

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES



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

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie des matériaux

Option : Contrôle Qualité des Matériaux

THEME

**Valorisation des granulats recyclés de déchet des carreaux
faïence dans la formulation des bétons autoplaçants**

Réalisé Par :

FERGUENE HABIB

Sujet Proposé et suivi par :

Mr : GHERNOUTI .Y

Boumerdes

2016

Remerciements

Je remercie en premier lieu, le dieu tout puissant qui m'a donné la volonté et le courage pour réaliser ce modeste travail.

Je remercie vivement :

- Mon promoteur **Mr GHERNOUTI** pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail.
- Le chef de département de génie des matériaux **Mr DILMI**.
- L'ensemble des enseignants de département de génie des matériaux.
- Atout l'équipe du groupe «LNHC» d'OUED SMAR : Ami rezki, Belhadj, Mohamed, Mostapha et Amin.
- Enfin à toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué pour la réussite de mon travail.

DEDICACE



Je dédié ce modeste travail à :

A ma chère maman et à l'âme de mon papa, c'est grâce à eux que je suis aujourd'hui ici présent, qui m'ont aidé à terminer ce modeste travail.

✚ *Mes chers frères et sœurs.*

✚ *A Tous mes ami, et Tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail de près ou de loin.*

✚ *Tous les étudiant de département génie des matériaux, et plus particulièrement ceux de groupe MCQ 14.*



SOMMAIRE

CHAPITRE I : LE BETON AUTOPLACANT

I.1. Introduction	1
I.2. Définition	1
I.3. Classification des BAP	2
I.4. Concept du béton autoplaçant	2
I.5. Domaines d'utilisation privilégiés des BAP	4
I.6. Constituant du béton autoplaçant	4
I.6.1. Ciment	5
I.6.2. Granulats	7
I.6.3. sable.....	9
a. Origine des sables	9
b. Différents Types De Sable.....	9
I.6.4. Eau de gâchage.....	10
a. le rôle de l'eau	11
b. type de l'eau	11
I.6.5. l' adjuvants	11
I.6.5.1. Classification des adjuvants	11
a. Adjuvants modificateurs de la rhéologie du béton	11
b. Adjuvants modificateurs de prise et de durcissement	12
c. Autres catégories normalisées d'adjuvants.....	12
I.6.5.2. L'utilisation des adjuvants : on utilise les adjuvants sur tout pour :	12
I.6.5.3. Les superplastifiants.....	13
I.6.5.4. Différents types des superplastifiants.....	13
a. Les polyméamines sulfonées (PMS)	13
b. Les polyméamines sulfonées (PMS)	13
c. Les lignosulfonates (LS).....	14
d. Les superplastifiants de nouvelle génération.....	14
I.6.5.5. MODE d'action.....	15
I.6.6. Additions minérales	16
a. Filler calcaires.....	16
b. Les cendres volantes.....	17
c. Laitiers de hauts fourneaux.....	18
d. Fumées de silice	19

e. Pouzzolanes naturelles	19
I.7. Spécificité de la composition des bétons autoplaçant	19
a. Une quantité de fines importante	19
b. Un volume de pâte élevé	19
c. Utilisation de superplastifiant	20
d. Un faible volume de gravillon	20
e. Utilisation éventuelle rétenteur	20
I.8. caractérisation des BAP à l'état frais	20
I.8.1. Essai d'étalement (Slump Flow)	20
I.8.2. Essai de boîte en L	21
I.8.3. Essai de l'entonnoir	22
I.8.4. Essai de stabilité au tamis	23
I.8.5. Essai d'étalement modifié (J-Ring)	24
I.9. Caractérisation de BAP à l'état durci	24
I.9.1. Résistance à la compression	25
I.9.2. Résistance à la traction	25
I.9.3. Module d'élasticité	25
I.9.4. Le retrait	25
I.9.5. Le fluage	26
I.10. Les Approches de formulation Des BAP	26
I.10.1. Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers	26
I.10.2. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte	27
I.10.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire	27
I.10.4. Méthode basée sur le mode de compactage	28
I.11. Principe et application des approches	28
I.11.1. Approche Japonaise	28
a. Dosage des gravillons	28
b. Dosage du sable	29
c. Dosage du liant	29
d. Dosage de l'eau et du super plastifiant	29
I.11.2. Approche Suédoise	29
I.11.3. Approche Française	29
I.11.4. Autres méthodes	30
I.12. Les avantages des bétons autoplaçant	30

CHAPITRE II : RECYCLAGE DES DECHETS DANS LE DOMAINE DE CONSTRUCTION

II.1. Introduction.....	30
II.2. Définition du terme déchet	30
II.3. Origine de la production des déchets	30
II.4. Constitution chimique du déchet	31
II.5. Classification des déchets	31
II.5.1. Déchets ultimes	31
II.5.2. Déchets inertes	31
II.5.3. Déchets assimilés.....	32
II.5.4. Déchets organiques	32
II.5.5. Les déchets industriels banals (DIB)	32
II.5.6. Déchets dangereux.....	33
a. Déchets industriels spéciaux (DIS)	33
b. Déchets ménagers spéciaux (DMS)	33
II.6. Recyclage des déchets	33
II.6.1. Définition	33
II.6.2. Technique de recyclage	34
II.6.2.1. Procédés du recyclage.....	34
II.6.2.2. La chaîne du recyclage	34
a. Collecte de déchets	34
b. Transformation	35
c. Commercialisation et consommation	35
II.6.3. Impact du recyclage dans l'industrie	35
a. Source d'approvisionnement alternative	35
b. Création d'activités.....	35
c. Mise en conformité avec la loi :	36
d. Coût de main-d'œuvre :	36
e. Conséquences sur les produits issus du recyclage :	36
II.6.4. Impacts du recyclage sur l'environnement	37
II.7. Déchets utilisés comme granulats du béton.....	38
II.7.1. Déchet de faïence.....	38
II.7.2. Déchets de la démolition.....	39
II.7.3. Déchet de Pneus.....	39
II.7.4. Les déchet de brique	40
II.7.5. Déchet de Verre	41
II.7.6. Les déchets de chantier	42
II.7.7. Les déchets plastiques.....	43
II.7.8. Déchet de bois.....	44

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

III.1. Introduction	45
III.2. Caractéristiques des matériaux utilisés.....	45
III.3. ciment	45
III.4. Sable	47
III.5. graviers	53
III.4. Fillers calcaires :.....	59
III.5. L'adjuvant.....	60
III.6. Eau de gâchage	61

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DISCUSSIONS DE RESULTATS

IV.1. Introduction	61
IV.2. Formulation d'un BAP par la méthode japonaise	61
IV.3. Préparation des bétons autoplaçant	63
IV.4. Conservation des éprouvettes :.....	64
IV.5. Caractéristiques des bétons à l'état frais	65
1. Masse volumique.....	65
2. Essai au cône d'Abrams	66
3. Essai à la boîte en L	67
4. Essai de la stabilité au tamis	69
IV.6. Caractéristiques des bétons à l'état durci:	72
1. vitesse de propagation du son :.....	72
2. Résistances mécaniques à la compression et à la flexion :.....	74

LISTES DES FIGURES

Figure 01 : Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP	3
Figure 02 : la poudre du ciment portland	5
Figure 03 : Ciments utilisés dans la confection des bétons autoplaçant.....	7
Figure 04 : Choix de la granularité pour un BAP 0–16.....	8
Figure 05 : influence de superplastifiant sur le béton.....	13
Figure 06 : Différents types des superplastifiants.	14
Figure 07 : mode d'action des superplastifiants.	15
Figure 08 : Filler calcaires	17
Figure 09 : Cendre volantes.....	18
Figure 10 : le laitier du haut fourneau	18
Figure 11 : Pouzzolanes naturelles	19
Figure 12 : Essai d'étalement au cône d'Abrams.	21
Figure 13 : Schéma de la boîte en L.	22
Figure 14 : Essais des Entonnoirs.....	23
Figure 15 : Essai stabilité au tamis	24
Figure 16 : Essai d'étalement modifié.	24
Figure 17 : déchet de faïence.....	38
Figure 18 : Déchets de démolition.....	39
Figure 19 : Déchet de Pneus.....	40
Figure 20 : déchet de Brique	40
Figure 21 : déchet de verre	41
Figure 22 : Les déchets de chantier	42
Figure 23 : différent type de déchet plastique	43
Figure 24 : différent type de déchet de bois.....	44
Figure 25 : Granulats de déchet des carreaux faïence	52
Figure 26 : analyse granulométrique par tamisage NF P 18-560	58
Figure 27 : TEMPO 12	60
Figure 28 : Malaxeur de béton.....	64
Figure 29 : Préparation des éprouvettes	65
Figure 30 : Variation de la masse volumique des différents bétons.....	66
Figure 31: Essai d'étalement de BAP.....	66
Figure 32 : variation de l'étalement des différents bétons	67

Figure 33 : Essai de Boite en L	68
Figure 34 : variation de la mobilité des BAP mesurée par la boite en l	69
Figure 35 : L'essai de stabilité au tamis	70
Figure 36 : variation de la stabilité au tamis des différents bétons	70
Figure 37 : variation de la vitesse de son des différents bétons	73
Figure 38 : Vitesse de son dans un milieu poreux.....	74
Figure 39 : Vitesse de son dans un milieu compact	74
Figure 40 : hotte de surfacage	75
Figure 41 : Essai de compression axiale.....	76
Figure 42 : Eprouvette prismatiques pour essai de flexion	76
Figure 43 : Essai de flexion 3 points	77
Figure 44 : variation de la résistance à compression des différents bétons.....	78
Figure 45 : variation de la résistance à la traction des différents bétons	78
Figure 46 : Granulats recyclés de déchet des carreaux faïence	80
Figure 47 : Facettes de ruptures des BAP	81

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristique physiques du ciment CPJ 42.5 (ACC-M'sila).....	44
Tableau 2 : Caractéristique mécanique du ciment CPJ 42.5 (ACC-M'sila).....	45
Tableau 3 : Composition minéralogique du ciment CPJ 42.5 (ACC-M'sila)	45
Tableau 4 : Composition chimique du ciment CPJ 42.5 (ACC-M'sila).....	46
Tableau 5 : caractéristiques physiques de sable kh-meliana	46
Tableau 6 : Analyse granulométrique de sable de kh-meliana (NF P 18-560)	47
Tableau 7 : caractéristiques physiques de sable Boussaâda	48
Tableau 8 : Analyse granulométrique de sable Boussaâda (NF P 18-560)	48
Tableau 9 : caractéristique physique de sable corrigé	49
Tableau 10 : Analyse granulométrique de sable corrigé	50
Tableau 11 : caractéristiques physiques de de graviers naturels (3/8,8/15)	52
Tableau 12 : Analyse granulométrique de gravier (8/15).....	53
Tableau 13 : Analyse granulométrique de gravier (3/8).....	53
Tableau 14 : caractéristiques physiques de de graviers déchet faïence (3/8,8/15).....	55
Tableau 15: Analyse granulométrique du gravier 8/15 de déchet de faïence.....	55
Tableau 16 : Analyse granulométrique du gravier 3/8 de déchet de faïence.....	56
Tableau 17: Caractéristiques chimiques de filler calcaire	58
Tableau 18 : Caractéristique physique de filler calcaire	59
Tableau 19 : Caractéristiques physique de TEMPO 12.....	60
Tableau 20 : Composition pour 1m ³ de BAP	62
Tableau 21 : Masse volumique des différents types de BAP	65
Tableau 22 : Résultats d'étalement des différents types de BAP.....	67
Tableau 23 : Les résultats de mobilité mesurée par la boîte en L	69
Tableau 24 : Stabilité au tamis des différents types de BAP.....	70
Tableau 25 : résultats des essais à l'état frais des BAP	71
Tableau 26 : Vitesse de son des différents BAP.....	74
Tableau 27 : Résistance à la compression et à la flexion à 28 jours des BAP	78
Tableau 28 : Pertes des résistances à la compression et à la flexion à 28 jours des BAP	80

Résumé :

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de construction. Les granulats représentent 75% du son volume. L'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent de chercher de nouvelles sources et d'étudier la possibilité de substituer les granulats naturels par les déchets.

