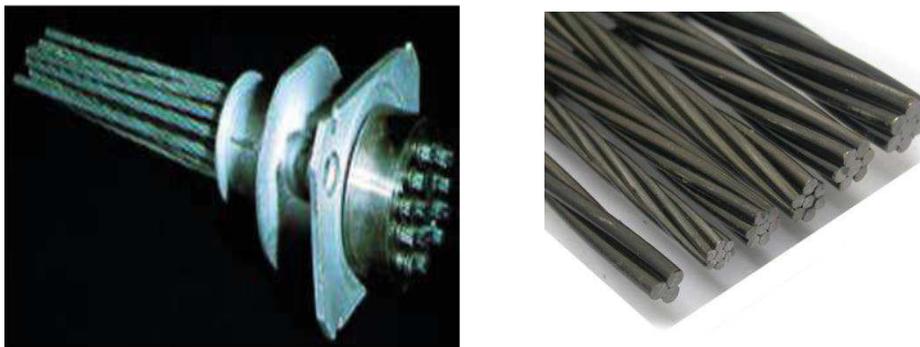


Figure II.20: Torons d'aciers précontraints

6.3. Barre :

De diamètre supérieur ou égal à 12,5 mm, elles ne sont livrées que rectilignes (et sous longueur maximale de l'ordre de 12 m). Elles peuvent être soit lisses, soit nervurées, les nervurations faisant alors office de filetage grossier (cas des barres Dywidag). Les diamètres les

plus courants sont 26 mm, 32 mm et 36 mm . Mais il existe des barres plus grosses (Macalloy $\phi 40$, 50 et même 75 mm). De telles armatures ne sont employées qu'en post-tension.



Figure II.21: Barre d'aciers pour béton précontraint

6.4. Les câbles :

Les câbles sont constitués de plusieurs torons en acier à haute résistance pour béton précontraint. La gamme des câbles s'étend des câbles monotorons aux câbles de très grande puissance comportant jusqu'à 55 torons. Un câble est défini par le type et le nombre de torons et la classe de résistance.



Figure II.22: Câbles d'aciers.

II.7. Les domaines d'emploi de la précontrainte :

7.1. La post-tension :

Les premières applications, qui se sont multipliées par la suite, sont les ponts à moyenne et grande portée : le pont haubané de Barrios de Luna atteint une portée de 440 mètres. Plus couramment, l'allégement des âmes béton et l'emploi de la précontrainte extérieure permettent des portées variant entre 50 et 250 mètres.

Dans le domaine du bâtiment, la précontrainte par post-tension, bien que moins courante, est utilisée pour des poutres de grande portée ou pour des dalles de planchers de section

relativement mince par rapport à leur portée : parkings, bâtiments industriels ou commerciaux.



Figure II.23: l'un des cas les plus courants d'utilisation des poutres précontraintes : Les parkings.

7.2. La pré-tension :

Cette technique est essentiellement utilisée pour les éléments préfabriqués standardisés, où elle se justifie par la notion de séries.

Le bâtiment constitue le domaine d'emploi le plus courant pour ces éléments : poutres, poutrelles de planchers, prédelles, dalles alvéolées de planchers ou panneaux de bardage de grandes dimensions (10 à 15 m de longueur), pour bâtiments industriels, commerciaux ou agricoles.

La pré-tension est également utilisée pour les poteaux de tous types (télégraphiques ou électriques, clôtures, etc.) ou les traverses de chemin de fer.



Figure II.24: poutrelles standard précontraintes par pré-tension

chapitre 3

Etuvage

III.1.Introduction :

Du fait d'une forte demande de production, l'industrie de construction a souvent recours à l'utilisation de la température. Plusieurs méthodes sont développées et appliquées afin d'avoir dans un laps de temps court des niveaux de résistances suffisants.

Une température élevée accélère les réactions chimiques d'hydratation et affecte + avantageusement la résistance à jeune âge. Elle réduit la période dormante et la structure globale de la pâte de ciment hydraté s'établit très tôt. Cet effet sur la résistance s'inverse entre 7 et 15 jours d'hydratation du fait qu'une hydratation initiale rapide présente une structure physique moins compacte. En effet, une vitesse d'hydratation initiale rapide due à des températures élevées retarde l'hydratation subséquente et conduit à une distribution non uniforme des produits hydratés, (Verbeeck Et Helmut 1968). Par exemple, une augmentation de 20 % de porosité est mesurée sur une pâte de ciment (CRS) murie à 80 de porosité est mesurée sur une pâte de ciment (CRS) murie à 80°C. Par ailleurs, un fort dosage en ciment ou encore la présence des additions minérales dans la composition, accélère le durcissement à des températures élevées. L'addition minérale peut accélérer voire la formation des hydrates.

III.2.Définition :

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 au des performances mécaniques accrues au jeune âge et/ou de rendre les températures homogènes dans l'ensemble du béton. construction l'élément traité, il peut avoir en outre pour effet, recherché ou non, modifier certaines propriétés du béton. On distingue deux types familles de traitement thermique du béton :

- ✚ 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* » comportent un apport chaleur, soit directement à 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.

III.3. Condition générales à respecté :

Quelle que soit la méthode employée, il est indispensable de respecter certaines conditions pour la réalisation du traitement. Celles-ci concernent.

3.1. L'homogénéité des températures du béton :

Tout écart important (au-delà de 10 °C) de température (entre deux zones d'un même élément ou entre deux produits dans une même chambre de durcissement) entraîne des différences de résistances ou des risques de fissuration. Leurs conséquences peuvent être des produits ou des zones fragiles (par exemple : angles) ou des fissurations (sur les produits en extrémité de banc de précontrainte nécessite une étude détaillée des systèmes de chauffage, elle doit être contrôlée par des mesures dans les zones critiques. Dans le cas de durcissement en chambres, elle nécessite le plus souvent un « brassage » de l'air interne.

3.2. La régularité des températures :

Pour une production industrielle répétitive, il est indispensable d'assurer une parfaite régularité des températures quelles que soient les variations climatiques. Cela est d'autant plus vrai que les délais disponibles pour le durcissement sont « calculés » au plus juste. Les systèmes de chauffage doivent donc être équipés de dispositifs de régulation surveillant en permanence les températures du béton ou des moules.

3.3. L'isolation thermique des équipements (moules, chambres...) :

Pour assurer l'homogénéité et la régularité des températures et pour éviter des pertes d'énergie inutiles et coûteuses, une isolation thermique performante est nécessaire. Elle doit l'être d'autant plus que la température est élevée. Elle doit être conçue pour résister aux migrations d'humidité provenant de l'atmosphère interne toujours proche de la saturation (présence d'un film ou d'une pellicule pare-vapeur ou paroi étanche à l'humidité).

3.4. La saturation de l'air en contact avec le béton :

Tout au long du cycle de traitement, l'air en contact avec le béton doit être saturé ou proche de la saturation. Cela est important dès lors que la température du béton dépasse celle de l'atmosphère ambiante car les risques de dessiccation des surfaces libres augmentent. Ils peuvent, dans les cas extrêmes, conduire à des fissurations inacceptables des surfaces (par exemple : faïençage). Aussi, il est souvent nécessaire de réaliser un apport simultané de chaleur et d'humidité (vapeur ou chauffage sec avec pulvérisation d'eau), ou d'assurer une

perte d'eau minimale en couvrant parfaitement les moules ou en utilisant des chambres ou cellules bien fermées sans échanges d'air avec l'extérieur. Dans le cas où l'on doit assurer une parfaite maîtrise des teintes (par exemple : pavés ou tuiles en béton), une régulation de l'hygrométrie légèrement en dessous de la saturation (autour de 90 %) peut être intéressante.

3.5. L'absence de chocs thermiques importants :

Ces chocs peuvent être occasionnés par un chauffage trop rapide ou par un refroidissement brutal en fin de cycle. Ils peuvent parfois conduire à des problèmes de fissuration ou de mauvaise durabilité des surfaces (liés à l'évaporation brutale de l'eau et à l'arrêt de l'hydratation en surface). Des précautions particulières doivent être prises lorsque les températures extérieures sont froides (conditions hivernales).

III.4. Les différents types du traitement thermique :

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. [19]

- ✓ Chauffage des granulats.
- ✓ Chauffage de l'eau de gâchage.
- ✓ Chauffage par injection de vapeur.
- ✓ Chauffage du béton par effet joule.

4.2. Le chauffage du béton après sa mise en place :

Cette technique est la plus utilisée. On distingue le chauffage par les moules (Les moules transmettent la chaleur au béton par conduction thermique), le chauffage à la vapeur et le chauffage dans des chambres ou cellules fixes, à l'intérieur desquelles les produits sont stockés).

4.3. 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. Les meilleures conditions sont l'emploi d'un ciment rapide, un dosage en ciment élevé, un rapport E/C faible, l'emploi d'un accélérateur de durcissement, une température initiale du béton supérieure à 15 °C, des moules ou des supports légers et à une température proche de celle du béton frais, la fermeture rapide des moules ou des enceintes bien isolés et une durée de maintien dans ces moules ou enceintes la plus longue possible (au moins 12h).

On peut estimer la chaleur dégagée par l'hydratation du ciment à une échéance par exemple de 12 heures. Pour un CEMI 52.5R dosé à 10 %, on obtient environ 8 KWh/tonne de béton ce qui théoriquement (sans échanges, ni pertes) permet une élévation de la température du béton de 15 °C. Dans la pratique pour une température après 20 heures de durcissement en moule ou cellules bien isolés (au moins 15 cm de polystyrène expansé) se situent entre 5 °C pour de très faibles dosages en ciment (cas des blocs), et 10°C pour dosages élevés. Si la température initiale du béton est plus élevée, par exemple 20°C, le gain en température est un peu plus élevé (3 à 4 °C de plus) mais il est surtout plus précoce (gain d'environ 5h sur la température maximale atteinte).

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. Il faut cependant être vigilant sur la bonne homogénéité des températures et donc la nécessité pour des cellules de grande hauteur, d'un système efficace de brassage de l'air entre le haut et le bas. [19].

4.4. 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 infra-rouge (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 couts en fonction des plages horaires (électricité en particulier).
- Les possibilités ou facilités de régulation, les couts d'investissement.
- Les contraintes de maintenance, de sécurité, d'environnement
- Les principaux systèmes de chauffage externe répandus dans l'industrie du béton sont présentés ci-après.

4.4.1. 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.

- ✓ **Le chauffage par résistances électriques.**
- ✓ **Le chauffage par fluide caloporteur.**

4.4.2. 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 (fig.III.1), 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.

Le chauffage en tunnel est aussi utilisé pour des productions de tuiles en béton. Dans ce cas les moules et leurs tuiles fraîches sont introduites dans des « racks » (râteliers) de grande capacité (200 à 700 moules). Les racks circulent dans des tunnels en forme de U ou circulaires dans lesquels la température et l'humidité sont contrôlés et maîtrisés par des ensembles d'échangeurs et de ventilateurs. Par exemple les tunnels circulaires reçoivent jusqu'à 38000 moules et sont compartimentés en trois zones (par les portes A, B, C sur la fig.III.2) dans chacune desquelles les échangeurs (eau-air) assurent le maintien des températures visées la durée du cycle.



Figure III.1: tunnels d'étuvage pour moules de voussoirs.

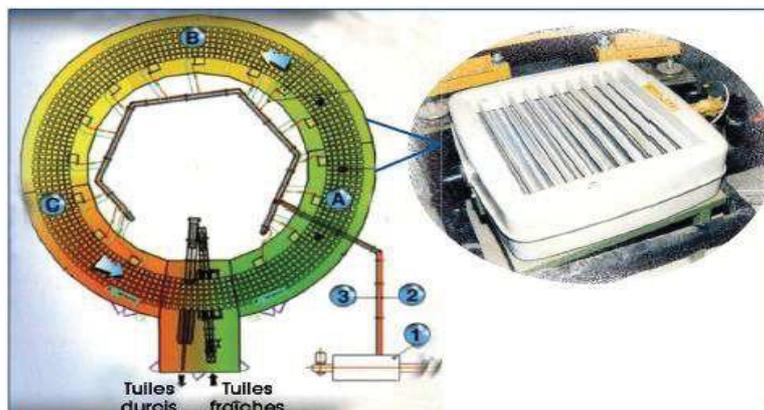


Figure III.2: tunnel circulaire et échangeur air- eau pour le chauffage.

Dans tous les cas, y compris celui de la circulation dans des moules, la surface d'échange entre le béton frais et l'air du tunnel est relativement importante, aussi la plupart des tunnels doivent être équipés à la fois de systèmes de chauffage et de systèmes de maintien de l'hygrométrie de l'air ambiant compte tenu du passage des moules ou plateaux aux entrées et sorties, celles-ci sont conçues sous la forme de sas dans lesquels s'opèrent les phases de préchauffage et de refroidissement. Cette présence de sas est d'autant plus nécessaire que la température de traitement à l'intérieur du tunnel est élevée et que le transfert des moules ou des plateaux est lent. De nombreux tunnels sont en forme de U (horizontal ou vertical) pour limiter les pertes thermiques de la zone chaude (située au milieu).

4.4.3. Systèmes de chauffage externe dans des chambres ou cellules fixes :

Le durcissement accéléré par chauffage dans des chambres ou cellules fixes est le plus souvent utilisé car il permet de traiter des volumes de production importants correspondants à un poste ou une journée de production.

Dans le cas de petits produits démoulés immédiatement sur des planches : comme les blocs, bordures, pavés,... les planches sont déposées sur les étagères ou les corniches des cellules (8 à 16 niveaux) qui constituent, de façon isolée ou regroupée, les chambres de durcissement. Une multitude d'autres systèmes est utilisée pour empiler des produits dans des chambres de durcissement : râteliers, chariots, planches ou capots empilables, étagères fixes.

Dans tous les cas, il faut rechercher une capacité de stockage maximale (en général 24 heures) compatible avec les cadences de la production-manutention il faut aussi rechercher une organisation des cellules et des chambres qui limite les échanges d'air (et donc de température) avec l'extérieur. Ainsi, lorsque l'on utilise des chambres fermées par des portes (à l'issue de leur remplissage), il faut limiter leur capacité à une ou deux heures de production. Elles peuvent par exemple regrouper deux couloirs, chaque cellule de deux couloirs étant isolée des autres et fermées par une porte automatique (fig.III.3)



Figure III.3: cellules isolées avec portes automatiques.



Figure.III.4 : détail d'un rideau d'air à l'entrée des chambres.