Ce travail de recherche met en évidence la possibilité d'utiliser les granulats recyclés de déchet des carreaux faïence dans le béton autoplaçant.

Plusieurs formulations de béton autoplaçant avec différents dosages en granulats recyclés en substituant 25%, 50% et 75% des granulats naturels, ont été étudiées à l'état frais pour estimer les propriétés : étalement, stabilité au tamis et boîte en L et à l'état durci pour estimer les propriétés mécaniques : résistance à la compression et résistance à la traction par flexion.

Ce travail montre l'intérêt majeur que pourrait avoir le développement et la mise à disposition des résultats expérimentaux concernant l'utilisation des granulats de déchet des carreaux faïence comme granulats recyclés dans les bétons autoplaçant. Les résultats obtenus sont encourageants, ce qui suggère une utilisation possible des granulats recyclés de déchet des carreaux faïence dans la formulation des bétons autoplaçant, et peut conduire à des nouveaux bétons avec des propriétés physico mécaniques satisfaisantes.

Mots clés : béton autoplaçant, Granulats, Recyclage, Valorisation, Environnement, carreaux faïence, déchet.

Introduction générale

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son faible prix de revient et les performances mécaniques et de durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser des ouvrages les plus divers, notamment des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires, etc.

Les bétons autoplaçant ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores [Okamura].

Les bétons autoplaçant (BAP) sont encore à l'heure actuelle qualifiés de nouveaux bétons car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement.

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles.

La production des granulats recyclés s'est développée au début des années 80, elle répond au besoin d'une autre source de granulats et de la réduction des volumes de déchets.

L'utilisation des granulats recyclés dans les bétons présente plusieurs avantages tant au niveau environnementale, humain, technologique et économique qui s'intéresse de plus en plus les industriels.

Les déchets peuvent être transformés en granulats recyclés pour être utilisés, en remblais de diverses natures, en couches de forme sur les chantiers des travaux publics ou encore en d'autre application dans le domaine de la construction, en particulier, comme granulats pour le béton.

L'objet principal de cette étude de recherche est de contribuer à la valorisation des granulats recyclés de déchet des carreaux faïence dans la fabrication du béton autoplaçant, cela permet donc :

- D'éliminer les déchets par recyclage d'où protection de l'environnement.
- Aider à résoudre certains problèmes liés au manque de granulats et en particulier à l'utilisation des granulats alluvionnaires.

Ce mémoire se subdivise en deux grandes parties : une partie bibliographique et une partie expérimentale.

La première partie relative à une synthèse bibliographique est constituée comme suite :

Chapitre 1 :

Généralités sur les bétons, les différents constituants du béton BAP et les méthodes de formulation.

Chapitre 2 :

Généralités sur le déchet, déchets inertes et granulats recyclés ainsi que leurs valorisation dans le domaine de construction.

La deuxième partie de ce travail, à son tour est divisée en deux chapitres :

Chapitre 3 :

Destiné à la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des matériaux utilisés pour la réalisation de la partie expérimentale.

Chapitre 4 :

Formulation des bétons autoplaçant à base des granulâtes recyclés de déchet des carreaux faïence et présente les résultats des essais sur le béton à l'état frais ainsi qu'à l'état durci, suivi par l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin notre travail est clôturée par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Le béton autoplaçant

I.1. Introduction

Un béton autoplaçant (BAP) est un béton fluide, très fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration, il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique.

Les bétons autoplaçant se caractérisent en général par une formulation contenant au moins un adjuvant chimique et un ajout minéral en proportion bien précis pour satisfaire les exigences en matière de maniabilité et de stabilité. Toutefois, L'utilisation de ces béton ne se répand que lentement à travers le monde, car leur formulation est inhabituelle et nécessite une le problème de la formulation des bétons c'est renouvelé en profondeur au cours des dernières décennies, principalement du fait de l'utilisation croissante et souvent conjointe des superplastifiant et des agents colloïdal d'une part et des additions minérales d'autre part.[1]

I.2. Définition

Le béton auto plaçant (dénommé aussi auto compactant) est défini comme suit dans l'Annexe nationale NA de la norme SN EN 206-1 :

Le béton frais est appelé autoplaçant lorsqu'il se compacte suffisamment grâce à son poids propre tout en ne présentant pas de ségrégation. Le BAP et le béton vibré se différencient par les propriétés du béton frais et le mode de mise en œuvre. [2]

Le béton auto compactant est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage).

Les propriétés caractéristiques de ce béton sont les suivantes :

- ✓ Fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation (comme du miel)
- ✓ désaération du béton pendant son écoulement
- ✓ excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de réservations, d'incorporés et de ferrailage dense. Le dispendieux et fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé. [3]

I.3. Classification des BAP

La notion de classification des BAP est apparue tardivement et constitue pourtant un paramètre essentiel du développement de ces bétons.

A l'origine, la formulation de BAP, imaginée par les Japonais (et, plus particulièrement, le professeur Okamura à la fin des années 1980), est conçue pour réaliser des ouvrages des génies civil, à forte densité d'armatures, pour lesquels des anomalies des mises en œuvre étaient redoutées. Aujourd'hui, et plus particulièrement en Europe, l'utilisation des BAP se développe dans le domaine de la préfabrication et dans celui du béton de bâtiment coulé en place, nécessitant des formulations de BAP différentes : pour le bâtiment elles doivent être moins performantes techniquement (en termes de caractéristiques mécaniques à 28 jours et de qualités d'ouvrabilité) et plus économiques.

Par contre, la problématique spécifique de la capacité à donner de beaux parements est à prendre en compte pour les applications verticales.

On distingue donc aujourd'hui, en France (conformément aux recommandations pour édictées par l'AFGC et le PN BAP), trois catégories :

- **Catégorie 1** : il s'agit des ouvrages horizontaux de faible épaisseur (planchers, dallages) pour lesquels le ferrailage est léger et le béton peut être facilement réparti sur toute la surface.
- **Catégorie 2** : elle couvre les ouvrages horizontaux épais pour lesquels les risques de ségrégation statique sont importants, et les ouvrages verticaux courants (on exclut le cas des ouvrages à très forte densité de ferrailage).
- **Catégorie 3** : ce sont les ouvrages exigus ou très fortement ferrillés (pour lesquels l'écoulement du béton dans le coffrage est le plus difficile).

A chaque catégorie correspondent des spécifications particulières pour le BAP à l'état frais, définies ci-après. [4]

I.4. Concept du béton auto plaçant

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 compactant ("self-compacting concrete", traduit par béton autoplaçant 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.

Les bétons autoplaçant (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique). Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

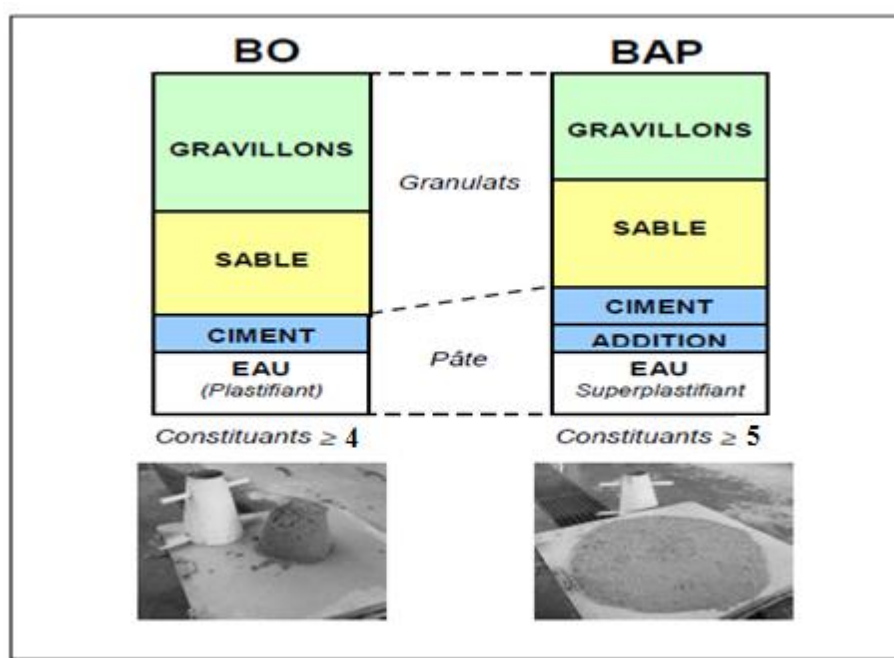


Figure 01 : Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [5]

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 polycarboxylates, 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 de 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'autoplaçant, 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. [5]

I.5. Domaines d'utilisation privilégiés des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant:

- des densités de ferrailage importantes ;
- des formes et des géométries complexes : voiles courbes, etc. ;
- des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, etc. ;
- des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
- des exigences architecturales et de qualité des parements particulières ;
- des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration. [6]

I.6. Constituant du béton autoplaçant

La qualité du béton dépend de la qualité de la pâte et du granulat, ainsi que de celle du lien qui les unit. Dans du béton bien constitué, chaque particule de granulat est complètement enrobée de pâte et tous les espaces entre les particules sont complètement remplis de pâte.

Pour toute combinaison de matériaux et de conditions de cure, la qualité du béton durci dépend dans une large mesure de la quantité d'eau utilisée par rapport à celle du ciment. Une teneur en eau élevée dilue la pâte (la colle du béton). La réduction de la quantité d'eau présente les avantages suivants :

- Augmentation de la résistance en compression et en flexion.
- Réduction de la perméabilité, donc augmentation de l'étanchéité et diminution de l'absorption.
- Résistance accrue aux agents atmosphériques.
- Amélioration de l'adhésion entre les couches successives et entre le béton et l'armature.
- Réduction des tendances à la fissuration causée par le retrait.
- Réduction des variations de volume imputables au mouillage et au séchage.

I.6.1. Ciment

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui est gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction et processus d'hydratation et qui, après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Il est principalement composé de calcaire et d'argile.

Le ciment joue le rôle de liant dans le béton hydraulique. Il est lui-même composé de clinker additionné de gypse (3 à 5 %), et éventuellement pour les ciments composés, d'autre constituants secondaire, tel que, le laitier de haut fourneau : un résidu minéral issu de la préparation de la fonte à partir du minerai de fer du coke métallurgique, de cendre volantes ou de fillers calcaires (granulats fins obtenus par broyage de roches). [7]



Figure 02 : la poudre du ciment portland

✓ **Les différents types de ciment :**

La normalisation des ciments (NF EN 197-1) distingue cinq types de ciments courants :

➤ **les ciments portlands : CEM I**

Ces ciments contiennent au moins 95 % de clinker.

➤ **les ciments portlands composés : CEM II**

On distingue deux catégories de CEM II :

- les CEM II/A qui contiennent plus de 80 % de clinker et moins de 20 % de constituants secondaires ;
- les CEM II/B dont les valeurs sont respectivement plus de 65 % de clinker et moins de 35 % de constituants secondaires.

➤ **les ciments de hauts fourneaux : CEM III**

Ces ciments sont subdivisés en trois catégories selon leur teneur en laitier : les CEM III/A (de 36 à 65 % de laitier), les CEM III/B (de 66 à 80 % de laitier) et les CEM III/C (de 81 à 95 % de laitier).

Le reste des constituants est du clinker avec éventuellement un filler dans la limite de 5 % de l'ensemble des constituants.

➤ **les ciments pouzzolaniques : CEM IV**

On distingue également deux catégories :

- les CEM IV/A qui contiennent plus de 65 à 90 % de clinker ;
- les CEM IV/B dont la valeur est de 45 à 64 % de clinker.

Le reste des constituants sont des ajouts pouzzolaniques avec éventuellement un filler dans la limite de 5 %. Les ajouts pouzzolaniques peuvent être des fumées de silice, des pouzzolanes naturelles et des cendres volantes siliceuses.

➤ **les ciments au laitier et aux cendres : CEM V**

Ils sont subdivisés en deux catégories selon leur teneur en laitier de haut fourneau et de pouzzolanes naturelles ou de cendres volantes siliceuses : les CEM V/A (de 18 à 30 %) et les CEM V/B (de 31 à 50 %). [8]



Figure 03 : Ciments utilisés dans la confection des bétons autoplaçant [8]

I.6.2. Granulats :

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage. Ces matériaux sont quelques fois encore appelés « agrégats ». Vieil usage tout à fait impropres, en effet le dictionnaire donne la définition suivante :

-Agrégat : Réunion des substances diverses formant un tout non homogène. Le béton, par exemple est un agrégat de gravier sable et ciment, ce dernier jouant le rôle de matière d'agrégation.

Les spécifications auxquelles doivent satisfaire les granulats sont précises dans la norme XP P 18 -540 d'octobre 1997 qui remplace les normes P18-101 de décembre 1990 et P18-541 de mai 1994. Cette norme regroupe les caractéristiques qui doivent présenter en général les granulats destinés à la confection du béton hydraulique.

Les granulats sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacune d'elles :

La catégorie A : correspond aux granulats destinés à la confection du béton de qualité tels que ceux destinés à la construction d'ouvrages d'art ou de bâtiments pour lesquels la résistance caractéristique RC est supérieure ou égale à 35 MPA ; éventuellement certaines caractéristiques des catégories B ou C étant tolérées.

La catégorie B : sont destinés à de bons bétons ainsi qu'à ceux pouvant être situés dans un environnement agressif, à condition que leur coefficient d'absorption respectent les spécifications imposées aux granulats de catégorie A.

la catégorie C et D : conviennent pour les bétons courants à condition, dans le cas d'utilisation de granulat D, que seuls deux (2) de leurs caractéristiques soient présentées et que les autres correspondent à celle de catégories supérieures, faute de quoi ils ne doivent pas être utilisés dans la courante confection de béton.

Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment. [9]

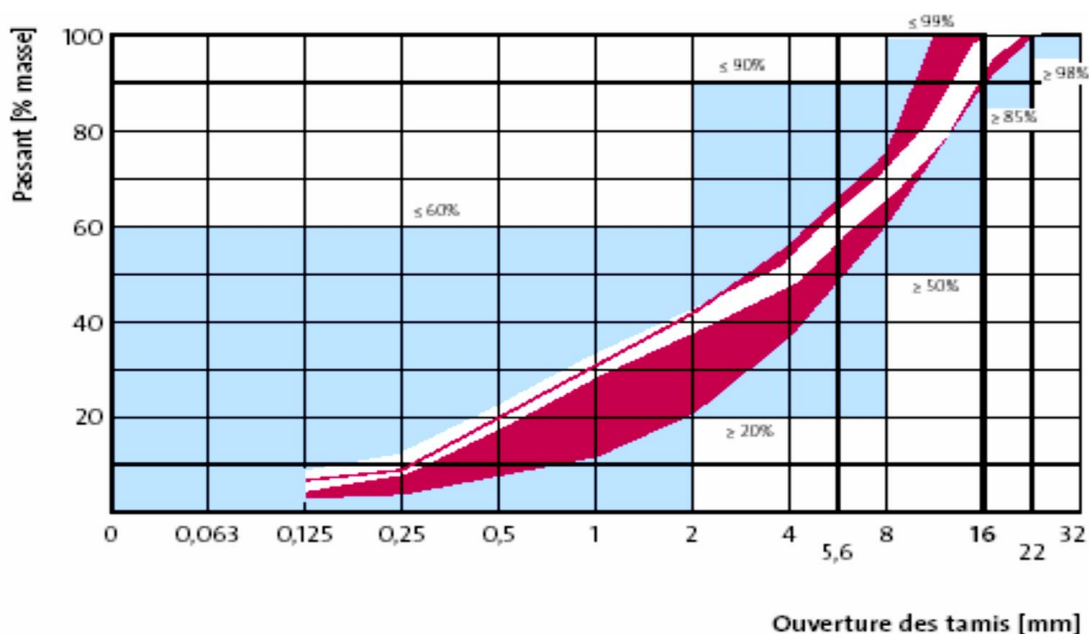


Figure 04 : Choix de la granularité pour un BAP 0-16 [9]

Remarque :

- ❖ En bleu, valeurs limites absolues selon SN EN 12 620.
- ❖ En rouge, fuseau conseillé Pour béton vibré.
- ❖ Le fuseau optimal pour BAP est indiqué en blanc.

I.6.3. sable

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80µm et 05mm ; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce matériau dont le diamètre maximal est inférieur à 6.3mm et dont le passant à 80µm n'excède pas 30%.

Dans le sens le plus courant, on entend par « sable » les éléments de dimension 0 à 5mm, non compris les fillers. [9]

a. Origine des sables

Les sables rencontrés sont le résultat d'une décomposition chimique ou d'une désintégration mécanique des roches suivies par un processus de transport qui est à l'origine de leurs caractéristiques physico-chimiques; Les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation. Ils comportent, à des degrés divers une décomposition sur place des différentes roches, suivie d'un transport fluvial et parfois éolien. [9]

b. Différents Types De Sable

➤ Sable d'origine naturelle

Le sable est une roche sédimentaire meuble, constituée principalement de quartz, provenant de la désagrégation des roches sous l'action de divers agents d'érosion et de cours d'eau. Les plus gros grains de sable se retrouvent ainsi le long des cours d'eau, aux bords des mers, ou dans les régions désertiques. En milieu fluvial, les grains s'usent peu et restent donc gros et anguleux. En milieu continental, l'usure des grains de sable par le vent et l'eau entraîne une modification de leur forme (ou morphologie) au cours des temps géologiques : les grains de sable usés deviennent émoussés et luisants (milieu littoral), ou l'altération des roches riches en quartz (granites, gneiss) sous l'action de processus physiques (vent, eaux courantes) ou chimiques (action dissolvante de l'eau).

Les grains de sable qui se forment sont généralement gros et anguleux, difficilement transportables par le vent et les ronds et mats (milieu éolien). En s'arrondissant, les grains deviennent plus petits. Les sables peuvent également se consolider et se cimenter ultérieurement pour donner naissance à des grès (grès quartzeux, grès calcaires). Ce type de sables est principalement constitué de quartz (silice), avec de faibles proportions de mica, de feldspath et de magnétite. La couleur du sable est d'autant plus claire que la teneur en silice est élevée.

Les sables sont toujours définis en fonction des constituants majoritaires : on parle ainsi de sable quartzeux, feldspathique, ferrugineux, micacé, calcaire, ou encore de sable coquillier. Toutefois, dans le langage courant, le sable est généralement associé au sable quartzeux. [9]

➤ **Sables non alluvionnaires (sable de dune)**

Il s'agit essentiellement de sables anciens, c'est-à-dire de dépôts détritiques déposés à des périodes géologiques variées, à des distances plus ou moins grandes des rivages. En fonction des conditions paléogéographiques, ces dépôts ont été plus ou moins brassés par les courants et recouverts par d'autres formations sédimentaires et se retrouvent actuellement émergés sur des étendues variables et des épaisseurs également très diverses. De façon générale, ces dépôts constituent cependant des gisements beaucoup plus étendus et généralement plus épais que les dépôts alluviaux.

La plupart de ces sables ont actuellement des utilisations soit limitées (essentiellement remblais et couches de forme, parfois granulats pour couche de fondation), soit très spécialisées (sables de verrerie et de fonderie, bétons de type cellulaire). [9]

➤ **Sable d'origine artificielle**

Provient de concassage des roches naturelles comme le calcaire, ou artificielle (pouzzolane); dit aussi sable concassés, caractérisées par une meilleure adhérence agrégat/liant.

Ce sont des matériaux produits dans une chaîne d'élaboration de granulats, et qui peuvent se trouver en excédent pour la production recherchée (gravier ou gravillon), ils peuvent être soit :

- Des sables roulés de dessablage qui résultent du criblage primaire d'un tout-venant.
- Des sables de concassage qui sont très souvent l'excédent de la production d'une carrière ou d'une ballastière caractérisées par une meilleure adhérence agrégat/liant. [9]

I.6.4. Eau de gâchage

L'eau est l'un des ingrédients des bétons, on pourrait même dire qu'il est le plus important avec le ciment. En effet, l'eau que l'on introduit dans le béton lors du gâchage accomplit deux fonctions : une fonction physique qui confère au béton les propriétés rhéologiques d'un liquide, et une fonction chimique qu'elle contribue au développement de réaction dite : hydratation. Pour le gâchage du mélange de béton on utilise de l'eau qui ne doit pas contenir des composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats et les autres, et aussi éviter des les particules en suspensions dont la qualité pourrait modifier ses qualités originales.

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher de béton parce qu'elles contiennent dans certains cas un excès d'impuretés qui détériorent les propriétés du béton, notamment les propriétés physique et mécanique (prise et résistance), les propriétés esthétiques (taches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures, stabilité de béton) ces impuretés éventuellement contenue dans l'eau de gâchage, soit des composés chimiques qui peuvent être actifs. [10]

a. le rôle de l'eau

L'eau est certainement le constituant des bétons le plus délicat à aborder .En effet, elle agit d'une façon antinomique sur deux propriétés essentielle qui sont :la consistance et la résistance .l'excès d'eau qui ne sera pas liée à hydratation ,créera au sein du matériau d'espace vide ou partiellement rempli d'eau qui affectera directement les performances .l'eau est indispensable pour obtenir une bonne consistance ,plus le dosage en eau est important plus l'écoulement du béton est facile ,il s'agit donc de trouver un dosage en eau optimal qui permet de satisfaire aux exigences sur les principales propriétés du béton.[11]

b. type de l'eau

L'origine des eaux de gâchage peut être extrêmement variée .La plus disponible est aussi celle qui sert de référence, c'est l'eau potable distribuée par le réseau de service public, les autres eaux les plus utilisées sont les eaux de pompage en provenance de nappe de cours d'eau ou de réservoir. [11]

I.6.5. ADJUVANTS

Selon la norme **NF EN 934-2** Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques, incorporés en faible quantité moins de 5% de la masse du ciment sous forme de poudre ou de solution, avant ou pendant le malaxage, dans le but de modifier certaines propriétés du béton, qu'il soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement ou à l'état durci .[12]

I.6.5.1. Classification des adjuvants

a. Adjuvants modificateurs de la rhéologie du béton

- Plastifiants / Réducteurs d'eau
- Superplastifiants/ Haut réducteur d'eau
- Plastifiant / Réducteurs d'eau / réducteurs d'eau
- Superplastifiants/ Haut réducteurs d'eau/ Retardateur de prise
- Superplastifiants/ Haut réducteurs d'eau / Accélérateur prise [18]

b. Adjuvants modificateurs de prise et de durcissement

- Accélérateurs de prise
- Accélérateurs de durcissement
- Retardateurs de prise [18]

c. Autres catégories normalisées d'adjuvants

- Hydrofuges de masse
- Entraîneur d'air
- Rétenteurs d'eau [16]

I.6.5.2. L'utilisation des adjuvants : on utilise les adjuvants surtout pour :

- Diminuer le coût des constructions en béton.
- Donner au béton certaines caractéristiques plus efficacement que par d'autres moyens.
- Assurer la qualité du béton durant le malaxage, le transport, la mise en place et cure dans des conditions météorologiques défavorables.
- Obvier à certaines urgences durant le bétonnage. [17]

Il ne faut cependant pas oublier qu'aucun adjuvant, en quelque quantité que ce soit, ne saurait remplacer une bonne technique de bétonnage.

L'efficacité d'un adjuvant dépend de facteurs tels que le type, le dosage en liants, la teneur en eau, la forme, la granulométrie et les proportions des granulats, le temps de malaxage, l'affaissement et les températures du béton.

Dans le cas des **BAP**, les adjuvants les plus utilisés sont les superplastifiants.