Lorsque l'on opte pour une grande chambre, les échanges d'air à l'entrée peuvent être limités par un système du type rideau d'air chaud (Fig.III.4 et III.5) ou de rideaux à lamelles (doublés par une porte manuelle isolée pour la nuit et les périodes d'arrêt). On peut aussi inclure dans le volume isolé, les ascenseurs et descenseur de façon à ne laisser en permanence ouvert que le passage des planches avec les produits.

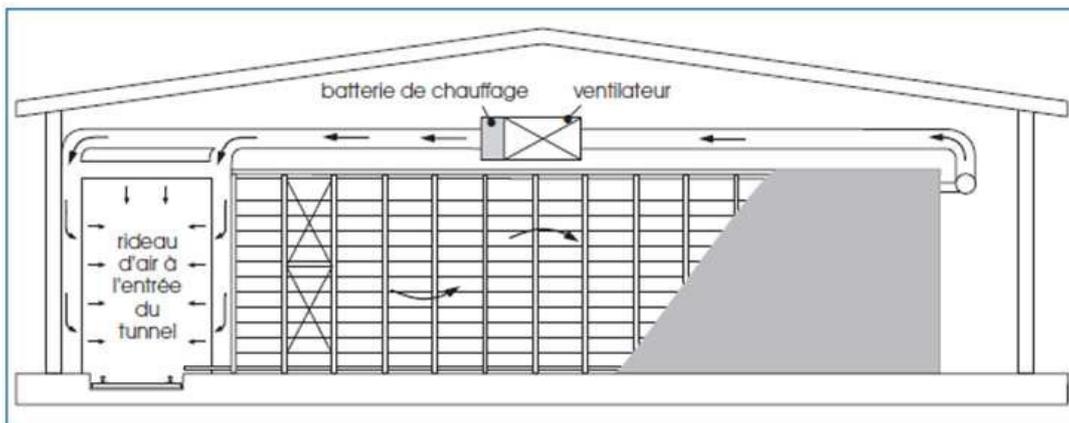


Figure.III.5 : grande chambre à rayonnage avec rideau d'air à l'entrée et brassage par Circulation.

Le chauffage des chambres ou cellules peut être réalisé de nombreuses manières différentes :

- Résistances électriques (linéaires disposées sous les corniches et/ou noyées dans le sol ou résistances à ailettes).
- Radiateurs à fluide chauffant (produit par une chaudière ou des panneaux solaires).
- Circulation d'air chaud.

- Brûlage direct de gaz.
- Injection de vapeur.

Quel que soit le système, il faut pour obtenir une bonne homogénéité des températures et éviter les condensations, réaliser un brassage de l'air interne ; la (fig.III.6) donne un exemple de circulation d'air assurant un brassage efficace. Il faut aussi réaliser une bonne isolation thermique des parois extérieures (du plafond en particulier) car les condensations inévitables sur les parois froides sont à l'origine de nombreux problèmes. Le maintien de l'humidité à l'intérieur des chambres est assuré en limitant au strict minimum les échanges d'air avec l'extérieur.

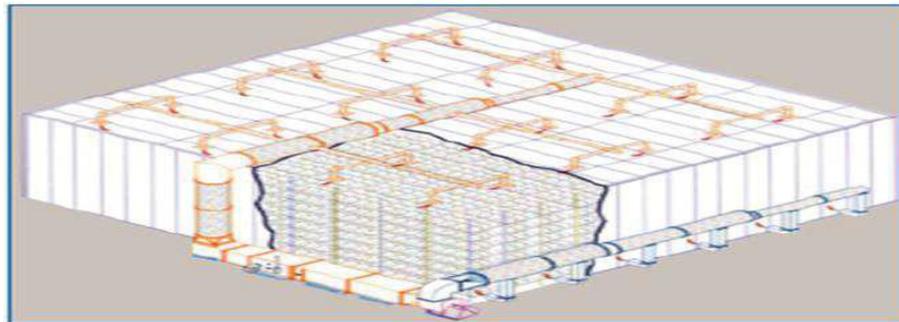


Figure.III.6 : schéma de circulation d'air dans les cellules de durcissement

Dans le cas des produits démoulés au sol : ou stockés à l'état fris dans un atelier, on utilise des chambres mobiles conçues pour venir recouvrir, on utilise des chambres mobiles conçues pour venir recouvrir les produits (démoulés ou dans leur moule). Ces chambres mobiles peuvent être des capots rigides ou des bâches isolantes maintenues par des dispositifs variés (accordéons suspendus, baldaquins,...) (fig. III. 7 et III.8).

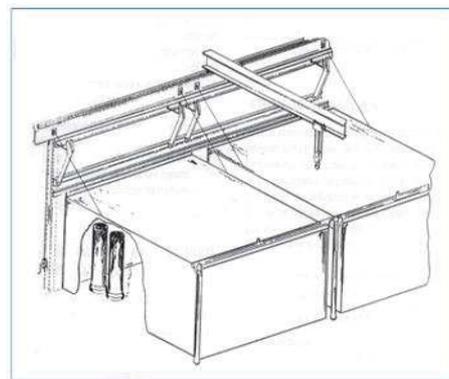
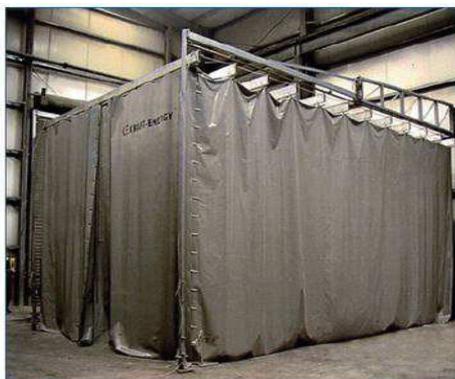


Figure.III.7 : Exemple de chambre mobile avec « Accordéons suspendus » mobiles avec **Figure.III.8** : Exemple de chambres bâches « baldaquins »

Pour les productions avec transfert automatique des produits par pont robotisé (cas des tuyaux et regards) on utilise des cellules fixes avec plafond en éléments amovibles manipulés par le pont robotisé (fig.III.17)

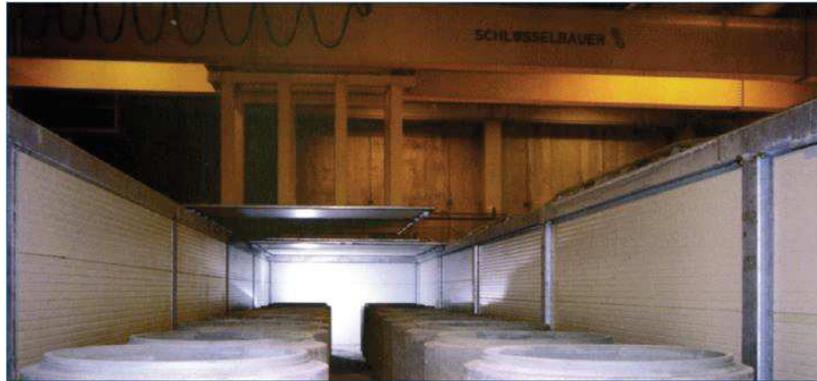


Figure.III.9: cellules fixes avec plafond amovible manipulé par pont robotisé.

Pour tous ces cas, le chauffage est le plus souvent réalisé par apport de vapeur ou d'air chaud. Il peut aussi se faire par pulvérisation d'eau chaude (en très fines gouttelettes) pour apporter une humidité nécessaire à des produits sensibles à la dessiccation (tuyaux par exemple).

4.5. 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.

Dans tous les cas même si la technique paraît simple, sa mise en œuvre industrielle est délicate compte tenu des problèmes liés à la sécurité et à la maîtrise des températures.

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

III.5.Cycles de traitement thermique des bétons :

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 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 de chaleur ; cependant des précautions particulières doivent être prises en fonction de la technique de traitement choisie.

III.6. L'étuvage des produits en béton :

Parmi les moyens utilisés pour améliorer le durcissement du béton, l'étuvage par vapeur a basse pression est l'un des plus répandus dans l'industrie du béton. L'étude de la technique de l'étuvage comportera l'examen des caractéristiques générales du cycle d'étuvage et des méthodes qui permettent de le définir en fonction des buts que l'on se propose d'atteindre et compte tenu des moyens et matériaux dont on dispose. Le cycle comporte toujours 4 étapes successives correspondant aux opérations de conservation initiale du durée (TP) ou de prétraitement de montée de température (Tm); de maintien de la température maximale (ti); de refroidissement. Une suite à cet article doit paraître dans un numéro ultérieur. (a)

6.1. Propriété du béton étuvé:

L'on sait qu'à une température plus élevée correspond un durcissement plus rapide. Mais cette accélération ne s'opère pas sans présente certains inconvénients et certains dangers. En premier lieu, en ce qui concerne les résistances mécaniques à la compression et à la traction, si les résistances initiales sont effectivement améliorées, les résistances finales sont indubitablement diminuées (voir fig. 10). Il s'agit donc de vérifier que les résistances finales amputées restent compatibles avec la destination de l'ouvrage. Ensuite, il y a risquée dessiccation prématurée du béton, d'où danger de fissuration. Il faut prévenir ce risque par des moyens appropriés. Enfin, il y a un doute sur la déformabilité du béton étuvé, il sied donc de la surveiller de près. En résumé, l'étuvage du béton ressort à une idée de dopage avec toutes les sujétions d'une telle intervention.

6.2. Les phases de réalisation d'étuvage :

Dans sa forme la plus générale, un cycle de traitement thermique comporte quatre phases, définies chacune par un couple durée-température ou bien par une vitesse :

6.2.1. La phase de prétraitement (avant t1) :

Cette phase est destinée à parcourir au béton une cohésion suffisante pour qu'il puisse absorber les efforts internes occasionnés par la dilation 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.

6.2.2. La phase de montée en température (t1 à t2) :

Elle est caractérisé 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. 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.

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

La durée et la température de cette phase, au cours de laquelle de 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.

6.2.4 La phase de refroidissement (t3 à t4) :

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

CCFRD ans 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'effectué 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 provoquent une fissuration du béton.

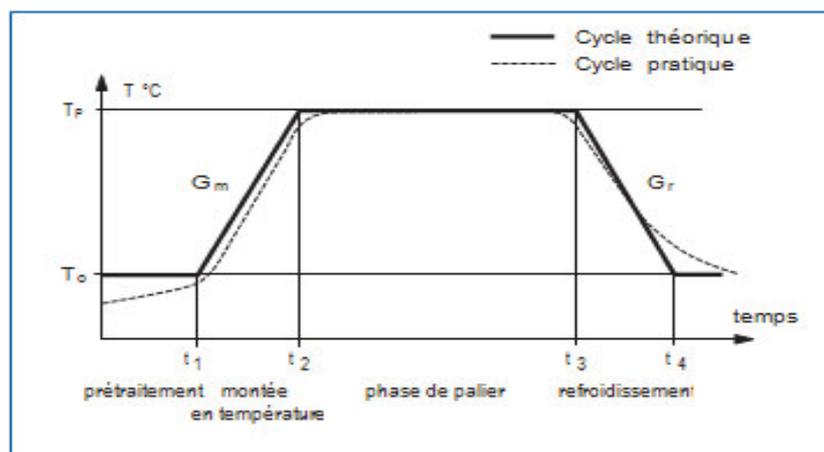


Figure.III.10: forme générale d'un cycle.

6.3. Cycles d'étuvages :

6.3.1. Cycles d'étuvage théoriques :

Compte tenu du grand nombre de sites de l'entreprise SEAC Gf produisant des éléments en béton filé (8 usines), il aurait été trop lourd de collecter toutes les informations et peu aisé d'établir un cycle d'étuvage représentatif. On a donc décidé de définir un cycle moyen à partir de quatre sites que sont Blagnac (31), le puis et(28), Montre d'on (11) et villette d'Anthon (38), le traitement thermique en usine est assuré :

- Soit électriquement avec des résistances sous le platelage.
- Soit hydrauliquement avec un réseau de circuit d'eau alimenté par une chaudière.

La figure ci dessous Présente les différents cycles d'étuvage théoriques appliqués aux éléments lors de leur phase de maturation.

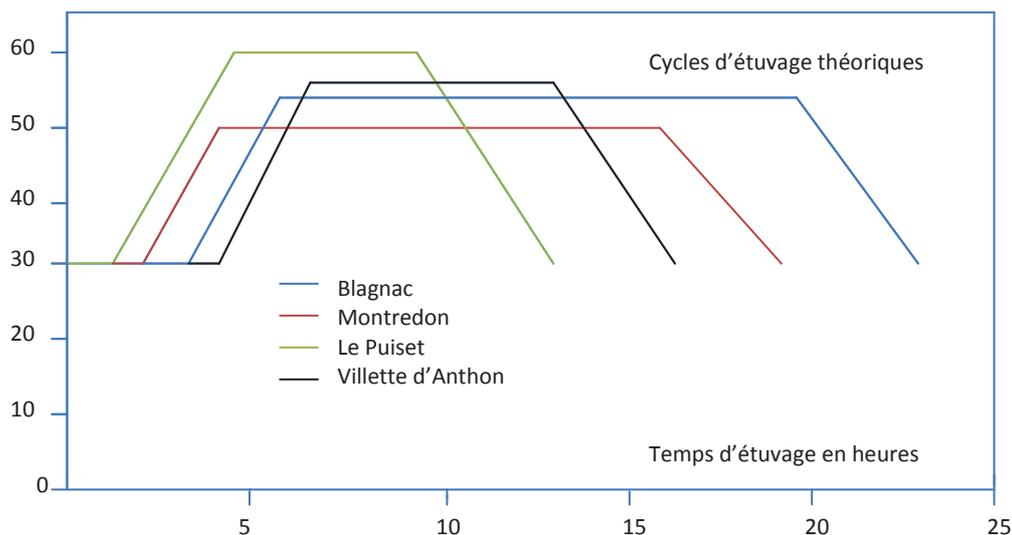


Figure. III.11 : cycles d'étuvage théoriques de quatre sites du groupe SEAC

On observe que pour chaque site, les caractéristiques du cycle sont spécifiques au mode de production envisagé. On peut citer trois exemples concrets qui relient les concrets qui relient la consommation d'énergie relative à l'étuvage avec les aspects économiques de la production :

- Pour un cycle court avec une température élevée, une double rotation journalière est mise en place.
- Pour un cycle plus long avec une montée en température moins élevée, une seule rotation journalière est envisagée.

- L'apport énergétique est diminué voire suspendu le week-end, car le béton a le temps de murir suffisamment à température ambiante. Cependant, on observe des similitudes concernant l'allure générale de ces différents cycles.

On peut distinguer pour chacun des cycles :

- Une phase de pré prise avec une température à 30°C maintenue de 1,5 à 4 heures.
- Une rampe constante de montée en température de 10 à 15 °C/h
- Une stabilisation à une température maximale de 50 à 60 °C de 5 à 19 heures.
- Un retour à la température ambiante.

Dans leur globalité, les cycles peuvent durer de 14 à 20 heures. Pour l'étude en Laboratoire, il faut établir un cycle standard qui va permettre de pouvoir comparer les matériaux, au travers de leurs parties liantes.

6.3.2. Cycle d'étuvage standard :

Le cycle d'étuvage de référence, permettant un murissement identique des différents mélange à tester, va résulter de valeurs moyennes obtenues à partir des cycles théoriques pratiqués sur site.

La figure III-34 explicite le cycle résultant que l'on nomme « **cycle d'étuvage standard** ». Il débute par une pré prise de 30°C durant 2,83 heures. Par la suite, une rampe de montée en température constante à la vitesse de 10°C/h permet d'atteindre 55°C. La stabilisation à 55°C dure 12,5 heures. À la fin de ce traitement thermique, la phase de refroidissement se fait naturellement durant 2 heures.

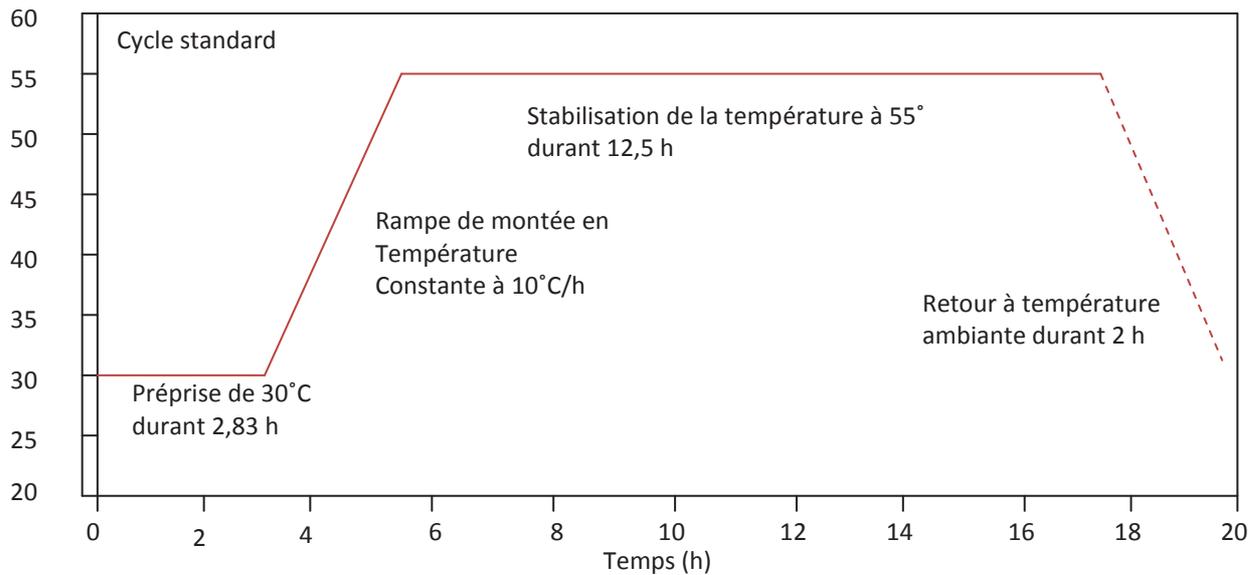


Figure.III.12:cycle d'étuvage standard.

6.4. L'effet de traitement thermique sur le comportement des bétons :

6.4.1. Béton à l'état frais :

a) Effet sur la cinétique d'hydratation :

✚ Globalement :

L'étuvage des produits à base cimentaire favorise le développement des performances mécaniques au jeune âge. Ce phénomène s'explique par une mise en solution des ions favorisés par la hausse de température du système, ce qui va entraîner une réduction de la période dormante, il s'agit d'une thermo activation de la réaction d'hydratation du ciment.

En revanche, à long terme, l'étuvage peut affecter défavorablement les performances mécaniques. Ce déficit performant s'explique par une vitesse initiale d'hydratation trop rapide (problème de diffusion/ précipitation décalée dans le temps) ce qui va retarder l'hydratation subséquente et causer une distribution non uniforme des produits hydratés dans la pâte de ciment.

✚ Concept de maturité :

Lors d'un étuvage, il est observé que l'avancement des réactions est différent en comparaison d'une maturation à 20°C. Cette cinétique se comporte comme un système à variable séparée en temps et en température. Il est montré que la loi d'Arrhenius pouvait être adoptée pour caractériser la maturité du béton en considérant l'histoire de température.

Ces considérations sont à la base du concept d'astrométrie qui estime l'âge réel en temps équivalent d'un béton mûri à 20°C. Le présente aussi les effets de l'étuvage sur les résistances du béton.

Degré d'hydratation :

Au jeune âge, le degré d'hydratation d'une matrice étuvée peut être relié aux hausses de performances. En revanche, à long terme, il semble que l'évolution en fonction de l'élévation de température soit plus contradictoire selon les méthodes employées.

b) 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. PANE 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 les faibles températures, les éléments chimiques peuvent diffuser dans la matrice cimentaire et précipitent uniformément alors qu'aux températures élevées, l'accélération des réactions de l'hydratation est telle que la plupart des produits de l'hydratation s'agglomèrent près des grains de ciment et ne remplissent pas l'espace interstitiel.

c) Effet sur les produits d'hydratation :

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 C-S-H :

Concernant les gels de C-S-H développés avec une Les produits formés par l'hydratation à 20 °C sont identiques à formés lors d'un traitement thermique de type étuvage élévation de température, on peut dire Que :

- le degré de cristallisation est apparemment peu modifié.
- le degré de polymérisation des chaînes silicatées croît avec le temps et la température [Bentz 1991] ; le rapport entre les chaînes polymères et le dimère de tétraèdre SiO_4 (Q_2/Q_1) augmente avec le temps et surtout avec la température [Masses 1994] (figure III.13)
- le rapport CaO/SiO_2 évolue peu jusqu'à une température de 75 °C [Older1987]

- la couche d'hydrates entourant les grains anhydres est plus dense [Scrivener 1992] ce qui conforme la théorie [Verbeeck 1968]
- ils renferment une quantité moindre d'eau chimiquement liée en comparaison à une matrice mûrie à 20 °C [Oder 1987],-la microporosité des C-S-H internes (formés dans le grain anhydre) diminue [kjellsen 1996].
- les C-S-H externes (ceux formés entre les grains anhydres) changent de morphologie, passant d'une structure à fibres courtes et enchevêtrés à 20 °C à une structure à fibres longues et dissociées à 80°C. [20].

Portlandite :

Morphologiquement, la portlandite se forme en amas plus denses et en plus grande quantité lors d'un traitement thermique que lors d'une maturation à 20°C [kjellsen 1996]. Les cristaux de CH, plus combinés avec ceux de C-S-H, sont lamellaires et allongés [Scrivener 1992]. En effet, une solubilité plus faible de CH favorise sa nucléation car sa sursaturation est plus rapide.

À l'interface entre le granulats et la pâte de ciment et pour une température de 20°C, la portlandite est très étendue parallèlement à cette interface. En revanche, pour T=60°C, elle s'ordonne en petits cristaux compacts [Ollivier 1981, kjellsen 1996]. Malgré cette observation, les études restent contradictoires sur les phénomènes engendrés au niveau de l'interface pâte granulats 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 granulats et la matrice [Clark 1992, platel 1995].

Aluminates hydratés :

Pour les températures d'étuvage pratiquées (inférieure à 60°C), les cinétiques réactionnelles sont accélérées sans que des phénomènes de formation d'étranglement différée n'apparaissent [Scrivener 1992]. D'autre part, il semble qu'il existe un effet de l'hydratation du C3A sur l'aurole de transition lors d'un étuvage, dû à la nature minéralogique du granulats [Ollivier 1981].

6.4.2.

a) Effets sur la résistance mécanique :

-  **Effet bénéfique de l'étuvage sur les résistances en compression au jeune âge :**

Pour assurer une résistance élevée au jeune âge, le choix du ciment se porte généralement sur un CEM 52,5R. Ce ciment doit avoir une finesse élevée ce qui assure une surface réactionnelle importante pour la réaction d'hydratation. Il faut aussi vérifier que le rapport molaire C3S /C2S soit le plus haut possible. Ces deux phases anhydres, majoritairement présentes dans le ciment portland, sont les composés qui produisent le plus d'hydrates mécaniquement résistants. De plus, la cinétique d'hydratation du silicate tricalcique est plus rapide que celle de silicate bi calcique, donc un rapport élevé est un gage de réactivité importante [Regourd1979]. [22]

D'autre part, le choix d'un étuvage optimisé est nécessaire. Généralement, il se décompose en une pré-pression, une montée constante en température et palier de température maximale assez long. Il doit posséder un pré-prise pour assurer un développement de l'hydratation initiale en favorisant la dissolution des anhydres. Il ne faut pas que la montée en température soit trop forte ne pas bloquer trop précocement l'hydratation (limitée à 20°C /h).

Finalement, la température de palier ne doit pas être trop élevée afin de ne pas générer des effets secondaires néfastes comme la formation d'étrangéité différée (limitée à 60°C en général).

Effet néfaste de l'étuvage sur les résistances en compression à long terme :

La baisse de performances mécaniques à long terme imputable à l'étuvage peut s'expliquer par des causes chimiques, physiques et physico-chimiques.

Du point de vue chimique, l'accroissement de température entraîne une perturbation de la stabilité du système, ce qui engendre un déplacement de l'équilibre chimique entre la quantité d'anhydrites et d'hydrates formés. Ce phénomène génère une limitation de la formation d'hydrates, ce qui peut expliquer une baisse des performances [Jalali1995]. [21]

Ensuite, on peut citer les causes physiques au travers de la volumique différentielle des constituants. Lors de l'élévation de température, il existe une augmentation de la porosité qui s'accompagne d'une modification de la taille des pores. C'est en fait la conséquence de la répartition des hydrates dans l'espace qui est différente en comparant à une maturation à température ambiante.

Finalement, il faut citer la théorie de [Verbeck1968] qui traite du développement de l'hydratation lors d'un étuvage en considérant des causes physico-chimiques. La baisse des

performances à 28 jours serait due à une réparation non uniforme des hydrates ce qui entraîne une hétérogénéité de la structure. Lors d'une accélération de la cinétique de l'hydratation par température, la diffusion n'est pas possible à une certaine distance des anhydres à cause d'une faible diffusivité des espèces dissoutes et à la faible solubilité des hydrates formés. Il en résulte la création d'une «coquille d'hydrates» entourant un cœur anhydre. Ce mode de développement de l'hydratation va avoir une influence sur le ralentissement de l'hydratation. Mais, cette théorie possède certaines limites car l'auréole de transition n'est pas prise en compte ce qui est dommageable sachant que cette zone influence grandement la résistance mécanique du béton. [19]

III.7. Conclusion :

Si l'étuvage est bénéfique à la réactivité de l'hydratation et donc aux performances mécaniques précoces, les performances à long terme s'en trouvent affectées. Le cycle d'étuvage doit résulter d'un compromis entre l'effet bénéfique au jeune âge et la limitation des effets néfastes, non désirés, à long terme. le traitement thermique doit être absolument optimisé.

Partie 2

ETUDE
EXPÉRIMENTALE



IV.1 Méthodologie du travail :

Dans cette partie, nous présentons les différentes étapes que nous avons suivies pour réaliser ce travail, notre étude pratique est consacrée essentiellement à l'étude de l'influence de cycle de traitement thermique sur les comportements physico-mécanique d'un (BAP) à jeune âge et à long terme. Les mélanges des bétons et les essais ont été effectués selon les normes.

Pour cela, le plan de travail que nous avons dressé est partagé en 5 étapes :

1^{er} Etape : Caractérisation des matériaux utilisés : ciment, eau, granulats, fillers, Superplastifiant.

2^{eme} Etape : Formulation d'un BAP avec 10% en fines (fumées de silice ou fillers calcaire) et avec un rapport $G/S = 1$, masse de ciment, fines et granulats fixes. Le rapport E/C constant pour les deux BAP, selon la méthode Japonaise.

3^{eme} Etape : Caractérisation rhéologique des bétons obtenus (de BAP non étuvés) selon les exigences normalisées (étalement, T50, boîte en L, stabilité au tamis).

4^{eme} Etape : Traitement thermique des bétons autoplaçants.

5^{eme} Etape : Résultats des essais physico-mécaniques des bétons (étuvés et non étuvé), conclusion et recommandation.

- **Matériel utilisé :**

Les matériels utilisés sont :

- Balance.
- Tamiseuse électrique pour l'analyse granulométrique.
- Etuve de séchage.
- Malaxeur à béton.
- Presse de compression.
- Boîte en L.
- Cône d'Abrams

IV.2. Caractéristiques des constituants :

Dans ce chapitre, on traite la détermination des caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton. La connaissance de leurs caractéristiques est impérative à toute recherche ou étude d'investigation, puisque chacune pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. C'est pour cette raison qu'on procède à la caractérisation de chaque constituant de béton.

2.1. Ciment :

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland composé, dont les caractéristiques physico mécaniques et chimiques satisfont aux exigences des ciments CPJ CEM II/A 42.5 N. Il provient de la cimenterie de M'SILA, ACC. Selon la norme française [NF P 15-301].

Les résultats obtenues après des essais physique, mécanique, chimique et minéralogique sur ce ciment sont inscrits dans le tableau ci-dessus:

2.1.1. Caractéristiques physiques du ciment :

Tableau. IV.1 : Les caractéristiques physiques du ciment (CPJ CEMII 42.5N).

Caractéristiques	Résultats	Unités
Consistance normale	25.89	(%)
Début de prise	157	(min)
Fin de prise	240	(min)
SSB	4134	(Cm ² /g)
Masse spécifique	3.1	(g/cm ³)

2.1.2. Caractéristiques mécaniques du ciment :

Tableau .IV.2 : Résistance à la compression et à la flexion du ciment (CPJ CEMII /A 42.5N).

Essais	Age [J]		
	2 jours	7 jours	28 jours
Résistance à la compression (MPa)	20,37	40,10	52,34
Résistance à la flexion (MPa)	5,21	8,50	11,86

D'après les résistances obtenues, on peut classer notre ciment dans la catégorie CEM II 42.5N

2.1.3. Composition chimique du ciment :

L'analyse chimique du ciment montre qu'il est conforme à la norme NFP 15 – 30 à savoir : $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} < 1\%$ $\% \text{MgO} + \text{CaO} (\text{libre}) < 5\%$ et faible taux de (Cl⁻ 3,5%)

Résistance à la compression à 28 jours : 52,3MPA

Résistance à la flexion à 28 jours : 11,86 MPA

Tableau .IV.3: Composition chimique du ciment (CPJ CEMII 42.5N).