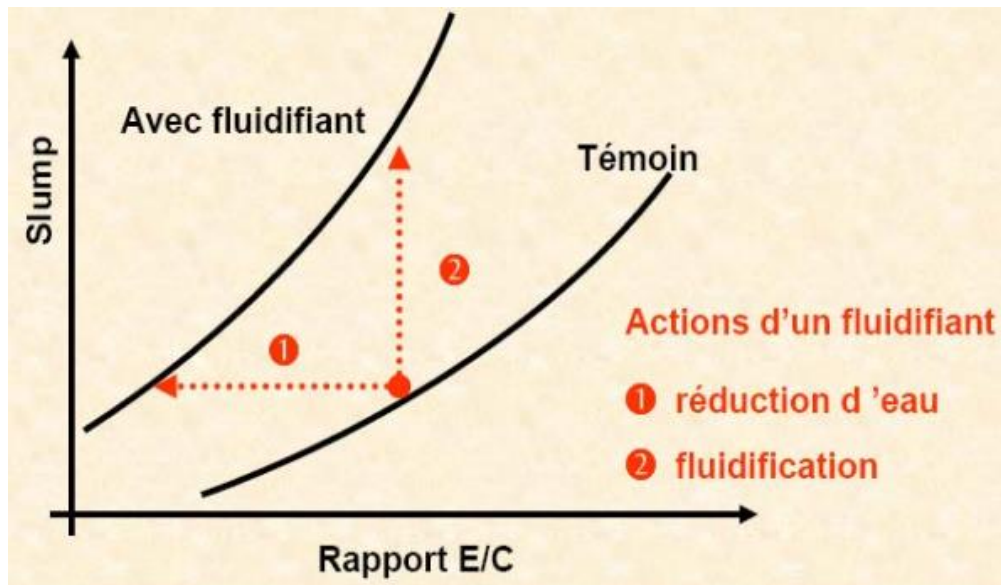


Figure 05 : influence de superplastifiant sur le béton

[18]

I.6.5.3. Les superplastifiants

Selon la norme **NA 744**, un superplastifiants est un adjuvant qui, introduit dans un béton, un mortier ou coulis, a pour fonction principale de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange. [18]

I.6.5.4. Différents types des superplastifiants

a. Les polyméamines sulfonées (PMS)

Appartiennent à la catégorie des superplastifiants/réducteurs d'eau. Ils sont efficaces pour des températures inférieures à 85°C à cause d'une stabilité chimique limitée. Ils ne sont pas entraîneurs d'air. Ils ne posent pas de problème de teinte et sont préférés aux PNS pour des résistances aux jeunes âges. [18]

b. Les Poly naphthalènes sulfonâtes (PNS)

Sont d'une efficacité dispersante très liée à la nature du ciment. Ils sont un peu plus retardateurs que les PMS et sont légèrement entraîneur d'air. [18]

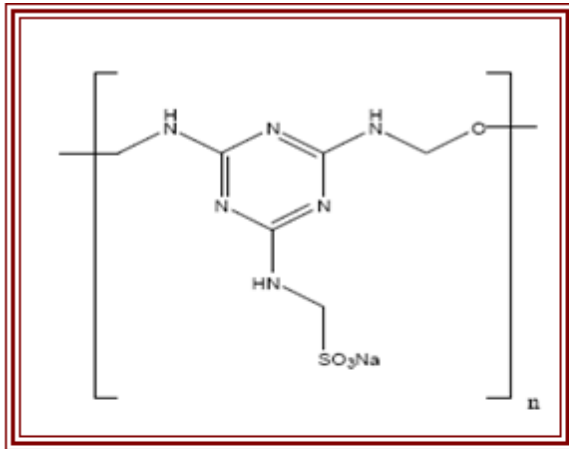
c. Les lignosulfonates (LS)

Sont moins efficaces que les PNS et PMS. Ce sont des produits fabriqués à partir de dérivés de l'industrie de la pâte à papier. Ces produits sont bien souvent impurs : ils contiennent des sucres qui sont responsables de l'effet retardateur. [18]

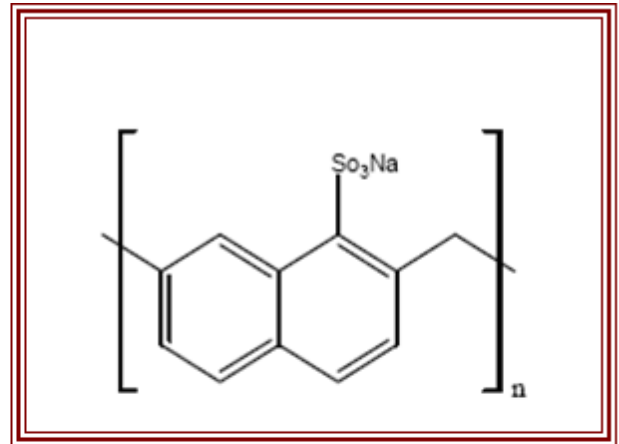
d. Les superplastifiants de nouvelle génération

Sont constitués de polymères à base de polyoxyde d'éthylène. Ce sont les polycarboxylates ou polyacrylates ou encore phosphonates polyoxyde d'éthylène

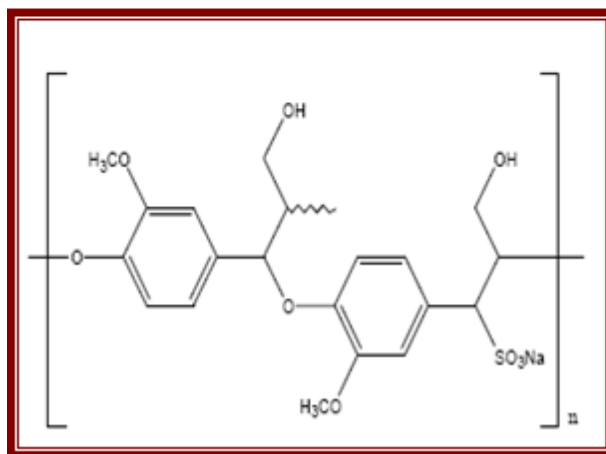
Les superplastifiants les plus utilisés sont les PMS et les PNS. Ce sont des polymères anioniques avec des groupes sulfonates SO_3^- à intervalles réguliers. [18]



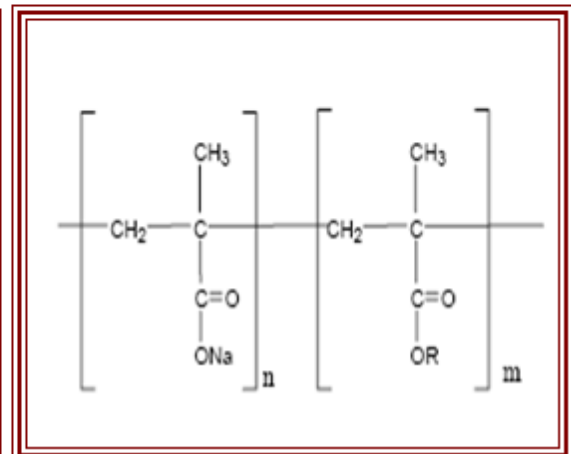
PMS



PNS



LS



Nouvelle génération

Figure 06 : Différents types des superplastifiants
[36]

I.6.5.5. MODE d'action

L'action d'un superplastifiant passe nécessairement par son adsorption sur les particules de ciment. En se fixant sur les grains de ciment, modifie la nature des charges électriques.

Les grains de ciment ont alors tendance à s'éloigner les uns des autres du fait qu'ils ont tous la même charge et s'entourent d'un film d'eau très mince. Ainsi on obtient un grain de fluidité, puisque les grains de ciment sont mieux dispersés. L'eau existante sert alors de fluidifier le béton. Dans certains cas, l'ajout du superplastifiant est directement additionné dans toupie du camion afin d'éviter une perte de fluidité pendant le trajet. Le superplastifiants est ajouté dans le béton puis malaxé pendant 3 minutes dans la toupie à vitesse maximum.

Il ne faut pas aussi négliger le temps de murissement d'un béton. Cette étape est aussi importante que la confection du béton lui-même. Nous verrons plus loin les moyens et les méthodes utilisés pour la protection des bétons frais. [13]

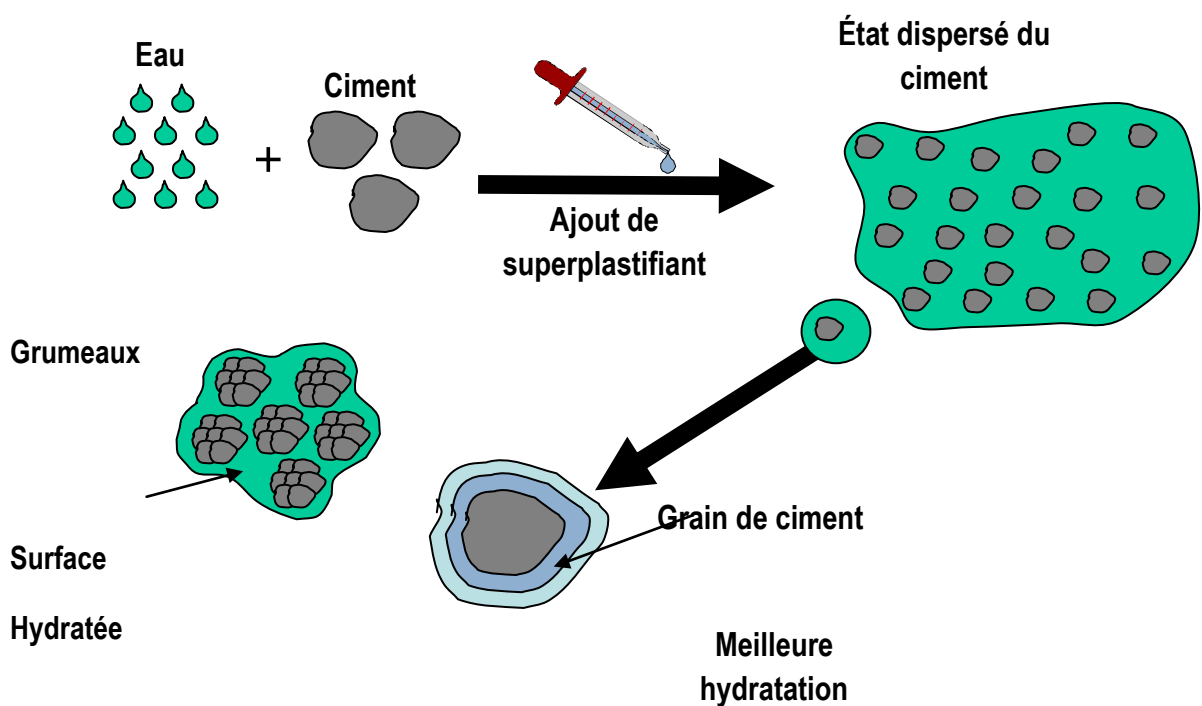


Figure 07 : mode d'action des superplastifiants
[13]

I.6.6. Additions minérales

Différentes additions minérales peuvent être ajoutées au béton, substituant ou non une partie du ciment, afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou de lui conférer des propriétés particulières. Ce sont des matériaux finement divisés parmi lesquelles nous citons les fillers, la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau qui proviennent principalement de l'industrie. Ces fines présentent plusieurs avantages dans l'industrie et la formulation des bétons.

a. Filler calcaires

Les fillers de calcaire sont des produits secs, très fins, issus du broyage, du sciage, de la taille ou du travail de la roche calcaire naturelle. Ils se présentent sous forme de poudres non abrasives. La dimension maximale des grains, déterminé conformément à la norme EN933-10 doit être inférieure à 2 mm .Le passant au tamis de 63 μm doit, pour sa part, être supérieur à 70%. Leur surface spécifique est généralement proche de celle du ciment. Les fillers calcaires ne réagissent pas ou peu chimiquement avec les composants du ciment ou l'eau de gâchage. Quand ils sont ajoutés aux matériaux cimentaire, ils constituent un lieu de nucléation et de germination pour les hydrates. En France, ces fillers calcaires sont beaucoup utilisés dans la fabrication des ciments composés (CEMII/A OU B-L), mais ils peuvent aussi être directement incorporés lors de la fabrication des bétons, notamment des bétons autoplaçant. [19]



Figure 08 : Filler calcaires [19]

➤ Effet des Fillers calcaire

Les fillers confèrent aux bétons autoplaçant les propriétés suivantes Agissant principalement grâce à une granulométrie appropriée par leurs propriétés Physiques sur certaines qualités du ciment.