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Chlorures	PAF	insoluble
%	60,95	16,26	4,24	2,45	2,50	0,19	0,61	1,50	0,00	8,91	-

2.1.4. Composition minéralogique du ciment :

Tableau .IV.4 : Composition minéralogique du ciment (CPJ CEMII 42.5N).

Eléments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CAO	Gypse	Calcaire	pouzzolane
%	57	19	5	13	1,0	5	5	7

2.2. Les ajouts :

2.2.1. Filler de calcaire :

Le calcaire est une poudre finement broyée récupérée au niveau de centre de recherche CETIM.

- **Caractérisation physique des fillers de calcaire :**

Tableau. IV.5 : les Caractéristiques physiques du filler calcaire.

Caractéristiques	Résultats
Masse spécifique (g/cm ³)	2,7
Surface spécifique (cm ² /g)	9060

- **La composition chimique :**

Tableau. IV.6: Composition chimique des fillers calcaire.

éléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Cl	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
%	0,78	0,28	0,22	0,03	0,01	0,04	0,60	54,54	0,004	0,03	0,01	43,45

- **La composition minéralogique :**

Tableau. IV .7 : La composition minéralogique de filler calcaire.

Elément	Quartz(SiO ₂)	Calcaire(CaCO ₃)	Dolomite CaMg(CO ₃) ₂
%	04	90	06

2.2.2. Fumée de silice :

Dans notre recherche nous avons utilisé la fumée de silice comme ajout minérale dans les BAP commercialisé par la société Granitex OUAD SMAR (ALGER).

- **Caractéristiques physiques :**

Tableau. IV.8 : Caractéristiques physiques de fumée de silice.

Caractéristiques	Résultats
Masse spécifique (g/cm ³)	2,3
Surface spécifique (m ² /g)	17000

- **Caractéristiques chimiques :**

Tableau. IV.9 : Composition chimique de la fumée de silice.

éléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
%	92,27	0,52	0,92	1,29	0,51	0,08	1,31	0,76	0,04	0,00	2,3

2.3. Les adjuvants :

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau commercialisé par la société Granitex cheraga (Alger), sous le nom de (CHRYSO fluide optima 220).

2.3.1. Caractéristiques de chryso fluide optima 220 :

Tableau IV.10 : Caractéristiques de l'adjuvant (chryso fluide optima 220).

Nature	Liquide
Couleur	Brun
Densité (20°C)	1,05 ± 0,02
PH	≤ 5,0 % ±1,0
Teneur en ions Cl⁻	≤0,10%
Na₂O équivalent	≤1,0%
Extrait sec(EN 480-8)	30% ±1,0%
L'eau	70%
Durée de vie	18 mois

2.4. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée dans notre préparation des gâchés, c'est l'eau potable du robinet.

2.5. Les granulats :

La composition granulaire du mélange des constituants doit être inscrite dans un fuseau selon la norme XP P18 545 ; Les études d'identification des matériaux réalisés au laboratoire ALCAHYD – BOUDOUAOU conformément aux prescriptions des normes «EN» à savoir :

- P 18-555 relatif à la mesure de « ρ, ρ₀, σ, ε ».
- NF EN 933-1 : Granularité des sables et graviers.

- NF EN 1079-6 : Masse volumique apparente(ρ).
- NF EN 1079-6 : Masse volumique absolue (ρ_0).
- NF EN 1097-4 : Compacité(σ).
- NF EN 1097-4 : La porosité(ϵ).
- NF EN 933-9 : Essai au bleu de méthylène (MB).
- NF EN 1097-6 : Coefficient d'absorption (Ab).
- NF EN 933-8 : Relatif à l'essai de propreté « équivalent de sable »

Les résultats des caractéristiques physiques des granulats sont obtenus au niveau du laboratoire d'ALCAHYD-BOUDOUAOU.

2.5.1. Le Sable :

- **Sable HACHIMIA ENG :**

Le sable utilisé est un sable 0/4 concassé d'HACHIMIA ENG (entreprise national des granulats).

D'après les résultats obtenus c'est un sable conforme permet en fait d'obtenir des bétons des résistances relativement élevés.

A- Caractéristiques physiques du sable HACHIMIA ENG :

Tableau IV.11: les Caractéristiques physique du sable HACHIMIA ENG.

Caractéristiques	Les fourchetts	Résultats	Unités
Masse volumique absolue (ρ)	2.65-2.80	2.74	g/cm^3
Masse volumique apparente (ρ_0)	1.60-1.75	1.72	g/cm^3
La compacité (σ)	/	0.62	/
La porosité (ϵ)	/	0.38	/
Equivalent de sable visuel (ESV)	≥ 65	71.25	%
Equivalent de sable avec piston(ESP)	≥ 60	72.60	%
Essaie au bleu de méthylène(MB)	< 1	0.75	g/kg
Coefficient d'absorption (Ab)	/	1.66	%
La teneur en eau	/	0.5	%

B- Analyse granulométrique du sable :

Une analyse granulométrique du sable a été réalisée conformément aux normes citées ci-dessus les résultats sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau.IV.12 : Analyse granulométrique du sable **HACHIMIA ENG** selon la norme (NF EN 1260).

Masse humide : 1000g Masse sèche : 995g Masse sèche après lavage : 934g		Teneur en humidité = 0.5 (%)		MF(%)
Ouverture de tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Les passants (%)	
6.3	0	0	100	3.77
4	43	4.32	95.68	
2	411	41.30	58.70	
1	671	67.43	32.57	
0.5	817	82.11	17.89	
0.25	892	89.64	10.36	
0.125	923	92.76	7.36	
0.063	933	93.76	6.21	
Fond de tamis	934	93.86	6.13	

- La teneur en fines :

$F = (M_h - M_s) / M_s \times 100$ S'exprime en pourcentage (%) représente les passants au tamis 0.063 mm

$$T_f = (995 - 934) / 995 \times 100 = 6.13\%$$

- module de finesse : Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100 de la somme des refus, exprimés en pourcentage sur les tamis de la série suivante :

$$0.125 - 0.25 - 0.5 - 1 - 2 - 4 - 6$$

Le module de finesse est plus souvent utilisé pour les sables, c'est une caractéristique importante dans le proportionnement du béton.

Le module de finesse $MF = 377/100 = 3.77\%$ c'est une valeur située à l'extérieur de la fourchette [2.7, 3.2] de normalisation donc c'est un sable grossier, et afin d'obtenir un sable normalisé il nous suffit de faire une correction avec un sable fin (sable oued souf).

- **Sable de correction (Sable 0/2 oued souf) :**

A- Caractéristiques physiques du sable correcteur :

Tableau IV.13 : les Caractéristiques physiques du sable **oued souf**.

Caractéristiques	Les fourchetts	Résultats	Unités
Masse volumique absolue (ρ)	2.60-2.75	2.71	g/cm ³
Masse volumique apparente (ρ_0)	1.50-1.65	1.64	g/cm ³
La compacité (σ)	/	0.60	%
La porosité (ϵ)	/	0.40	%
Equivalent de sable visuel (ESV)	≥ 75	78.3	%
Equivalent de sable avec piston(ESP)	≥ 70	72.62	%
Essaie au bleu de méthylène(MB)	< 1	0.75	g/kg
Coefficient d'absorption (Ab)	/	2	%
La teneur en eau	/	1.62	%

B- Analyse granulométrique du sable 0/2 oued souf :

Tableau.IV.14 : Analyse granulométrique du sable **oued souf**.

Masse humide : 500g Masse sèche : 492 g Masse sèche après lavage : 483g		Teneur en humidité=1.62 (%)		MF(%)
Ouverture de tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Les passants (%)	
6.3	0	0	100	2.39
4	0	0	100	
2	17	3.45	96.55	
1	71	14.43	85.57	
0.5	222	45.12	54.88	
0.25	391	79.47	20.53	
0.125	476	96.74	3.26	
0.063	783	98.17	1.83	
Fond de tamis	783	98.17	1.83	

Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100e de la somme des refus, exprimé en pourcentage sur les tamis de la série suivante : 0.125– 0.25–0.5–1–2–4–6.

Le module de finesse de sable de oued souf MF = 239/100= 2.39%.

- **la teneur en fine** = $(M_h - M_s) / M_s \times 100$

$$T_f = (492 - 483) / 483 \times 100 = 1.82\%$$

Correction : Elle se fait selon la méthode d'ABRAMS dont la formule est la suivante.

Le module de finesse désiré soit fixé à (M_fx=3.2)

$$X = S_0/4 = (MF - M_{f2}) / (MF_1 - M_{f2}) \times 100 = (3.2 - 2.39) / (3.77 - 2.39) \times 100 = 58.70\%$$

$$Y = S_0/2 = (MF_1 - MF) / (MF_1 - M_{f2}) \times 100 = (3.77 - 3.2) / (3.77 - 2.39) \times 100 = 41.30\%$$

2.5.2. Le gravier :

Le gravier utilisé provient de la Carrière d'AZROU KEDDARA, ayant les caractéristiques suivantes :

A- Propriétés physiques du gravier d'AZROU KEDDARA.

Tableau .IV. 15 : Résumé des résultats des essais physiques de G 3/8 et G8/15.

Essais Physiques	3/8	8/15	Le fourchette	Unité
Masse volumique apparente ρ	1.41	1.34	1.30 - 1.60	g/cm ³
Masse volumique absolue ρ_0	2.70	2.73	2.60 - 2.80	g/cm ³
La compacité σ	0.52	0.48	/	%
La porosité ε	0.48	0.52	/	%
Absorption d'eau	1.2	0.9	/	%
Teneur en eau	2.1	1.84	/	%
Los angles	22.75	25	< 45	%

D'après les résultats obtenus les graviers utilisés sont conformes aux normes des caractéristique physique des granulats

B- Analyse granulométrique du gravier 3/8 (AZROU KEDDARA) :**Tableau.IV. 16 :** Analyse granulométrique de G3/8.

Masse humide : 1700		Teneur en humidité =2.10%		TF(%)
Masse sèche : 1665				
Masse sèche après lavage : 1618				TF(%)
Ouverture de tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Les passants (%)	
12.5	0	0	100	2.82
10	3	0.18	99.82	
8	239	14.35	85.65	
6.3	872	52.37	47.63	
4	1507	90.51	9.49	
2	1539	92.43	7.57	
1	1598	95.97	4.03	
0.5	1600	96.07	3.91	
0.25	1602	96.21	3.79	
0.125	1608	96.57	3.43	
0.063	1618	97.17	2.82	
Fond de tamis	1619	97.23	2.77	

C- Analyse granulométrique du gravier 8/15 (AZROU KEDDARA) :**Tableau.IV. 17 :** Analyse granulométrique de G8/15.

Masse humide : 3200 g		Teneur en humidité=1.84 %		TF(%)
Masse sèche : 3142 g				
Masse sèche après lavage : 3100 g				TF(%)
Ouverture de tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	les passants (%)	
20	0	0	100	1.33
16	102	3.24	96.76	
14	575	18.30	81.70	
12.5	1202	38.25	61.75	
10	2389	76.03	23.97	
8	2975	94.68	5.32	
6.3	3080	98.02	1.98	
4	3084	98.15	1.85	
2	3084	98.15	1.85	
1	3085	98.18	1.82	
0.5	3085	98.18	1.82	
0.250	3086	98.21	1.79	
0.125	3091	98.37	1.63	
0.063	3100	98.66	1.33	
Fond de tamis	3100	98.66	1.33	

IV.3. Formulation des bétons BAP :

Les deux principales propriétés des BAP sont la grande fluidité et la grande résistance à la ségrégation. Ces deux propriétés sont à priori contradictoires pour un béton ordinaire; l'obtention de l'une faisant souvent au détriment de l'autre. Pour réaliser un BAP, il faut obtenir une suspension fluide suffisamment dense de manière à éviter le tassement des plus gros constituants.

À résistance équivalente les BAP ne se différencient des bétons ordinaires que par une quantité supérieure de pâte, regroupant le ciment et les particules fines, par l'introduction d'un agent de viscosité et par l'utilisation d'un faible volume de gravillon. Dans les BAP, le volume de pâte (ciment, additions, eau efficace et air) est généralement compris entre 330 et 400 l/m³. Leur formulation requiert une étude précise notamment dans le choix des constituants, l'optimisation de la teneur en ajout chimique, de la quantité d'eau, et d'optimisation de la teneur en gros granulats

Les caractéristiques des BAP doivent permettre d'assurer :

- La mobilité des matériaux en milieu non confiné (appréhendée par l'essai d'étalement).
- La stabilité, c'est à dire la résistance à la ségrégation et au ressuage (appréhendée par l'essai de stabilité au tamis).

Les BAP ont une grande capacité de remplissage en zone confinée car leur fluidité et leur résistance à la ségrégation sont telles que le phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle est évité. Ce dernier dépend des propriétés et de la proportion de la pâte qui est directement liées aux caractéristiques du liant et à la quantité d'eau libre, c'est-à-dire à la quantité d'eau non retenue par les différents constituants. Si le béton contient une forte quantité d'eau libre, une partie des gravillons se sépare facilement du mélange et les forces de collisions et de friction augmentent jusqu'à la formation de voûtes ce qui accentue la ségrégation des constituants.

3.1. Formulation préliminaire d'un béton autoplaçant : (Selon la méthode Japonaise).

3.1.1. Calcul de composition :

Les intervalles pour chaque constituant donnés par cette méthode sont :

- Volume de gravillons est limite en fonction de $G/S = 1$.

- Volume de la pâte est varié entre : 330 à 400 Kg/m³ (C+F).
- La masse de ciment : Mc = 350 à 450 Kg/m³.
- Les fines : 30 à 45 Kg/ m³.
- Le dosage en superplastifiant.

3.1.2. Les données de base :

- on choisit G/S= 1
- le rapport E/(C+F) = 0.4
- Le dosage en superplastifiant proche au point saturation (1.5% à bas des fillers calcaire et 1.5% à bas de fumée de silice).

3.2. Optimisation de la composition du BAP :

Dans notre formulation on a:

- 450 kg/m³ du ciment.
- 45 kg/m³ des fillers (10% du poids du ciment).
- E/(C+F)=0,40, d'où E = 0,40 * (450 + 45) = 198 (l).