- Accroissement de la maniabilité.
- Diminution de la perméabilité et de la capillarité.
- Réduction de la fissuration.
- Limite le ressuage.
- Augmente la cohésion.
- Facilite le démoulage immédiat.
- Amélioration de la stabilité du béton mais un réducteur d'eau est nécessaire Pour compenser l'eau de mouillage supplémentaire.

b. Les cendres volantes

Le remplacement d'une partie du ciment par des volantes a un faible influence sur le seuil et la viscosité des pâtes de ciment .Certains auteurs remarque cependant que leur utilisation peut améliorer la fluidité ,car leur forme sphérique permet de réduire les frottements entre les grains de ciment .ferrais et al .Montre par ailleurs que le diamètre moyen des cendres volantes a une légère influence sur la valeur de seuil d'écoulement ,les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines (diamètre moyen $3,1\mu\text{m}$).Associées à un super plastifiant ,les cendre volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire à l'obtention d'une certaine fluidité. [19]



Figure 09 : Cendre volantes [19]

c. Laitiers de hauts fourneaux

Comme étant un ajout de gain de matériaux (ciment), le laitier de haut fourneau permet globalement de réduire le seuil et la viscosité des pâtes de ciment .Shi et al. Montrent par exemple que les laitiers de haut fourneau absorbent le super plastifiant .IL est donc possible que la demande en super plastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou une valeur de seuil.



Figure 10 : le laitier du haut fourneau [19]

d. Fumées de silice

L'influence des fumées de silice doit être clarifiée .elles augmentent les valeurs de seuil et de viscosité en augmentant la compacité des mélanges, ferraris et al. Montrent que l'utilisation de fumées de silice augmente la demande en eau et en super plastifiant que ce soit des pâtes de ciment ou pour des bétons. [19]

e. Pouzzolanes naturelles

La pouzzolane est un matériaux 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 pour former des composés possédant des propriétés liantes. [19]



Figure 11 : Pouzzolanes naturelles [19]

I.7. Spécificité de la composition des bétons autoplaçant

a. Une quantité de fines importante

Les compositions des bétons autoplaçant comportent une importante quantité de fines environ de 500 kg/m^3 de diamètre inférieur à $63\mu\text{m}$ pour assurer la maniabilité et limite les risques de ressuage et ségrégation. Les liant utilisé est fréquemment un mélange de deux ou trois constituants, afin d'éviter l'élévation de température du béton lors de la prise du béton.

b. Un volume de pâte élevé

Le rôle de la pâte (ciment + eau + air occlus + addition) en plus de son caractère liant, est d'écart les granulats afin de diminuer les frottements qui provoquent la limitation vis à vis de l'étalement du béton et le remplissage des coffrages. [23]

c. Utilisation de superplastifiant

Les propriétés rhéologiques des BAP s'améliorent en ajoutant des superplastifiants. Leur teneur ne doit être trop élevée (dosage proche de celui de la saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis du problème de ségrégation et de ressuage.

d. Un faible volume de gravillon

Les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec l'augmentation des teneurs en gros granulats. Les BAP peuvent être réalisés avec des granulats roulés ou concassés, le diamètre maximal des gravillons dans un BAP étant compris entre 10 et 20mm. le rapport gravillon/sable est voisin ($G/S=1$).

e. Utilisation éventuelle rétenteur

Ce sont généralement des dérivés, celluloses, des suspensions colloïdales, qui augmentent la viscosité de l'eau. ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse, visqueuse et en conservent une répartition homogène des différents constituants. [14]

I.8. caractérisation des BAP à l'état frais

Plusieurs essais de caractérisation ont été préconisés en l'an 2000 par l'Association française de génie civil. D'abord provisoires, ces recommandations sont devenues sur site les essais de référence pour valider une formule de BAP. [20]

I.8.1. Essai d'étalement (Slump Flow)

C'est un essai utilisé pour estimer la fluidité des BAP sans confinement. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (Figure 15). Le béton est introduit dans le cône sans compaction.

On mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute. Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai est très facile à réaliser en chantier et ne nécessite qu'un petit échantillon (6 litres) de béton. [20]

Il est à noter que les recommandations internationales classent les BAP en trois catégories selon la valeur de l'étalement (SF : Slump Flow) et les applications correspondantes [EFNARC 2002]:

- SF1 (550 - 650 millimètres) est approprié pour les structures en béton non renforcées,
- SF2 (660 - 750 millimètres) convient aux applications courantes (murs, colonnes),
- SF3 (760 - 850 millimètres) est employé pour des applications verticales en structures très encombrées, structures avec des formes complexes. [21]



Figure 12 : Essai d'étalement au cône d'Abrams [21]

I.8.2. Essai de boîte en L

La procédure d'essai dans la boîte en L est la suivante : la partie verticale de la boîte est remplie de béton. Ensuite le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer au travers d'un grillage, formé de 3 barres d'armature $\varnothing$ 14 mm distantes de 39 mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale.

Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton (h_1 et h_2), afin de qualifier sa capacité d'auto nivellement. Le rapport h_2/h_1 devrait être supérieur à 0,80. L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini. [20]

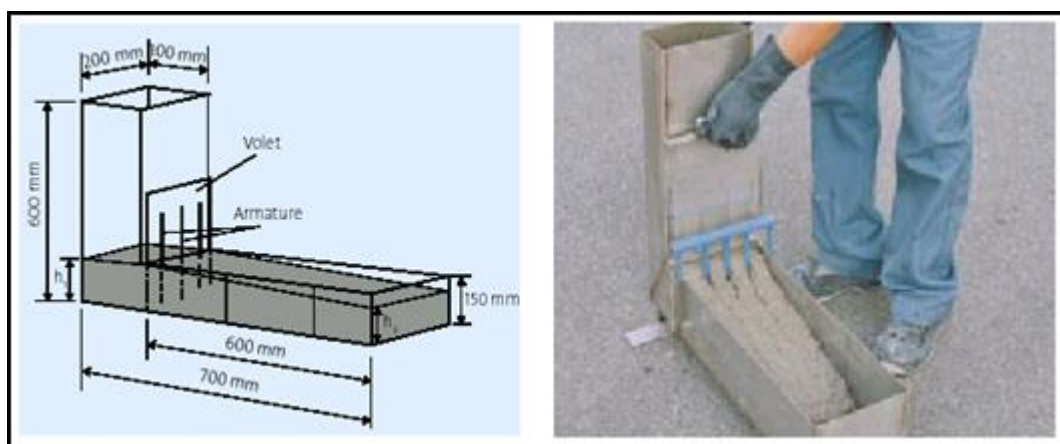


Figure 13 : Schéma de la boîte en L [20]

I.8.3. Essai de l'entonnoir

L'essai d'écoulement à l'entonnoir (ou Vfunnel test) est utilisé pour évaluer la fluidité et la viscosité des BAP.

Un entonnoir de dimensions définies est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert. On mesure le temps (T_v) que met le béton à sortir de l'entonnoir jusqu'à ce que cet entonnoir soit entièrement vide.

Ce temps d'écoulement, qui doit être compris entre 8 et 14 secondes, caractérise la viscosité du béton. Si le béton s'écoule plus rapidement, c'est que sa viscosité est trop faible.

Bien que l'essai soit conçu pour mesurer la fluidité, le résultat est affecté par d'autres propriétés du BAP que celle de l'écoulement. La forme de cône inversée fera bloquer l'écoulement du béton si, par exemple il y a trop gros granulats. Par contre un temps élevé d'écoulement peut être associé à une faible déformabilité due à une viscosité élevée de la pâte et ou un frottement inter granulaire élevé.

L'EFNARC [EFNARC 2005] définit deux classes de viscosité selon le temps d'écoulement mesuré à l'entonnoir (V-funnel) : $T_v \leq 6$ secondes, pour une bonne capacité de remplissage même avec des renforts denses et $9 \leq T_v \leq 25$ pour les autres cas. [20]

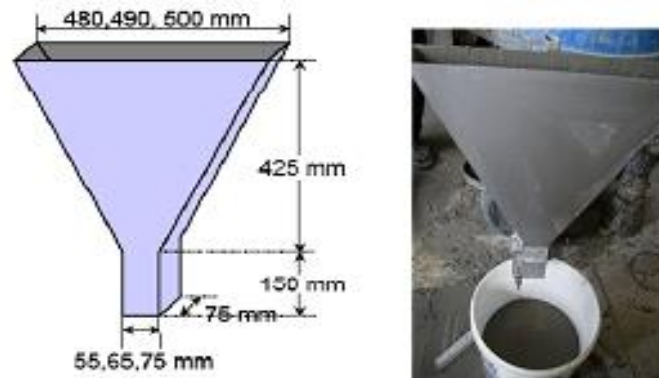


Figure 14 : Essais des Entonnoirs [20]

I.8.4. Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçant, il vise à qualifier les bétons autoplaçant vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier [15].

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (laitance) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes : [22]

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



Figure 15 : Essai au tamis [22]

I.8.5. Essai d'étalement modifié (J-Ring)

L'essai d'étalement modifié fut développé au Japon et consiste à faire s'écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur de l'anneau. [21]



Figure 16 : Essai d'étalement modifié [21]

I.9. Caractérisation de BAP à l'état durci

La caractérisation du béton autoplaçant à l'état durci est basée sur les résistances à la compression et à la traction par flexion. Nous constatons que ces valeurs de résistances de béton autoplaçant sont supérieures à celles du béton ordinaire de l'ordre de respectivement 36% et 48% à 28 jours.

I.9.1. Résistance à la compression

Les BAP se caractérisent par un rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécanique. L'utilisation de filler dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique au jeune âge. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien

défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense.

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

Zhu et Gibbs ont montré que la résistance de BAP utilisant la poudre de pierre à chaux augmente de 50 à 80 % de celle de référence à 7j et 20 à 40% à 28 j, ils ont expliqués cette augmentation par poudre à pierre à chaux accélère l'hydratation de ciment et augmente la résistance aux jeunes âges. Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges. [23]

I.9.2. Résistance à la traction

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

En comparant des mélange de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction. [23]

I.9.3. Module d'élasticité

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une baisse quantité de gros granulats si on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, a résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré. [23]

I.9.4. Le retrait

Le retrait endogène des BAP est plus faible (les valeurs s'échelonnent entre 50-2005(um/m) que celui des BV.

Le retrait endogène est similaire pour BAP et BV, présentant le même rapport E/C, la présence de l'addition n'a en général pas d'effet significatif, au moins à long terme, sur la déformation chimique. Les données sur le retrait de séchage sont très partagées d'un côté le retrait total est trouvé équivalent pour BAP et BV et de l'autre, il est partagées d'un sensiblement supérieur dans le cas des BAP. [23]

I.9.5. Le fluage

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

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

Proust trouve des valeurs de même ordre de grandeur de BAP et pour BV. Ces résultats sont confirmés par Turcry, ou il indique qu'en compression, le fluage total du BAP est identique à celui de BV. [23]

I.10. Les Approches de formulation Des BAP

I.10.1. Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers

Okamura, le concepteur des BAP, propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement.

Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en super plastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie.

La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité. A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons. La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. Billberg et Jacobs et al montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier. [15]

I.10.2. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage. Oh et al ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte,

puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage. Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par Tangtermsirikul, Pettersson et Bui. Cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés : un Volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage. La notion d'excès de pâte a également été proposée par Chanvillard et al dans une méthode de formulation des bétons de sable. [15]

I.10.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie. Sedran et de Larrard ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton. Le modèle est implanté dans un logiciel (Béton lab Pro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton. Roshavelov a également développé un modèle d'empilement granulaire, qui semble néanmoins être resté à un stade plus théorique. [15]

I.10.4. Méthode basée sur le mode de compactage

L'idée principale de cette méthode consiste à déterminer le compactage maximal du granulat en mesurant sa masse volumique avec différents rapports du sable sur le granulat puis à calculer la quantité de liants (ciment et addition minérale) en se basant sur la résistance à la compression du BAP souhaitée. En outre, les pâtes formant le liant (ciment et addition minérale) du mélange doit avoir la même fluidité. Par ailleurs, le dosage du super plastifiant du BAP est déterminé en fixant une valeur cible d'étalement par le biais de mortier avec l'essai d'étalement au cône. [15]

I.11. Principe et application des approches

I.11.1. 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 :

a. 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.

b. 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.

c. 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.

d. 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. [21]

I.11.2.Approche Suédoise

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. [21]

I.11.3.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 :

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

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

- La proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple)
- Le dosage, à saturation, du 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 auto plaçant 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 auto plaçant sont atteintes. [21]

I.11.4. Autres méthodes

- Méthode de Nan Su et al. (dénommée méthode chinoise),
- Méthode de Brouwers et Radix (dénommée méthode hollandaise),
- Méthode de Khayat et al. (dénommée méthode canadienne),
- Méthode du mètre cube (dénommée méthode MMC). [24]

I.12. Les avantages des bétons autoplaçant

- L'absence de vibration et donc de nuisances sonores.
- Des aspects de surface d'une bonne régularité.
- Une diminution de risque de fissuration.
- Un gain de temps sur les bétonnages.
- Une pénibilité fortement réduite pour les maçons.
- Une suppression des risques d'accident liés à la manutention de la benne.
- Une économie de mains d'œuvres et un meilleur enrobage des armatures.
- Une bonne planimétrie du support fini. [23]

CHAPITRE IV

Recyclage des déchets dans le
domaine de construction

II.1. Introduction

L'Algérie fait face à de sérieux problème, dégradation de l'environnement et l'épuisement ou la perte de ressources naturelles. Les indicateurs sont au rouge; ils incitent à des actions rapides. La protection de l'environnement en Algérie doit être prise comme partie intégrante du développement lui-même. La poussée écologique impose de tenir le plus grande compte de l'environnement soit en évitant des emprunts de matériaux naturels, soit en éliminant des sous-produits et déchet dont les dépôts souvent disgracieux peuvent conduire à certaines pollutions du milieu naturel.

Dans ce chapitre, nous décrivons le contexte de la gestion des différents types de déchet dans le domaine de génie civil et les principales techniques de traitement ou d'élimination à travers le monde, ainsi le recyclage et la réutilisation des déchet dans le domaine de génie civil.

II.2. Définition du terme déchet

Un déchet est défini comme " Tout résidu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon et qui sont de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits ou des odeurs, et d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement. [25]

II.3. Origine de la production de déchets

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- biologiques : tout cycle de vie produit des métabolites ;
- chimiques : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième ;
- technologiques : tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;
- économiques : les produits en une durée de vie limitée ;
- écologiques : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;
- accidentelles : les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets. [26]

II.4. Constitution chimique du déchet

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous-produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux [27].

II.5. Classification des déchets

II.5.1. Déchets ultimes

La loi du 13 juillet 1992 a introduit la notion de déchets ultimes et en donne la définition suivante : « un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. »

A terme, seuls les déchets qui n'ont pu être ni recyclés, ni incinérés avec récupération d'énergie, pourront être mis en décharges.

Les déchets ultimes issus des usines d'incinération d'ordures ménagères et déchets assimilés, dénommés mâchefers, peuvent être transformés après traitement en granulats et utilisés pour réaliser les fondations de route. [28]

II.5.2. Déchets inertes

Déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante ; ne se décompose pas, ne brûle pas, et ne produit aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradable et ne détériore pas d'autres matières avec lesquelles il entre en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. [29]

Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction.

Ce sont notamment les déchets suivants :

- Les bétons (armés ou non),
- Les tuiles et céramiques,
- Les briques, Le verre,

- Les terres et granulats non pollués et sans mélange,
- Les enrobés bitumineux sans goudron,
- Les isolants minéraux (laine de verre, de roche, de laitier, verre expansé). [30]

II.5.3. Déchets assimilés

Les déchets ménagers et assimilés recouvrent les ordures ménagères (OM) qui proviennent des ménages et tous les déchets gérés comme tels par les collectivités locales (déchets des artisans ou commerçants).

II.5.4. Déchets organiques

Les termes suivants recouvrent la même notion : biodéchets ou déchets fermentescibles ou FFOM (fraction fermentescible des ordures ménagères).

Il s'agit de :

- déchets végétaux des parcs et jardins (déchets verts)
- déchets organiques de la cuisine (restes de repas, épluchures, papiers essuie-tout, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'œufs, etc.... [26]

II.5.5. Les déchets industriels banals (DIB)

Ils regroupent l'ensemble des déchets non dangereux produits par les industriels et par les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, la peinture, la chimie et la pétrochimie. Ce sont des déchets d'emballage, des déchets d'entretien et les matériels en fin de vie.

Les déchets non dangereux et non inertes, dits industriels banals sont de même nature que les ordures ménagères. Ce sont :

- Les bois non traités ou traités avec des produits non dangereux (emballages, coffrages, menuiseries, planchers...),
- Les plastiques en PVC, polystyrène, polypropylène (canalisations, menuiseries, revêtements de sols, emballages...),
- Les métaux ferreux et non ferreux tels que l'aluminium, le cuivre, l'acier, le zinc (toitures, matériels électriques, canalisations, équipements...),
- Les revêtements muraux et de sol textiles,
- Le polystyrène expansé, le polyuréthane,
- Les produits mélangés issus de chantier de réhabilitation...

- Les peintures, vernis, colles, mastics, qui ne comprennent ni solvants organiques, ni substances dangereuses. [30]

II.5.6. Déchets dangereux

a. Déchets industriels spéciaux (DIS) :

Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses, exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc....

b. Déchets ménagers spéciaux (DMS) :

Ce sont les déchets à risque contenus dans les déchets ménagers, tels que les aérosols, colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néon, produits de nettoyage. Il peut s'agir de ce qu'on appelle également les DTQS : déchets toxiques en quantité dispersé. [31]

II.6. Recyclage des déchets

II.6.1. Définition

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés.

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine. Ainsi, dans le cas du Québec, l'importante hausse du taux de recyclage, passant de 18 % à 42 % entre 1988 et 2002, est allée de paire avec une

augmentation de la quantité de déchets à éliminer par habitant, passant de 640 kg/an/personne à 870 kg du fait d'une augmentation de 50 % de la production par habitant durant cette même période. En France, le volume de déchets a doublé entre 1980 et 2005, pour atteindre 360 kg/an/personne.

Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large. [26]

II.6.2. Technique de recyclage

II.6.2.1. Procédés du recyclage

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

- ✓ Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants.
- ✓ Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer.
- ✓ Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz. [26]

II.6.2.2. La chaîne du recyclage

a. Collecte de déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement techniques. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même.

À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations.

b. Transformation

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

c. Commercialisation et consommation

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés. Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés.

II.6.3. Impact du recyclage dans l'industrie

a. Source d'approvisionnement alternative

Le recyclage des déchets offre une source d'approvisionnement en matières premières alternatives aux autres sources. Par exemple, le recyclage de fil de cuivre permet d'obtenir du cuivre après des entreprises de recyclage et non des entreprises d'extraction.

Le recyclage offre aux entreprises les bénéfices de la multiplicité des sources d'approvisionnement telles que la facilité de négociation des prix d'achat au la sécurité des approvisionnements.

b. Création d'activités

Le recyclage est une activité économique à part entière. Elle est le moyen de création de richesses pour les entreprises de ce secteur.

En théorie, presque tous les matériaux sont recyclables. En pratique, l'absence de filière rentable faite qu'ils ne sont pas tous recyclés. Ainsi, le recyclage est plus coûteux pour des appareils électroniques comme les ordinateurs, car il faut séparer les nombreux composants avant de les recycler dans d'autres filières.

c. Mise en conformité avec la loi

Dans le cas des déchets d'équipements électriques et électroniques, c'est l'intervention du législateur qui a rendu leur collecte et leur valorisation obligatoires au sein de l'Union européenne.

d. Coût de main-d'œuvre

Le recyclage suppose de trier les déchets en fonction du mode de recyclage au quel chacun d'eux sera soumis. Ceci exige une main-d'œuvre abondant, même lorsqu'un tri sélectif est effectué en amont par la population. En effet, il arrive qu'un second tri soit nécessaire dans un centre

d'affinage pour éliminer les erreurs de tri et les impuretés qui pourraient de bacs spéciaux et le recyclage (c'est le cas du plastique et du verre).

La collecte sélective elle-même exige la mise à disposition des ménages de bacs spéciaux et emploi plus de personnes qu'une collecte simple.

La plupart de ces coûts supplémentaires sont à la charge de la collectivité(en France, par exemple, c'est au niveau de la commune ou de la communauté de communes que cela est géré). Les impôts locaux en tiennent compte, mais d'autres sources de financement existent : l'écotaxe et une taxe sur les emballages. [26]

d. Conséquences sur les produits issus du recyclage

Pour certains types de produits, la qualité de la matière première est altérée par l'opération de récupération de celle-ci dans les produits recyclés. Par exemple, le recyclage du papier donne des fibres de papier plus courtes et un papier de moins bonne qualité (ce qui ne permet qu'une dizaine de recyclage successifs). Autre exemple, le recyclage de certaines matières plastiques contaminées par des polluants ne permet plus de les utiliser pour en faire des emballages alimentaires. Un des problèmes du recyclage du verre est le dépôt, au fond, des verres de type Pyrex qui ont un point de fusion différent du verre ordinaire. Ces dépôts abiment les fours.

Cependant, pour la plupart des matières premières contenues dans les déchets (métaux, verre, certains plastiques), les qualités sont conservées au travers du processus de recyclage, permettant un recyclage quasi illimité de celles-ci.

Néanmoins, la chimie intervient de plus en plus dans la fabrication de matériaux issus du recyclage. Les produits qui en résultent ont des caractéristiques de durabilité et de résistance qui peuvent même être supérieures à celles de certains matériaux naturels. Ainsi, on voit des maisons bâties avec des dérivés du recyclage du bois, mélangés ou recouverts par des résines polyuréthanes ou autres. Le résultat est surprenant, donnant une résistance aux intempéries et aux UV. supérieure à celle du bois. Il en va de même pour le papier recyclé, dont la pâte des encrées et mélangée à certains produits chimiques donne un matériau très résistant, utilisé par exemple dans la fabrication de mobilier urbain.

II.6.4. Impacts du recyclage sur l'environnement

Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables : il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières.

Le recyclage permet de réduire l'extraction de matières premières :

- ❖ l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
- ❖ chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
- ❖ le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
- ❖ l'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu).
- ❖ chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;
- ❖ chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11 l d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois.

Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables : il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières. [26]

II.7. Déchets utilisés comme granulats du béton

II.7.1. Déchet de faïence

Les faïences peuvent être définies comme des produits céramiques dont la pâte poreuse. Et pas conséquent perméable. Et recouverte d'une composition vitrifiable destinée à remédier à cette perméabilité.

Les déchets de faïence sont des matériaux inertes ou résidus qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante, ne se décomposent pas, ne brûlent pas, et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de travaux publics ou d'industries fabrication de matériaux de construction.



Figure 17 : déchet de faïence

II.7.2. Déchets de la démolition

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets ; le stockage de tels déchets solides dans des dépôts favorise la pollution de l'environnement et puisque les réserves en granulats alluvionnaires vont s'épuiser, il est donc nécessaire de trouver un moyen pour valoriser ces produits et les réutiliser de nouveau comme granulats dans les bétons et les mortiers.

Le béton recyclé est simplement du vieux béton broyé pour produire des granulats. Il peut être utilisé dans les couches de fondation comme dans du béton maigre et comme seule source de granulats ou remplacement partiel des granulats dans du béton neuf.

Les granulats de béton recyclé sont généralement plus absorbants et moins denses que les granulats ordinaires. La forme des particules est semblable à celle de la pierre concassée. Le béton fabriqué avec des granulats provenant du recyclage, présente généralement de bonnes qualités de maniabilité, durabilité et résistance à l'action du gel-dégel. La résistance en compression varie selon la résistance du béton initial et le rapport eau/liants du nouveau béton.