3.2.1. Calcul de formulation à base de calcaire:

Le volume de la pâte pour 1m³ du BAP avec calcaire :

$$(450/3.1) + (45/2.7) + 192.16 + (7.42/1.05) = 361.04(L)$$

Le volume des granulats:

$$1000 - 361.04 = 638.96(L)$$

- G/S= 1
- 638.96= G+S
- G=638.96- S et G=S
- S=638.96/ 2 d'où S = 319.48(L)
- G = 319.48(L)
- Le dosage en superplastifiant est 1.5% de la masse de (ciment + filler calcaire).
- $SP = \frac{1.5 * (450 + 45)}{100} \Rightarrow SP = 7.42 \text{ kg/m}^3$
- L'extrait sec est 30 %, d'où la quantité d'eau est de l'ordre de 70 % .Donc la quantité d'eau contenant dans le superplastifiant est :

$$SP = \frac{7,42 * 70}{100} \Rightarrow SP = 5,19 (L)$$

- De ce fait, la quantité d'eau qu'il faut ajouter est : $198 - (5.19+0,65) = 192.16(L)$.
- La masse des granulats :

Sable

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Grossier} = \frac{(319.48*58.70)*2.74}{100} = 513.84 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Fin:} = \frac{(319.48*41.30)*2.71}{100} = 357.57 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right.$$

Gravier

$$\left\{ \begin{array}{l} 3/8 = \frac{(319.48*50)*2.70}{100} = 431.29 \text{ kg/m}^3 \\ 8/15 = \frac{(319.48*50)*2.73}{100} = 436.09 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right.$$

3.2.2. Calcul de formulation à base de fumée de silice :

Le volume de la pâte pour 1m^3 du BAP avec la fumée de silice :

$$(450/3.1) + (45/2.3) + 192.16 + (7.42/1.05) = 363.94(L).$$

Le volume des granulats:

$$1000 - 363.95 = 636.06(L)$$

- $G/S = 1$
- $636.06 = G + S$
- $G = 636.06 - S$ et $G = S$
- $S = 636.06 / 2$ d'où $S = 318.03 (L)$
- $G = 318.03(L)$
- Le dosage en superplastifiant est 1,5% de la masse de (ciment + fumée de silice)
- $SP = \frac{1.5*(450+45)}{100} \Rightarrow SP = 7.42 \text{ kg/m}^3$
- L'extrait sec est 30 %, d'où la quantité d'eau et de l'ordre de 70 %. Donc la quantité d'eau contenue dans le superplastifiant est :

$$SP = \frac{7.42*70}{100} = 5.19(L)$$

- De ce fait, la quantité d'eau qu'il faut ajouter est : $198 - (5.19+0.65) = 192.16(L)$
- La masse des granulats :

Sable

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Grossier} = \frac{(318.03 \cdot 58.70) \cdot 2.74}{100} = 511,51 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Fin} = \frac{(318.03 \cdot 41.30) \cdot 2.71}{100} = 355.94 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right.$$

Gravier

$$\left\{ \begin{array}{l} 3/8 = \frac{(318.03 \cdot 50) \cdot 2.70}{100} = 429.34 \text{ kg/m}^3 \\ 8/15 = \frac{(318.02 \cdot 50) \cdot 2.73}{100} = 434.11 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right.$$

3.2.3. Les compositions des deux BAP sont résumées dans le tableau ci-dessous :**Tableau IV.18:** Formulation des deux BAP.

Constituants (kg/m ³)	Ciment	Eau	SP	S (0/2)	S (0/4)	G (3/8)	G (8/15)	FILLERS	MV
Formulation de BAP avec filler de calcaire (BAPC)	450	192.16	7.42	357.57	513.84	431.29	436.09	45	2433.37
Formulation de BAP avec fumée de silice (BAPF)	450	192.16	7.42	355.94	511.51	429.34	434.11	45	2425.48

3.3. Malaxage de béton :

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



Figure. IV.1: Malaxeur utilisé pour la fabrication du béton.

IV.4. Résultats et interprétations :

4.1. Essais sur béton frais :

Avant d'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 :

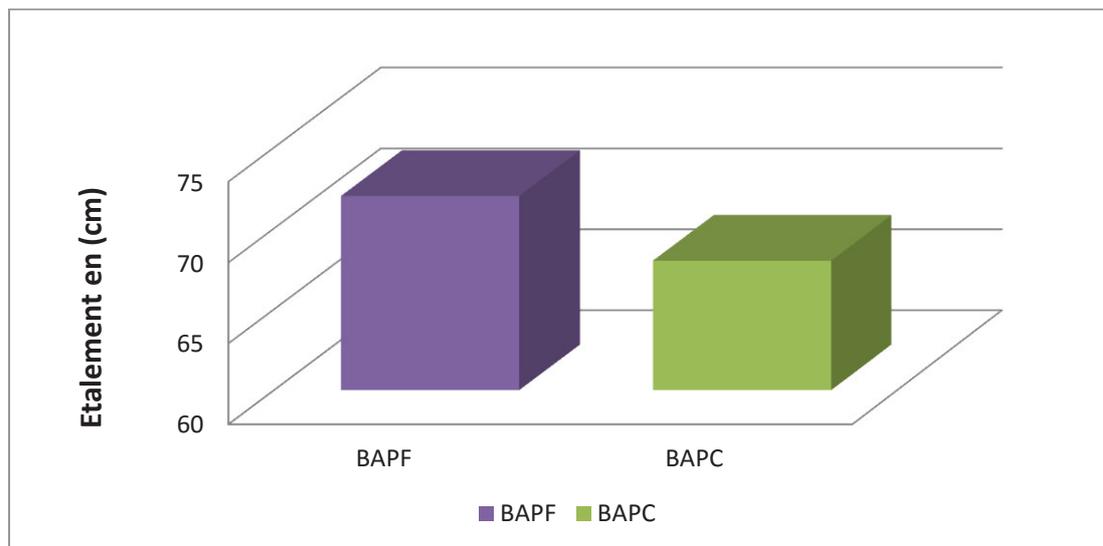
4.1.1. Essais d'étalement au cône d'Abrams :(Norme de référence [NF EN 12350-8]).



Figure. IV.2 : Essai d'étalement (cône d'Abrams).

Tableau. IV.19 : Résultats de l'essai au cône d'Abrams.

ESSAIS	BAPF	BAPC
Étalement cm	72	68
T ₅₀ (s)	4.98	5.38

**Figure. IV.3** : évolution de l'étalement.

D'après les résultats obtenus on peut constater que les deux BAP respectent le critère d'étalement. L'étalement était compris entre 65 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, cela est dû à la forme et la nature des particules de la fumée de silice, étant sphériques et lisses qui peuvent améliorer mieux à l'écoulement de béton autoplaçant.

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

- Les bords de la galette donnent une indication sur le ressuage.
- On peut noter la forme plus au moins bombée de la galette et l'homogénéité du béton.

4.1.2. Essai de la boîte en « L » :(norme de référence NF EN 12350-10).



Figure. IV.4 : Essai de la boîte en L.

Tableau. IV.20 : Résultats de boîte en L.

ESSAIS	BAPF	BAPC
Taux de remplissage (%)	85	81

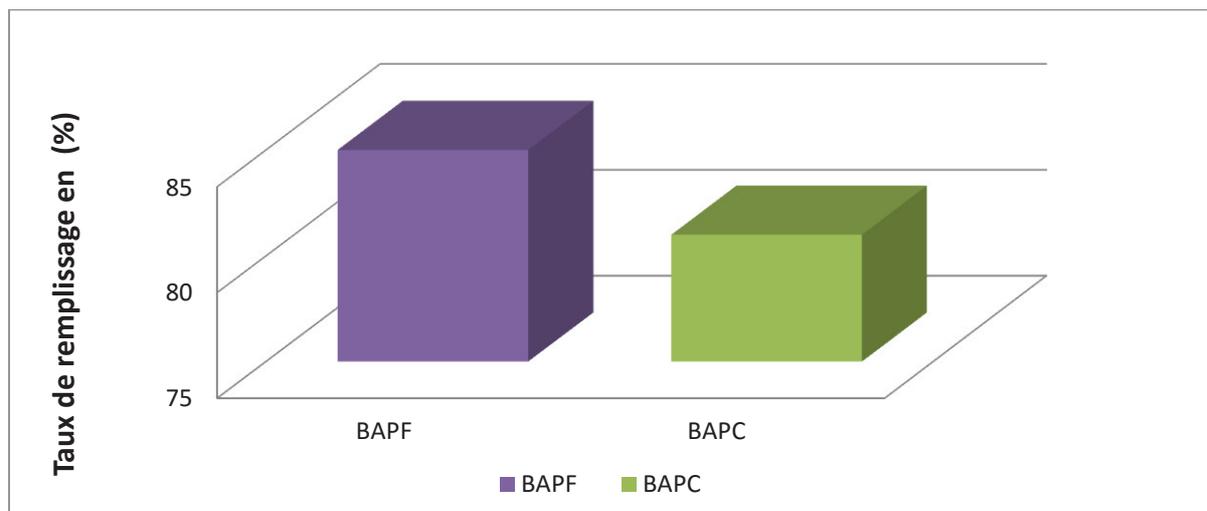


Figure. IV.5 : évolution de taux de remplissage.

Les résultats du tableau IV.20 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 deux BAP. Les deux bétons présentent des taux de remplissage supérieur à 0.80, qui s'inscrivent dans le domaine des BAP.

Le BAP à base de fumé de silice présente un temps de remplissage 0.86 meilleur par rapport au BAP à base de calcaire 0.81, cela peut s'expliquer par la forme arrondie et la nature lisse des particules de fumée de silice.

4.1.3. Essai de stabilité au tamis :(Norme de référence NF EN 12350-11).



Figure. IV.6 : Essai de stabilité au tamis.

Tableau. IV.21 : Résultats de l'essai de stabilité au tamis.

ESSAIS	BAPF	BAPC
Stabilité au tamis (%)	6,9	6,6

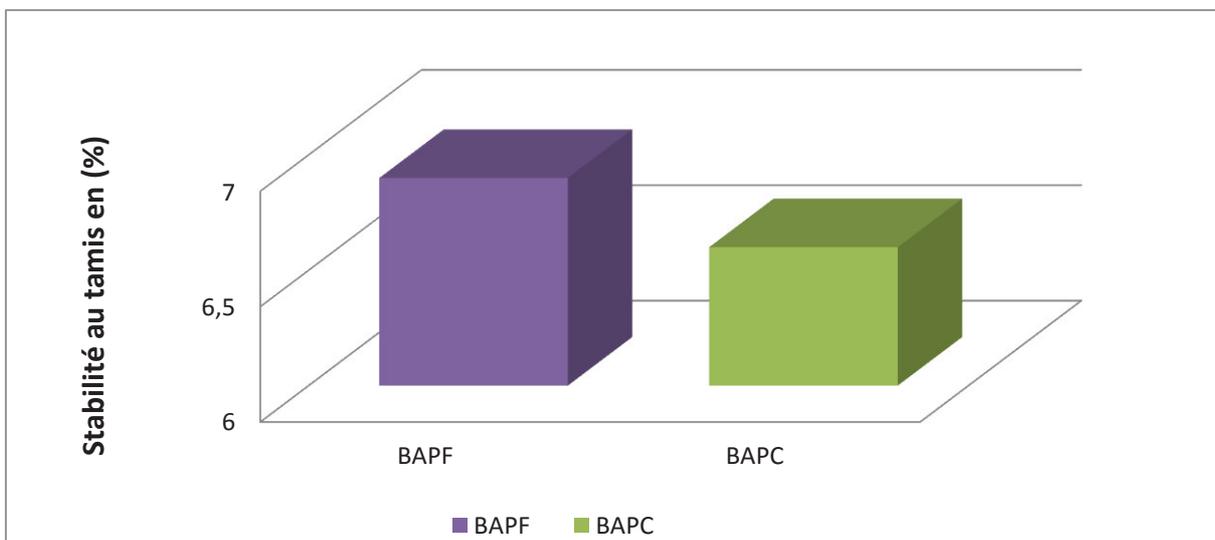


Figure. IV.7 : évolution de stabilité au tamis.

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 deux 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.

Le tableau IV.22 résumé tous les résultats obtenus des essais à l'état frais des deux BAP à base de fillers calcaire et de fumée de silice. Les deux BAP respectent les critères de béton autoplaçant à l'état frais.

Tableau. IV.22: résultats des essais à l'état frais.

ESSAIS	BAPF	BAPC
Masse volumique (Kg/m ³)	2453.48	2455.37
Etalement (cm)	72	68
Stabilité au tamis (%)	6,9	6,6
Taux de remplissage (%)	85	81
T ₅₀ (S)	4.98	5.38

IV.5. Traitement thermique :

Les résistances mécaniques ont été déterminées sur des éprouvettes ayant subi un traitement thermique et d'autres qui n'ont pas subi un traitement thermique et cela afin de voir l'influence de traitement thermique sur les caractéristiques physique et mécanique des bétons autoplaçants à base de filler calcaire et de fumée de silice.

5.1. Procédure de traitement thermique :

Après la réalisation des bétons autoplaçants, les éprouvettes sont couvertes par des plaques métalliques puis subissent un traitement thermique qui est composé de quatre phases comme montre la figure (IV. 8) :

- Phase de prétraitement : palier à température « ambiante » de 20 °C pendant 2 heures.
- Phase de montée en température : montée en température chaque 15min 5°C jusqu'à 65°C pendant 2 heures. On passe ainsi du palier à 20°C au palier à 65°C.
- Phase de maintien à la température de palier : on laisse les éprouvettes à 65°C pendant 6 heures.
- Phase de refroidissement : descente en température la même chose chaque 15min descente 5°C jusqu'à 20°C pendant 2 heures. On passe ainsi du palier à 65°C à une température « ambiante » de 20°C.

La durée totale de ce traitement thermique est d'environ 12 heures, ce qui est représentatif de certains cycles thermiques réalisés dans l'industrie de la préfabrication. Le temps équivalent de ce traitement thermique est d'environ 80 heures.