Figure 18 : Déchets de démolition

II.7.3. Déchet de Pneus

L'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la macro fissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait malgré une amplitude plus élevée de ses variations dimensionnelles de retrait. Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité. [36]



Figure 19 : Déchet de Pneus

II.7.4. Les déchet de brique

Selon la méthode utilisée pour la fabrication et la manipulation des briques, il y a toujours un certain pourcentage de briques cassées, trop cuites ou mal cuites. Les briques concassées et bien cuites conviennent bien à la fabrication des blocs de béton. Le béton contenant de tels granulats est plus perméable et si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton. Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel [26].



Figure 20 : déchet de Brique

II.7.5. Déchet de Verre

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année. En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier. La résistance est particulièrement faible lorsque du ciment à teneur alcaline élevée est utilisé. Le verre de récupération réagit en présence de granules alcalins. Une dilatation élevée est produite lorsqu'il est en contact avec du ciment à teneur alcaline élevée, ce qui explique la faible résistance des bétons à base de verre. Par exemple, pour une période de 12 mois, la dilatation du béton contenant du gravier est de 0,018%, alors que celle du béton contenant du verre est d'environ 0,3%.

Le verre de récupération peut aussi servir à la fabrication de granulats légers. La production des granules légers expansés d'une masse volumique de 528 kg/m³ par pelletisation d'un mélange de verre de récupération broyé, d'argile et de silicate de sodium chauffé à une température de 850°C. Le béton ainsi obtenu présente une résistance à la compression d'environ 17 MPa après une période de cure à la vapeur de 28 jours.

Le verre récupéré est de composition variée et est souvent contaminé par de la saleté ou d'autres substances qui doivent être éliminées. Une fois broyé, le verre se présente sous forme de particules allongées et sa surface, tant des points de vue chimique que physique, le rend impropre à être utilisé comme granulat pour le béton.

Les additifs font varier les propriétés physiques et mécaniques du verre. Néanmoins, il garde tout de même des caractéristiques générales : isolant (très faible conductivité thermique et électrique), dur (difficile à percer et à rayer), étanche aux gaz, aux liquides, résistant à la chaleur, facilement stérilisable, inerte chimiquement, transparent. [29]



Figure 21 : déchet de verre

II.7.6. Les déchets de chantier

Les déchets de chantiers sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et des activités industrielles consacrées à la fabrication de matériaux de construction. Ils sont définis comme étant des déchets inertes qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine [11]. Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les briques, les carrelages ainsi que les enrobés bitumineux sans goudron. L'amiante est considérée comme déchets inertes mais son utilisation est interdite pour raison de santé [12].



Figure 22 : Les déchets de chantier

II.7.7. Les déchets plastiques

On entend par déchet plastique, les résidus de processus de production, de transformation et de consommation, ou encore les produits plastiques destinés à l'abandon. Il existe plusieurs types de déchets plastiques :

- Les déchets plastiques industriels : il s'agit de l'ensemble des déchets issus des processus de production résines (essentiellement trouvés dans les sites pétrochimiques) et de transformation des résines en objets fins (principalement trouvé dans la filière de la plasturgie).
- Les déchets de production : ils proviennent des arrêts de réacteur de polymérisations, des purges de réacteurs et des lots déclassés. ils sont homogènes et présentent la particularité d'avoir un degré de pollution faible, voire inexistant. On y retrouve, en très grand majorité, les polymères de grande diffusion (PE, PS, PVC).
- Les déchets de transformation : ils proviennent de toutes les opérations de plasturgie permettant l'obtention de produits finis (extrusion, injection, soufflage, calandrage,...). On y retrouve, précisément, les carottes, lisières et bordures de ces opération de thermoformage, les pièces présentant des défauts, ou encore, les chutes de démarrage et d'arrêt de machine. [35]



Figure 23 : différent type de déchet plastique

II.7.8. Déchet de

bois

Le bois manufacturé représente la plus grande partie du bois que nous utilisons et qui se termine toujours en déchet. Il n'est pas réutilisable principalement en raison des produits de protection, de conservation ou d'habillage (peinture et vernis.....) qui sont utilisés pendant toute sa vie. Ses seules réutilisation, de façon marginale, sont les panneaux de particules que l'on obtient la aussi avec de la colle et des produits injectés.

Le bois en fin de vie devrait être pour destruction, en centrale spécifique comme le demande certains textes officiels, mais ce n'est qu'un rêve de le croire. Il est très souvent brûlé soit dans vos cheminées soit dans les centrales ou les produits nocifs sont soit éjectés dans l'atmosphère, soit stockés sans réutilisation en décharge (sauvage ...) et cela rarement pour le bien de notre santé.



Figure 24 : différent type de déchet de bois

CHAPITRE III

Caractérisation des matériaux

III.1. Introduction

Ce chapitre résume la caractérisation des matériaux utilisés dans notre travail, les différents essais physico-mécaniques réalisés sur les matériaux utilisés pour la fabrication du béton (Graviers, Sables, Ciment, Eau de gâchage, Calcaire, déchet de faïence) et les différents essais réalisés sur béton à l'état frais (essais d'étalement au cône d'Abrams, la boîte en L et de stabilité au tamis) et durci tel que les propriétés mécaniques (Résistance à la compression et résistance à la flexion).

III.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

III.2.1. ciment

Le ciment utilisé est un CPJ-CEM II/B 42.5, de la cimenterie de M'silla. Le ciment MATINE c'est un ciment gris de haute résistance initiale et finale qui contient 15 % de fillers calcaires. Conformément à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94. Ses caractéristiques minéralogiques et chimiques sont regroupées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau(1) : Caractéristique physiques du ciment CPJ 42.5 (ACC-M'sila)

Caractéristiques	Résultats	Unités
Consistance normale	27	%
Début de prise	180	Min
Fin de prise	225	Min
Masse spécifique	3.12	g/cm ³
Masse volumique	1.03	g/cm ³
Surface spécifique(SSB)	3167.55	Cm ² /g

Tableau(2) : Caractéristique mécanique du ciment CPJ 42.5 (ACC-M'sila)

Résistance(MPA)	Age (jours)		
	2jours	7jours	28jours
Compression	19.21	35.43	47.92
Flexion	4.27	5.91	6.87

Tableau(3) : Composition minéralogique du ciment CPJ 42.5 (ACC-M'sila)

Phase	Eléments	Teneur	Unité
Clinker	C3S	58	%
	C2S	16	%
	C3A	7	%
	C4AF	12	%
	CaO _L	1	%
Régulateur de prise	Gypse	6	%
Ajout	Calcaire	17	%

Tableau(4) : Composition chimique du ciment CPJ 42.5 (ACC-M'sila)

Elément chimiques	Teneur	Unité
SiO₂	15.80	%
AL₂O₃	4.15	%
Fe₂O₃	2.31	%
CaO	61.90	%
MgO	2.39	%
K₂O	0.69	%
Na₂O	0.06	%
SO₃	2.80	%
Chlorures	0.023	%
Insoluble	0.72	%
Paf	9.59	%

III.2.2. Sable

Les sables utilisés sont : sable roulé grossier de KH-MELIANA et le sable fin de BOUSSAADA. Après traitement des deux sables, on a obtenu les résultats des essais physiques et d'analyse granulométrique suivants :

➤ **Sable grossier (KH-MELIANA) :**

Tableau (5) : caractéristiques physiques de sable kh-meliana

Caractéristique	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2.50	g/cm ³
Masse volumique apparente	1.63	g/cm ³
Equivalent de sable visuel	89	%
L'absorption d'eau	1.4	%

Tableau(6) : Analyse granulométrique de sable de kh-meliana (NF P 18-560)

Ouverture des tamis (mm)	Masse(g)	Teneur(%)		MF
	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisât cumulés	
4	57.2	2.86	97.14	3.02
2.50	387.7	19.38	80.62	
1.25	892.2	44.61	55.39	
0.63	1274.4	63.72	36.28	
0.315	1571.8	78.59	21.41	
0.16	1917.5	95.87	4.13	
0.08	1989.3	99.64	0.36	
FT	2000	100	0.00	

Remarque :

On remarque que le sable de kh-meliana a un module de finesse très élevé(3.02), donc il faut une correction par le sable fin de BOUSSAADA , pour avoir un module de finesse qui appartient à l'intervalle $2,2 \leq MF \leq 2,8$.

➤ **Sable fin de Boussaâda :**

Tableau(7) : caractéristiques physiques de sable Boussaâda

Caractéristique	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2.85	g/cm ³
Masse volumique apparente	1.56	g/cm ³
Equivalent de sable visuel	85	%
L'absorption d'eau	1.5	%

Tableau(8) : Analyse granulométrique de sable Boussaâda (NF P 18-560)

Ouverture des tamis (mm)	Masse(g)	Teneur(%)		MF
	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisât cumulés	
1.25	21.0	2.1	97.9	1.34
0.63	25.4	2.54	97.46	
0.315	340.1	34.01	65.99	
0.16	950.1	95.01	4.99	
0.08	976.4	97.64	2.36	
FT	1000	100	0.00	

➤ **La Correction de sable :**

Le module de finesse désiré est $Mf_x = 2.5$.

$$\% \text{ de Sable gros} = [(Mf_x - Mf_2) / (Mf_1 - Mf_2)] \times 100$$

$$\text{Donc : } \% \text{ de Sable gros} = [(2.5 - 1.34) / (3.02 - 1.34)] \times 100 = 70\%$$

$$\% \text{ de Sable fin} = [(Mf_1 - Mf_x) / (Mf_1 - Mf_2)] \times 100$$

$$\text{Donc : } \% \text{ de sable fin} = [(3.02 - 2.5) / (3.02 - 1.34)] \times 100 = 30\%$$

Mf_x : module de finesse désiré.

Mf_1 : module de finesse de sable grossier.

Mf_2 : module de finesse de sable fin.

Tableau(9) : caractéristique physique de sable corrigé

Caractéristique	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2.5	g/cm^3
Masse volumique apparente	1.74	g/cm^3
Equivalent de sable visuel	81	%
L'absorption d'eau	0.99	%

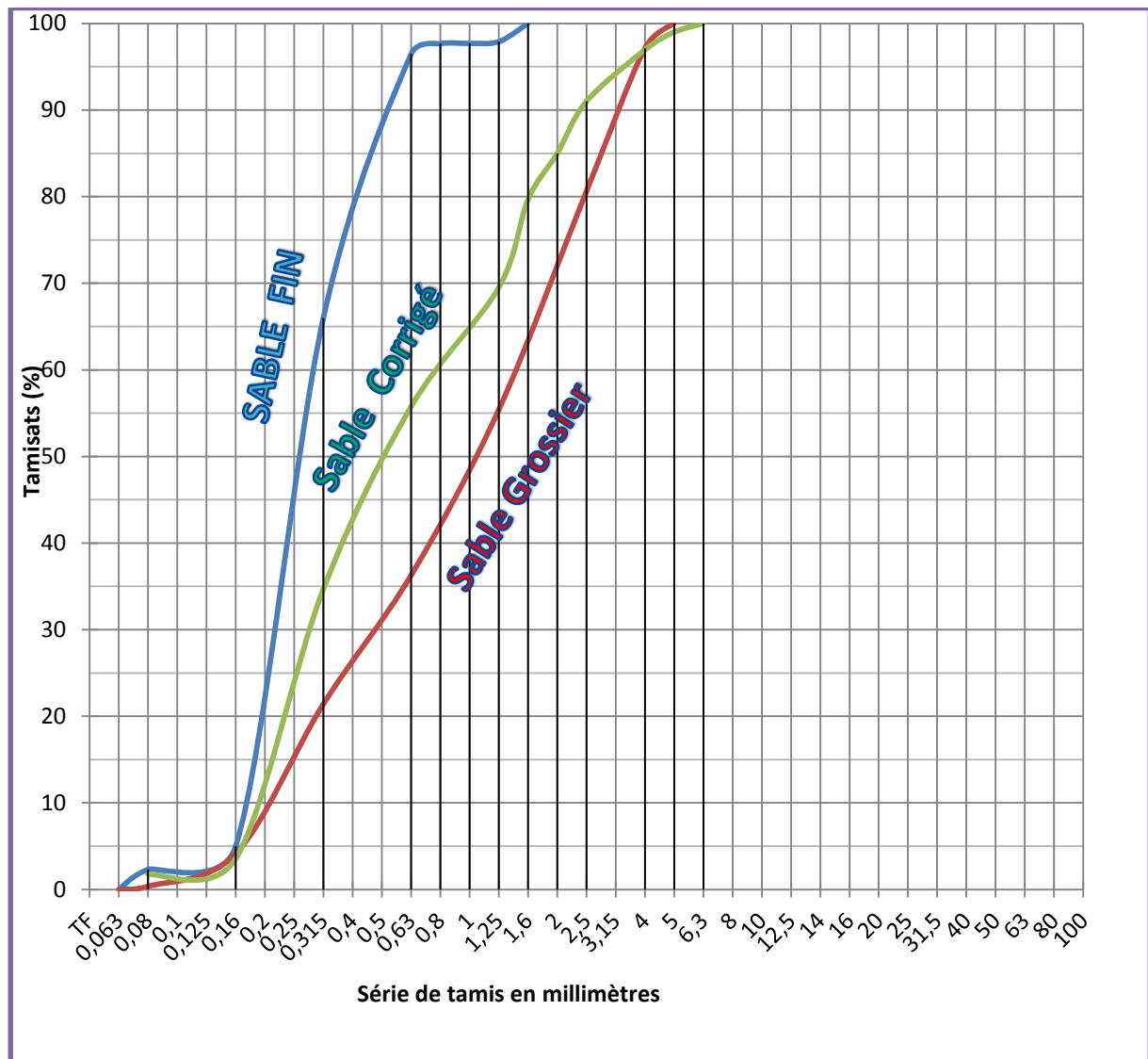
Tableau(10) : Analyse granulométrique de sable corrigé