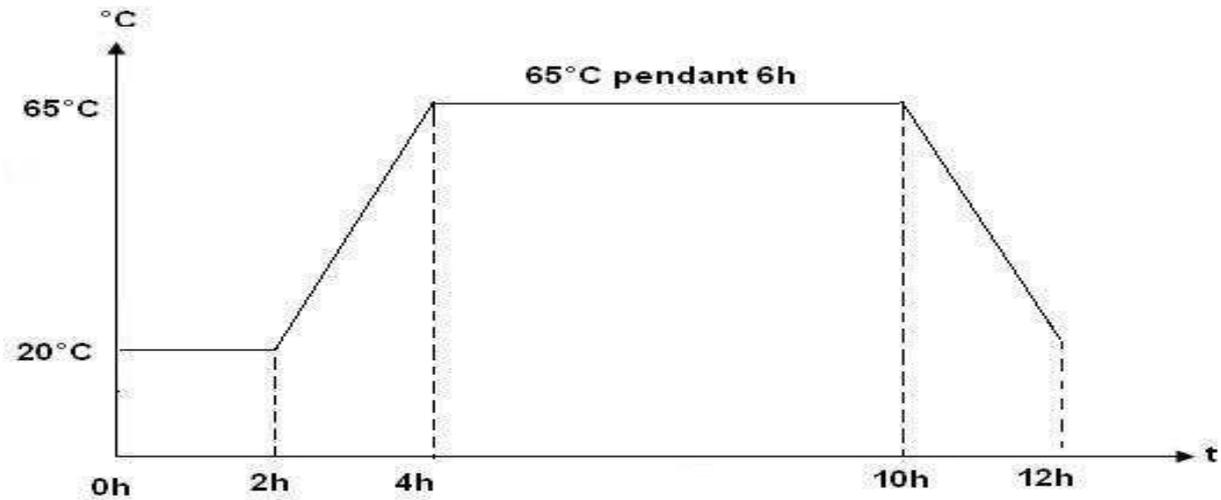


Figure. IV.8 : Cycle d'étuvage appliqué aux éprouvettes.



Figure.IV.9 : étuve pour le traitement thermique.

5.2. Confection des éprouvettes :

La confection du béton consiste à verser dans l'ordre, dans un malaxeur, les fractions de graviers, de ciment (éventuellement avec filler calcaire ou fumée de silice), et la fraction de sable. On mélange l'ensemble à sec pendant une minute afin d'homogénéiser le mélange.

On introduit ensuite la première moitié de l'eau de gâchage accompagnée de la moitié de la quantité du superplastifiant, et on continue à malaxer pendant une minute. Ensuite, on introduit la deuxième moitié d'eau accompagnée de la quantité de superplastifiant restante, et on malaxe une dernière fois pendant deux minutes.

Juste après l'arrêt du malaxage, on mesure l'affaissement du béton ou le diamètre d'étalement et la vitesse d'écoulement du béton autoplaçant ainsi sa résistance à la ségrégation par l'essai au tamis.

On déverse ensuite sans vibration bien sûr, le béton frais dans des éprouvettes métalliques dont les parois ont été déjà humidifiées par une huile de décoffrage.



Figure.IV.10 : Epreuve cylindrique (16×32). **Figure.IV.11** : Epreuve prismatique (10×10×40).

5.3. Conservation des éprouvettes :

Après le coulage, les éprouvettes ayant subi un traitement thermique mettez immédiatement dans l'étuve pendant 12 h. Après 24 h toutes les éprouvettes sont démoulées (béton non étuvé et béton étuvé). Par suite, elles sont conservées dans l'eau sous une température de 20°C et cela jusqu'au jour de l'essai conformément à la norme **NF EN 12390-3**.



Figure.IV.12 : Bac de conservation des éprouvettes.

IV.6. Essais à l'état durci :

6.1. Essai de compression :

Les essais de compression sont effectués sur des éprouvettes cylindriques (16×32) cm², à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale 2000 KN. La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF EN 12390-4. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de contrainte 0,5MPa/S.



Figure. IV.13 : Essai de compression. **Figure. IV.14** : Epreuve après la compression.

6.2. Essai de traction par flexion :(Norme de référence NF EN 12390-5).

L'essai de traction par flexion est effectué sur des prismes de section carrées ($10 \times 10 \times 40$) cm³. Le prisme est placé dans une machine automatique de flexion et est soumis à une charge croissante jusqu'à sa rupture avec une vitesse de chargement de contrainte 0,05MPa/S.



Figure. IV.15: appareil de traction par flexion. **Figure.IV.16 :** Essai de traction par flexion.

6.3. Essai de traction par fendage : (Norme de référence NF EN 12390-6).

Les essais à traction par fendage sont effectués sur des éprouvettes cylindriques (16×32) cm^2 et la vitesse de chargement de contrainte est $0,04 \text{MPa/S}$.



Figure. IV.17: appareil de traction par fendage. **Figure. IV.18 :** Eprouvette après fendage.

6.4. Béton à base de fillers calcaire :

Tableau. IV.23 : Résistances à la compression.

Age (jours)	12h	24h	2j	7j	28j
BAPC non étuvé (MPa)	/	15	20	36	48
BAPC étuvé (MPa)	25	28	32	42	50

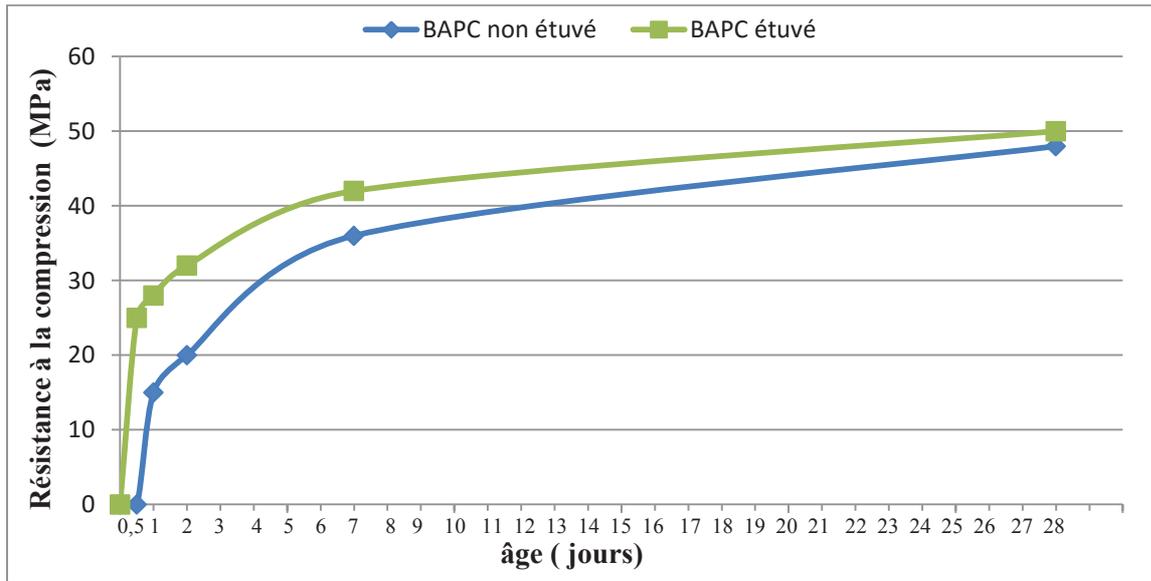


Figure. IV.19 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge de BAPC étuvé et non étuvé.

Tableau. IV.24: Résistance à la traction par fendage.

Age (jours)	12h	24h	2j	7j	28j
BAPC non étuvé (MPa)	/	1,8	2,2	2,9	3,3
BAPC étuvé (MPa)	2,3	2,6	2,8	3,2	3,5

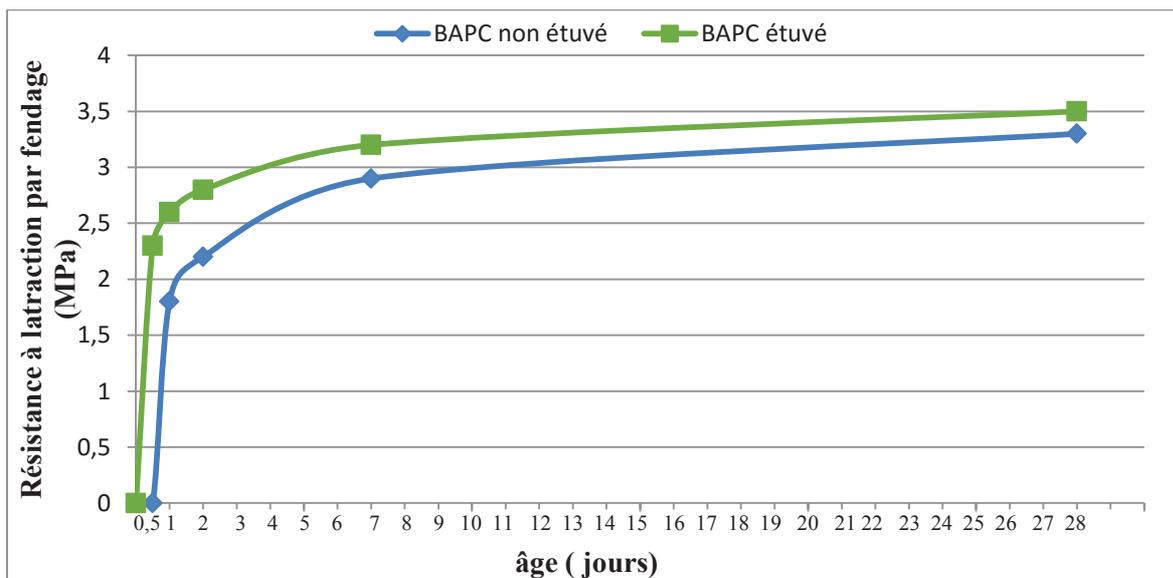


Figure. IV.20 : Evolution de la résistance à la traction par fendage en fonction de l'âge de BAPC étuvé et non étuvé.

Tableau. IV.25: Résistance à la traction par flexion.

Age (jours)	12h	24h	2j	7j	28j
BAPC non étuvé (MPa)	/	4,1	4,6	5,8	7,4
BAPC étuvé (MPa)	5,2	5,4	5,8	6,6	7,8

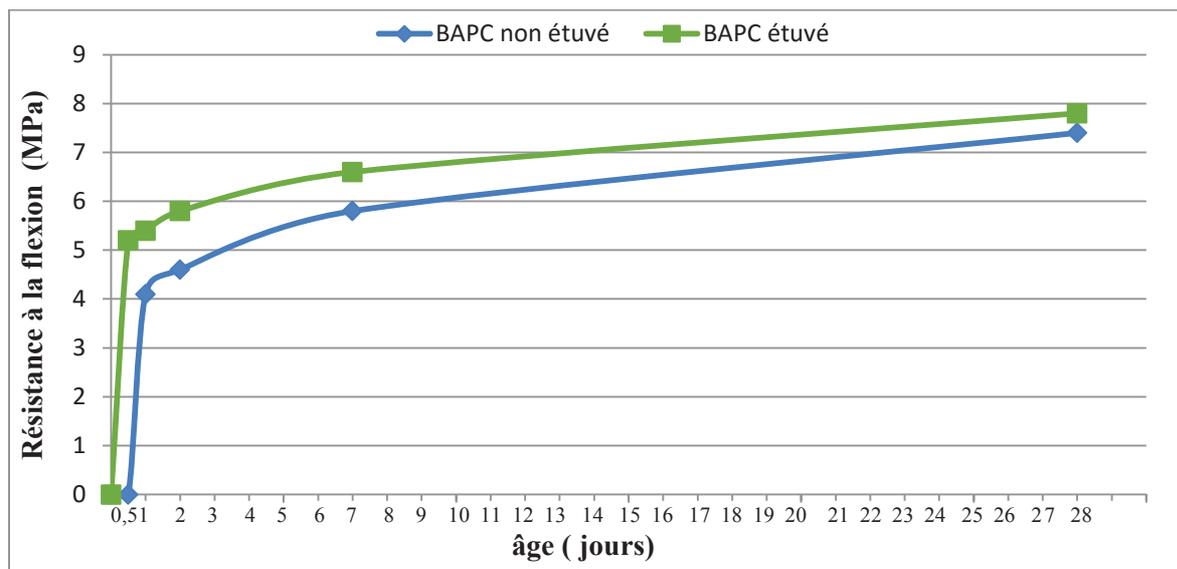


Figure. IV.21 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des BAPC étuvé en non étuvé en fonction de l'âge.

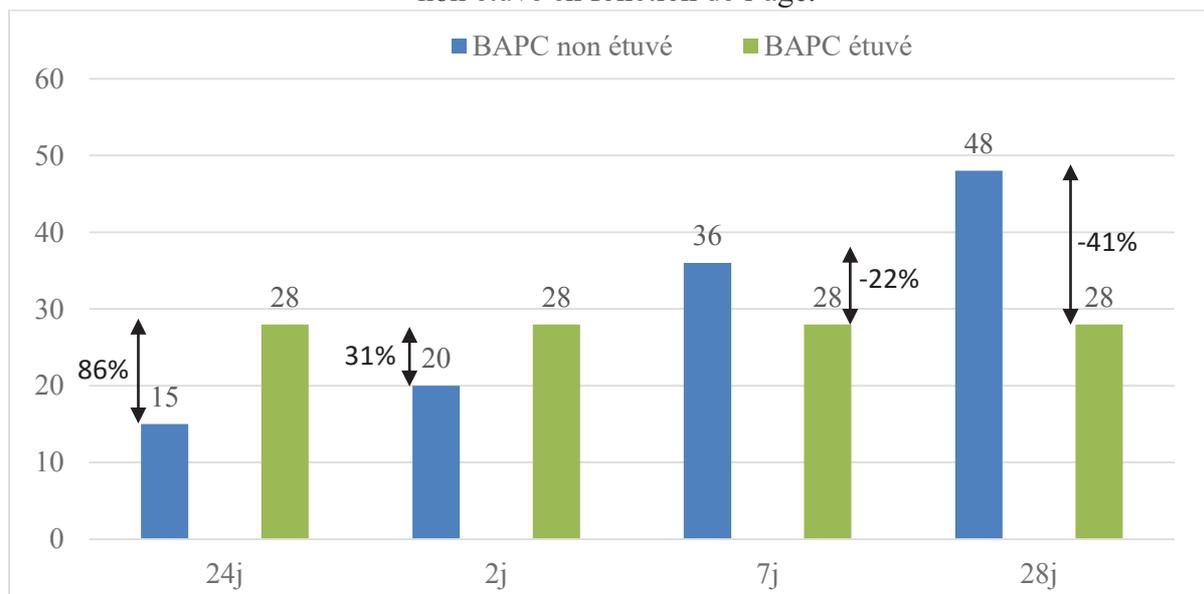


Figure. IV.22 : Gain ou Perte de résistance de BAPC étuvé à 24h avec BAPC non étuvé à différentes âge.

6.5. Béton à base fumée de silice :

Tableau. IV.26: Résistances à la compression.

Age (jours)	12h	24h	2j	7j	28j
BAPF non étuvé (MPa)	/	19	26	42	56
BAPF étuvé (MPa)	30	34	38	47	60

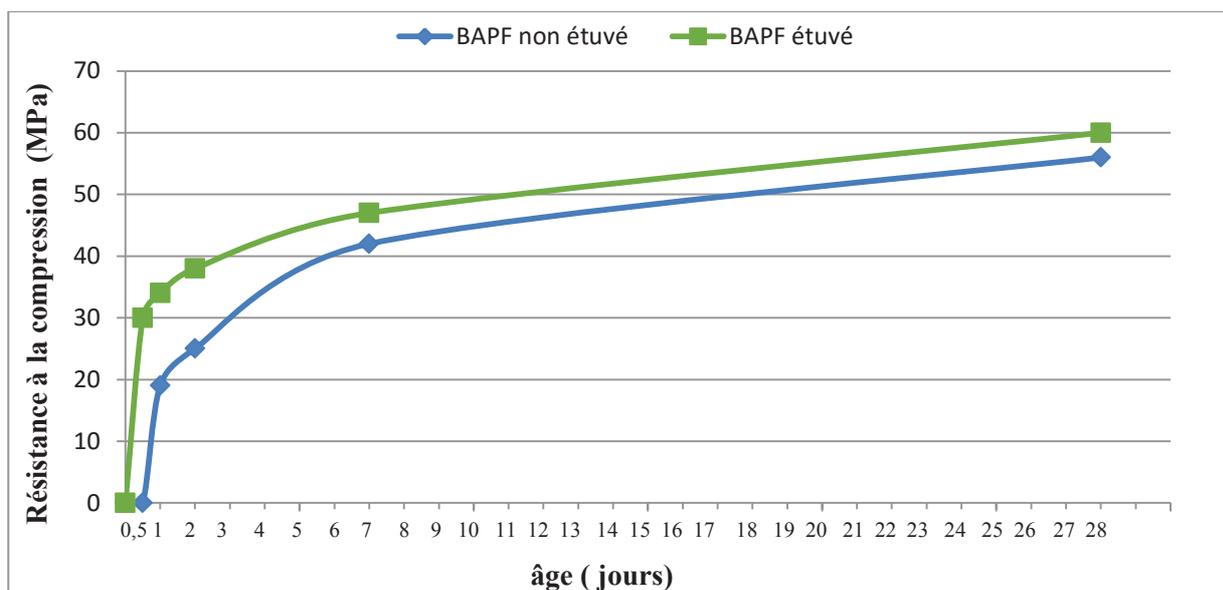


Figure. IV.23: Evolution de la résistance à la compression des BAPF étuvé et non étuvé en fonction de l'âge.

Tableau. IV.27: Résistance à la traction par fendage.

Age (jours)	12h	24h	2j	7j	28j
BAPF non étuvé (MPa)	/	2	2,4	3	3,5
BAPF étuvé (MPa)	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7

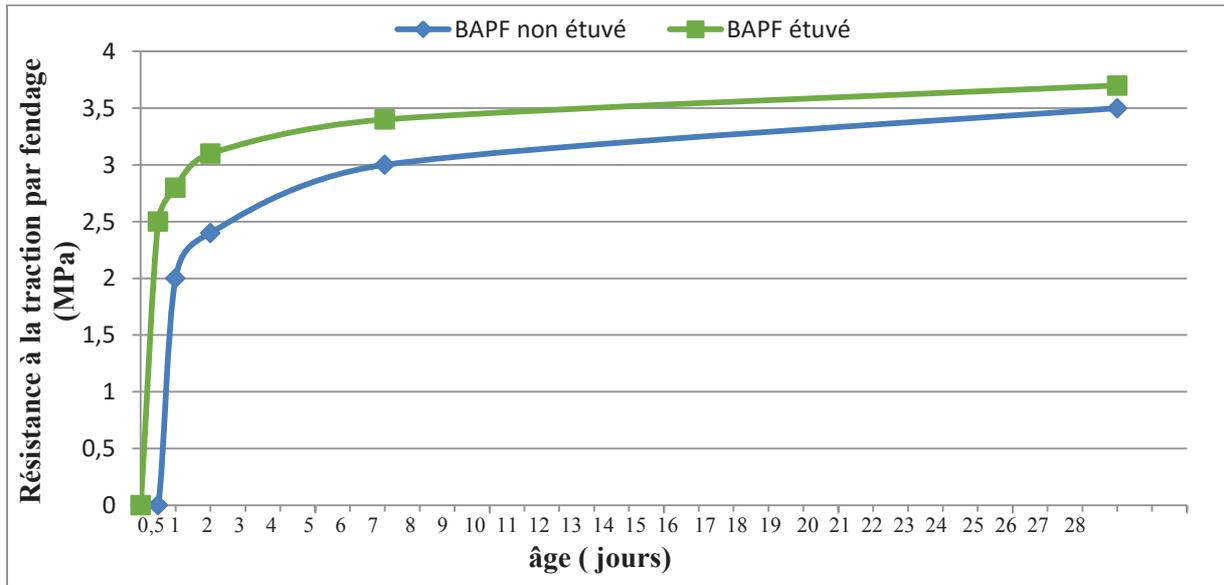


Figure. IV.24 : Evolution de la résistance à la traction par fendage des BAPF étuvé en non étuvé en fonction de l'âge.

Tableau. IV.28: Résistance à la traction par flexion.

Age (jours)	12h	24h	2j	7j	28j
BAPF non étuvée (MPa)	/	4,9	5,5	6,6	7,9
BAPF étuvée (MPa)	5,7	6,1	6,5	7	8,2

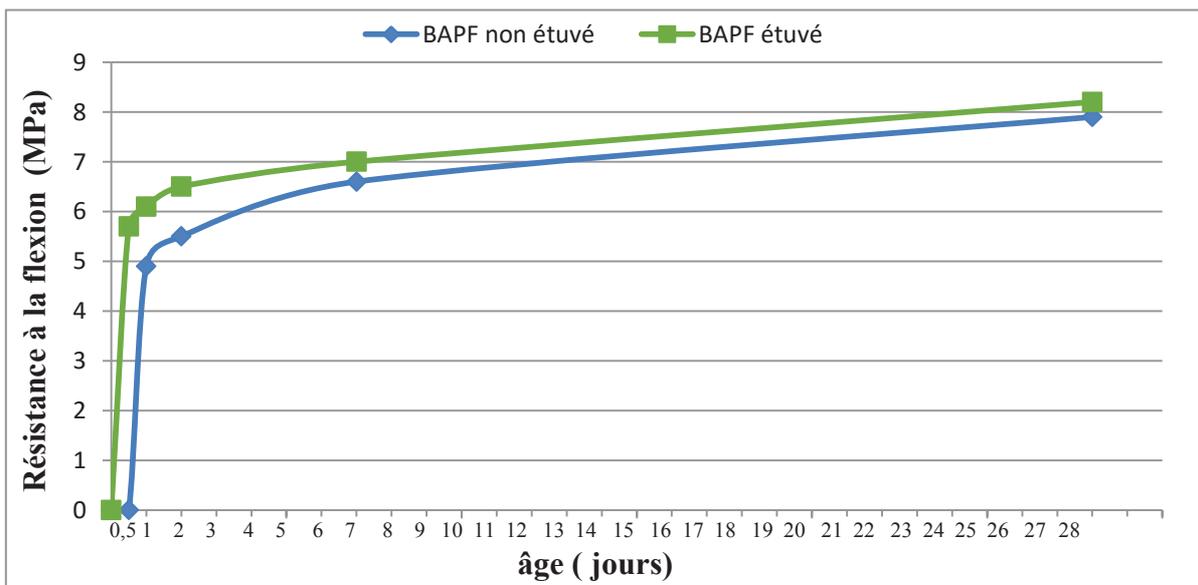


Figure. IV.25 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des BAPF étuvé en non étuvé en fonction de l'âge.

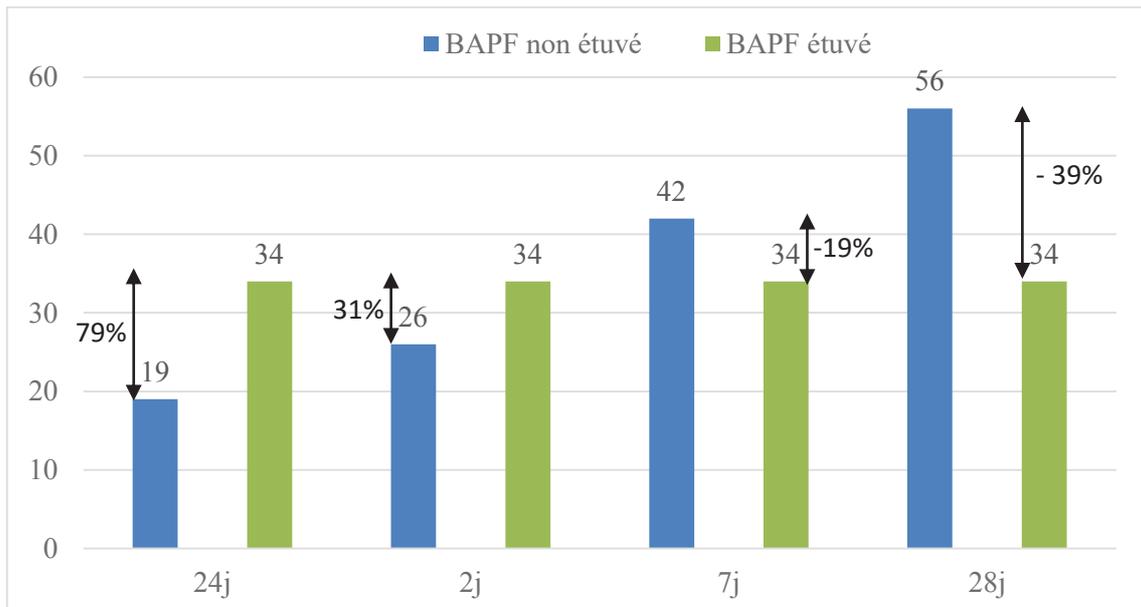


Figure. IV.26 : Gain ou Perte de résistance de BAPF étuvé à 24h avec BAPF non étuvé à différents âges.

- **Discussion des résultats :**

Pour toutes les compositions de BAP, nous remarquons une augmentation continue de la résistance à la compression et à la traction par fendage et à la flexion en fonction de l'âge (12h, 24h, 2, 7 et 28 jours) soit pour les BAP étuvés ou non étuvés. Cela est dû au phénomène d'hydratation de ciment qui provoque l'évolution de la compacité avec le temps.

Les résultats obtenus montrent que les BAP qui ont subi un traitement thermique présentent une meilleure résistance à la compression et à la traction par fendage et à la flexion à tous les âges (12h, 24h, 2, 7 et 28 jours), par rapport aux BAP qui n'ont pas subi de traitement thermique, ce qui est dû probablement à l'effet de la température sur le béton à l'état frais qui accélère les réactions d'hydratation surtout dans les premiers jours d'hydratation (court termes), le traitement thermique provoque une diminution de temps des trois périodes d'hydratation: la période dormante, la prise et enfin le durcissement.

À titre indicatif, le gain de résistance à la compression de béton avec fillers calcaires (BAPC) étuvé par rapport au béton non étuvé est de l'ordre de 86% à l'âge de 24 heures, puis diminue jusqu'à 41% à l'âge de 28 jours. Pour le béton (BAPF) il est de l'ordre de 79% à 24

heures puis diminue jusqu'à 39% à l'âge de 28 jours.

Pour les deux BAP avec fillers calcaire ou fumée de silice, le traitement thermique à l'âge de 24h après moulage, on a enregistré des résistances intéressantes qui sont supérieures à 25 MPa, ces résultats sont encourageants car ces valeurs des résistances sont équivalentes et similaires aux résistances mécaniques des BAP non étuvés à l'âge de 7 jours, ainsi que dans le cas des BAP utilisé comme béton précontraint (Relâchement des câbles précontraints après 24 heures) il est recommandé des résistances mécanique à la compression supérieures à 25MPa.

Ce qui est avantageux de point de vu durée des travaux, décoffrages avant 24heures pour les éléments préfabriqués.

Les mêmes constatations ont été signalées dans le cas des résistances à la traction par flexion et à la traction par fendage.

6.6. Comparaison entre les deux BAP étuvés :

Tableau. IV.29: Résistance à la compression entre les deux BAP étuvés.

Age (jours)	12h	24h	2j	7j	28j
BAPC étuvé (MPa)	25	28	32	42	50
BAPF étuvé (MPa)	30	34	38	47	60

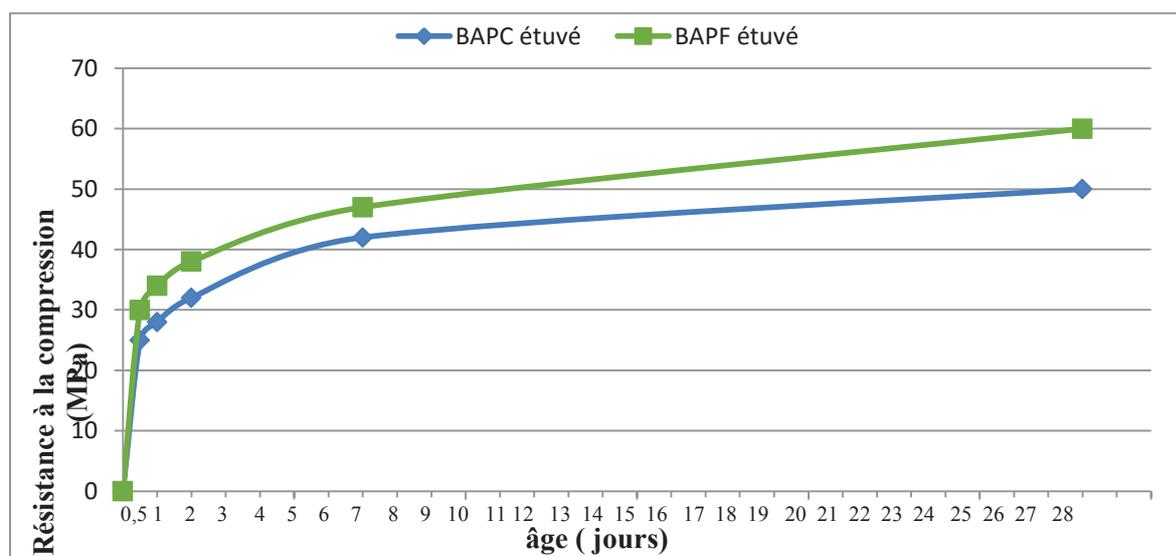
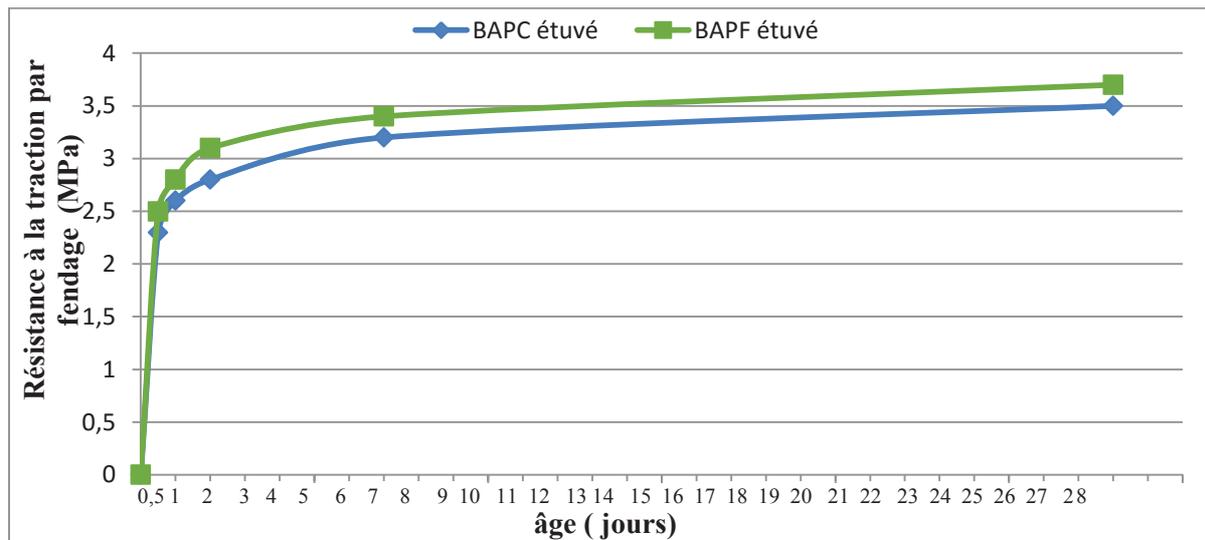


Figure. IV. 27 : Evolution de la résistance à la compression des BAPC et BAPF étuvés en fonction de l'âge.

Tableau. IV.30:Résistance à la traction par fendage entre les deux BAP étuvés.

Age (jours)	12h	24h	2j	7j	28j
BAPC étuvé (MPa)	2,3	2,6	2,8	3,2	3,5
BAPF étuvé (MPa)	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7

**Figure. IV.28 :** Evolution de la résistance à la traction par fendage des BAPC et BAPF étuvés en fonction de l'âge.**Tableau. IV.31:**Résistance à la traction par flexion entre les deux BAP étuvés.

Age (jours)	12h	24h	2j	7j	28j
BAPC étuvé (MPa)	5,2	5,4	5,8	6,6	7,8
BAPF étuvé (MPa)	5,7	6,1	6,5	7	8,2

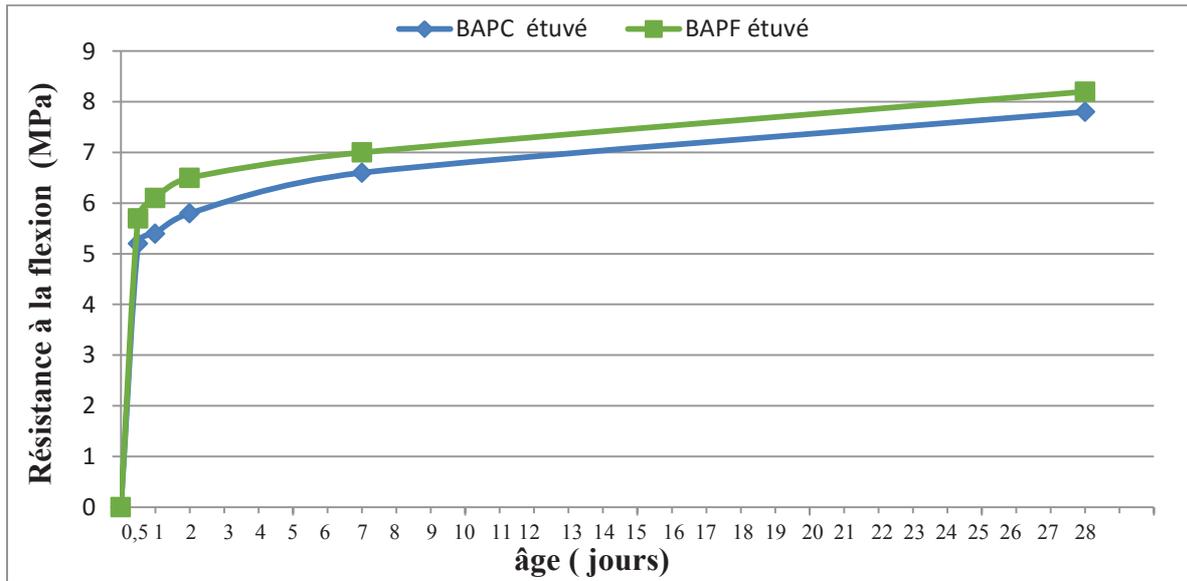


Figure. IV.29 : Evolution de la résistance à la traction par fendage des BAPC et BAPF étuvés en fonction de l'âge.

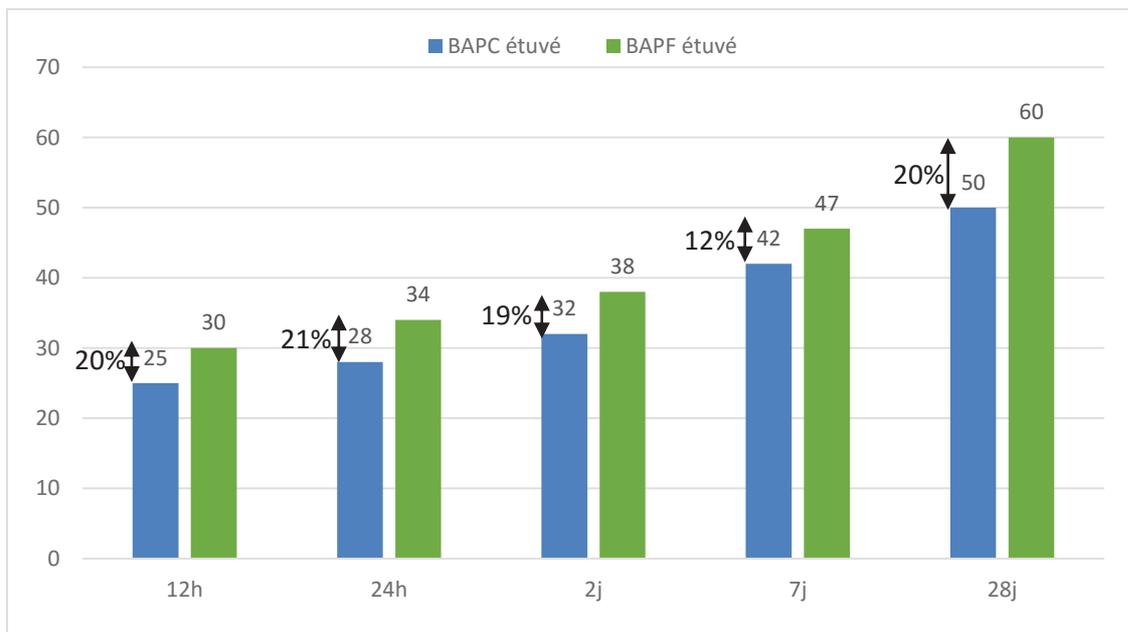


Figure. IV.30 : Gain de résistance de BAPF avec BAPC étuvés.

- **Discussion des résultats :**

En comparant les deux bétons étuvés à base de fillers calcaire et de fumée de silice, on remarque que le béton à base de fillers calcaire à tous les âges, présente des valeurs de résistance légèrement inférieures comparativement avec celles obtenus par le béton à base de fumée de silice (BAPF) soit à la flexion ou à la traction par fendage ou à la compression (de l'ordre de 20% à la compression). Cette différence est due principalement à la finesse élevée et à la propriété pouzzolanique de la fumée de silices, l'effet de cette dernière est double : un effet physique, par sa finesse élevée elle occupe les pores et les interstices entre les grains de ciment provoquant l'augmentation de la compacité de la matrice cimentaire et un effet chimique, ayant une structure amorphe qui en présence de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et l'eau donne naissance à des nouvelles formations (CSH et CAH), possédants des propriétés liantes analogues à celles formées à base des minéraux de ciment, ce qui explique les gains de résistance mécanique à jeune âge et à long terme.

Par contre dans le cas des BAP à base des fillers calcaire, ces dernières présentent une finesse près identique à celle du ciment, jouant par conséquent uniquement le rôle physique et remplissant les interstices de la matrice cimentaire.

Le travail sur lequel a porté notre étude a pour objectif d'étudier l'influence du traitement thermique sur les propriétés physique et mécanique de 2 BAP avec ajouts (filler calcaire, fumée de silice) les principaux résultats obtenus sont :

A travers notre recherche bibliographique nous avons étudié les différents BAP et leur formulation, ainsi que le traitement thermique de ceux. Par suite, nous avons déterminé le cycle de traitement thermique convenable et choisi la formulation adéquate des BAP selon la méthode japonaise.

Pour la partie pratique :

1. À l'état frais : nous avons déterminé les principaux critères de l'état frais :
 - a) Les 2 bétons élaborés BAPF et BAPC ont principalement la même masse volumique.
 - b) Les propriétés rhéologiques (étalement, boîte en L, stabilité au tamis) du BAPF sont légèrement supérieures à celle du BAPC. Donc les 2 BAP ont presque le même comportement rhéologique à l'état frais.

2. À l'état durci :

- a) Pour le cas BAPC avec étuvage :
 - À jeune âge (12h-7j) :

Une augmentation remarquable des résistances mécaniques (gain de résistance à la compression 86%).

- À long terme (7j-28j) :

On constate que les valeurs des résistances diminuent par rapport à l'état jeune.

- b) Pour le cas BAPC sans étuvage :

À jeune âge (24h-7j) :

Nous remarquons une évolution lente des résistances par rapport au long terme.

- c) Pour le cas BAPF étuvé :

- A l'état jeune (12h-7j) :

Nous remarquons une évolution rapide des résistances mécaniques (gain des résistances à la compression 76%).

- À long terme (7j-28j) :

Conclusion générale

On constate que les résistances mécaniques diminuent et se stabilisent.

d) Pour le cas BAPF sans étuvage :

- A l'état jeune (12h-7j) :

L'évolution est moins importante par rapport au BAPF étuvé.

On conclure que :

L'effet de l'ajout de fumée de silice (étuvé et non étuvé) est plus marqué sur les résistances mécaniques que celui de l'ajout de filler calcaire (étuvé et non étuvé).

Recommandation

Afin de compléter ce travail et de cerner de près les lois régissant les caractéristiques physicochimiques et mécaniques des bétons autoplaçants, nous suggérons les recommandations pratiques suivantes :

- De bien déterminer au préalable le point de saturation du superplastifiant avant son utilisation.
- L'utilisation d'un granulats propre avec une bonne granularité.
- Pour assurer des bonnes résistances mécaniques on utilise le ciment de la catégorie 52.5R.
- Nous souhaitons aussi que l'industrie cimentière respecte la composition chimique et minéralogique du ciment, Pour assurer la compatibilité ciment/superplastifiant.
- Nous utilisons le sable de Boussaâda comme sable correction parce que le module de finesse est petit par rapport au sable de oud souff.
- Bien respecter le cycle d'étuvage comme indiqué dans la partie pratique.
- Se pencher sur le côté économique en vue de réalisation d'un traitement thermique avec un minimum d'énergie dépensée.

Références Bibliographiques

- [1]. Bétons autoplaçants, recommandations provisoires Association Française de Génie Civil Juillet 2000.
- [2]. DREUX. G. «Nouveau guide du béton». Ed, Eyrolles, PARIS, (1998).
- [3]. NF P 18-591 (Sept. 1990) Granulats-Détermination de la propreté superficielle.
- [4]. NF P 18-598 (Oct. 1991) Granulats-Equivalent de sable.
- [5]. EN 197-1 (Fév. 2001) Ciment-composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants (indice de classement P 15-101-1).
- [6]. NF P 18-541(Août. 1994) Granulats-Granulats pour bétons hydraulique- Spécification.
- [7].ADAM. M. NEVILLE. « Propriétés des bétons ».
- [8]. A.C.I. Fall convention REVIEW journal Américain concrète institut 1974.
- [9].MOHAMMED SEDOK HADRICHE : « modélisation du comportement du béton autoplaçant, effet de la composition » U de Sherbrooke, décembre 1998
- [10]. Mémoire de Magister : «Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants», M. ABIB Zine Eddine, université HOUARI BOUMEDIENE USTHB .2004.
- [11]. Thèse de Mr.Benmounah : «Contribution à l'étude de l'influence des superplastifiants et des ajouts minéraux sur le comportement physicomécanique et rhéologique des bétons autoplaçants (BAP)», mémoire de fin d'étude 2015.
- [12]. L. Basheer, PAM Basheer, AE Long, Influence des agrégats grossiers sur thepermeation, la durabilité et les caractéristiques de la microstructure de cementconcrete Portland ordinaire, de la construction et des matériaux de construction, 19, 2005, p 682-690.
- [13]. T. Sedran. Les bétons autonivelants (BAN) – Synthèse bibliographique. Volume n° 196 of ref. 3889, pages 53–60. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Mars–Avril, 1995.
- [14]. Fiche de Ulrich Finsterwalder sur Structurae.
- [15]. Thèse de Mr.CHAID « Influence de la poudre de marbre sur les propriétés du béton » 2007-2008.
- [16]. SEAC Gf « La technologie béton : Choix et technique » 2eme édition, 2002.
- [17]. <http://www.efreyssinet-association.com/technique/betonprecontraint.php> [archive]
- [18]. <http://www.prensoland.com>, site internet d'information de la mouleuse PRENSOLAND, 2007.

[19] .Verbeck G.j. Helmuth R.H.<<structures and physical properties of cement pastes>> dans the cement association of japan(editeur) proceeding of the 5th international symposium on the chemistry of cement, tokyo (Japon),ppl-32,1968.

[20]. klur I. <<Etude par RMN de la structure des silicates de calciun hydratés>>Thèse de doctorat de l'université de paris VI ,1996.

[21]. Jalali s. Abyaneh M.Y.<<Prediction of final concrete strength in hot climates>> Magazine of concrete Research,(47-173),pp291-297,1995.

[22] Regourd M. Gautier E.<<Comportement des ciments soumis au durcissement accéléré>> dans durcissement accéléré des béton ,annles de l'ITBTP ,pp83-96 ,1997.