Ouverture des tamis (mm)	Masse(g)	Teneur(%)		MF
	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisât cumulés	
5	20	1	99	2.5
4	61	3.05	96.95	
3.15	180	9	91	
2.5	300	15	85	
2	407	20.35	79.65	
1.25	610	30.5	69.5	
0.63	885	44.25	55.75	
0.315	1306	65.3	34.7	
0.16	1929	96.45	3.55	
0.08	1965	98.25	1.75	
FT	2000	100	00	

Remarque :

D'après les résultats l'analyse granulométrique du sable corrigé, on peut dire qu'il répond aux exigences de la norme pour qu'il soit utilisé dans les bétons.

Analyse granulométrique par tamisage NF P 18-560



III.2.3. graviers :

Les graviers utilisés sont : gravier naturelle (3/8, 8/15) et gravier de déchet faïence (3/8, 8/15).

a) gravier naturelle :



3/8



8/15

**Tableau(11) : caractéristiques physiques de de graviers naturels
(3/8,8/15)**

Caractéristique	Fraction	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	3/8	2.66	g/cm ³
	8/15	2.69	
Masse volumique apparente	3/8	1.43	g/cm ³
	8/15	1.41	
Los Angeles	3/8, 8/15	25.04	%
L'absorption d'eau	3/8, 8/15	0.67	%
Micro-dévale	3/8, /815	26.64	

Tableau(12) : Analyse granulométrique de gravier (8/15)

Ouverture des tamis (mm)	Masse(g)	Teneur(%)	
	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisât cumulés
16	20	0.67	99.33
12.5	420	14	86
10	1170	39	61
8	2100	70	30
6.3	2950	98.33	1.67
FT	3000	100	00

Tableau(13) : Analyse granulométrique de gravier (3/8)

Ouverture des tamis (mm)	Masse(g)	Teneur(%)	
	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisât cumulés
8	00	00	100
6.3	20	0.67	99.33
5	420	14	86
4	1170	39	61
2.5	2100	70	30
FT	3000	100	00

Remarque :

Les granulats utilisés se sont des granulats de bonne qualité, dont les caractéristiques physico-mécaniques satisfont aux exigences de la norme.

2) gravier de déchet faïence :



Déchet de faïence

Concassage

tamissage



Gravier 8/15

Gravier 3/8

**Figure 25 : Granulats de déchet des carreaux
faïence**

**Tableau(14) : caractéristiques physiques de de graviers déchet faïence
(3/8,8/15)**

Caractéristique	Fraction	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	3/8	2.19	g/cm ³
	8/15	2.19	
Masse volumique apparente	3/8	0.88	g/cm ³
	8/15	0.96	
Los angeles	3/8, 8/15	32	%
L'absorption d'eau	3/8, 8/15	7.41	%
Micro-dévale	3/8, 8/15	40	%

Tableau(15) : Analyse granulométrique du gravier 8/15 de déchet de faïence

Ouverture des tamis (mm)	Masse(g)	Teneur(%)	
	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisât cumulés
16	20	0.66	99.34
12.5	80	2.66	97.34
10	1960	65.33	34.67
8	2900	96.66	3.34
6.3	2980	99.33	0.67
FT	3000	100	00

Tableau(16) : Analyse granulométrique du gravier 3/8 de déchet de faïence

Ouverture des tamis (mm)	Masse(g)	Teneur(%)	
	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisât cumulés
8	100	3.33	96.67
6.3	1240	41.33	58.67
5	1900	63.33	36.37
4	2420	80.66	19.34
2.5	2941	98.03	1.97
FT	3000	100	00

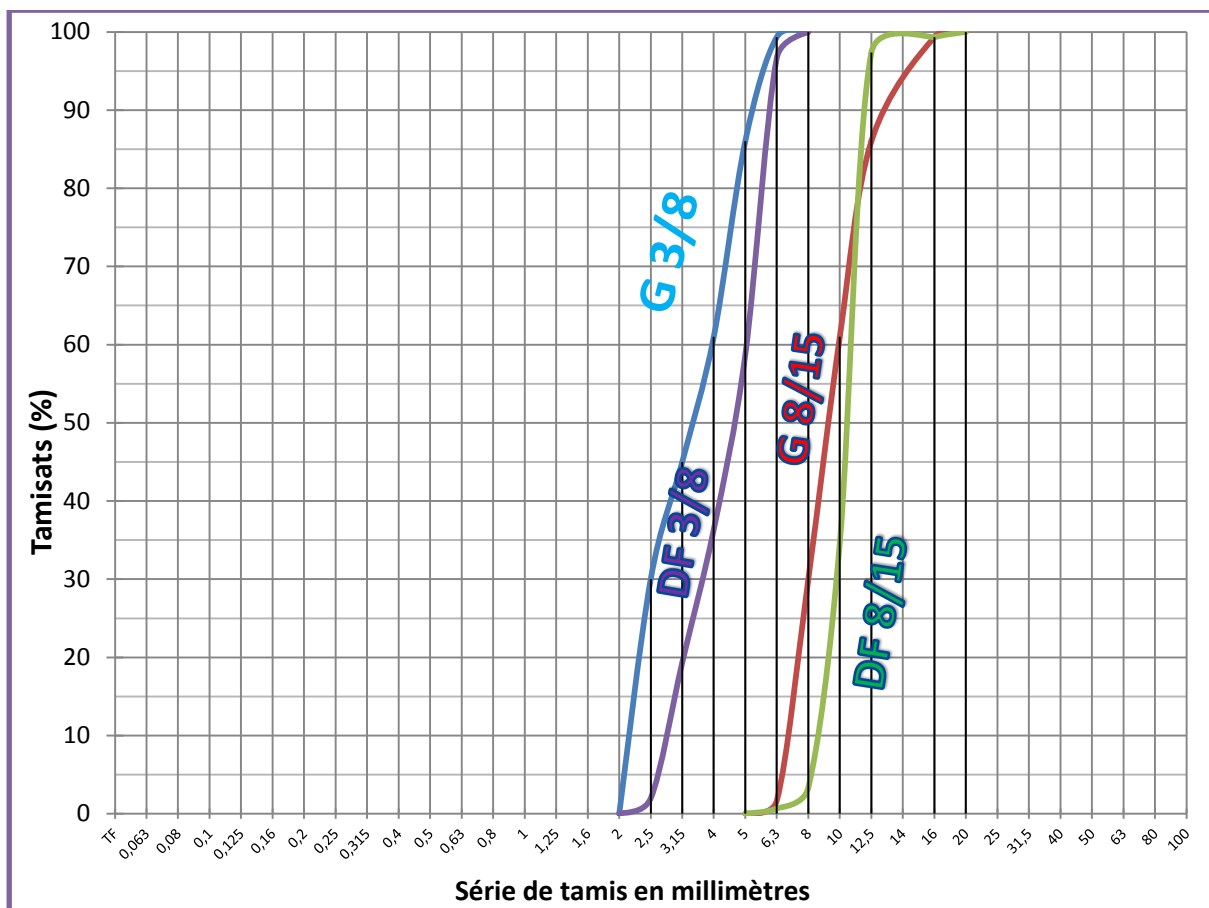


Figure 26 : analyse granulométrique par tamisage NF P 18-560

I.4.Fillers calcaires :

C'est un calcaire issu du gisement **d'EL-KHROUB** qui occupe la partie sud-ouest du massif Oum settas au nord-est de Constantine il est constitué de calcaire d'origine biochimique néritique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.

Tableau 17: Caractéristiques chimiques de filler calcaire	
Eléments	Teneur(%)
CaO	56.03
SiO₂	0.04
Al₂O₃	0.03
Fe₂O₃	0.02
Na₂O	0.05
K₂O	0.02
MgO	0.17
P₂O₅	0.008
TiO₂	0.009
PAF	43

Tableau 18 : Caractéristique physique de filler calcaire

Caractéristique	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2.54	g/cm ³
Masse volumique apparente	1.11	g/cm ³
surface spécifique (SSB)	5350.5	Cm ² /g
PH	9	/

I.5.L'adjuvant :

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau dit «**TEMPO 12**», conforme à la norme **NF EN934-2**, fabriqué par **SIKA**.

Le **TEMPO 12** est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalente de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

Le **TEMPO 12** permet la fabrication de béton plastiques à autoplaçant transportés sur de longues distances et pompés.

Tableau 19 : Caractéristiques physique de TEMPO 12

Forme	Liquide
Couleur	Brun clair
PH	4.5 à 6.5
Densité	1.06 ± 0.01
Teneur en chlore	$\leq 0.1 \%$
Extrait sec	28 à 31 %

Propriétés et effets :

Grâce à ses propriétés le TEMPO 12 permet :

Sur béton frais :

- L'obtention d'un E/C très faible.
- Béton plastiques à fluides.
- d'éviter le ressuage et la ségrégation.
- de faciliter la mise en œuvre du béton.

Sur béton durci :

- D'augmenter la durabilité du béton.
- D'augmenter les résistances mécaniques.



Figure 27 : TEMPO 12

- Diminution de la perméabilité.
- Diminution la retraite.

Dosage :

Le dosage de TEMPO 12 varié entre 0.2 à 3 % du poids de ciment, ce dosage dépend de performances recherchées.

Mise en œuvre :

Le TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

Domaines d'applications :

- ✓ Bétons à haute performance.
- ✓ Bétons auto plaçant.
- ✓ Bétons pompés.
- ✓ Bétons précontraints.
- ✓ Bétons architecturaux.

I.6.Eau de gâchage :

L'eau utilisée dans nos essais c'est l'eau potable d'Oued Samar.

CHAPITRE IV

Présentation et discussions de
résultats

IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la formulation des bétons autoplaçant étudiés, ainsi que leurs caractérisations rhéologiques à l'état frais (étalement au cône d'Abrams, boîte en L et l'essai de stabilité au tamis) et physico-mécanique à l'état durci (résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion et vitesse du son).

IV.2. Formulation d'un BAP par la méthode japonaise

Les intervalles pour chaque constituant donnés par cette méthode sont :

- Volume de la pâte est : 330 à 400 l/m³.
- La masse de ciment : $M_C = 300$ à 450 kg/ m³.
- Le dosage de filler calcaire : 10% de poids du ciment.
- Le volume de gravillons : $G/S=1$.

- Donnée de base

On a choisi :

- $G/S = 1$.
- On fixe le rapport $E/(C+F) = 0.38$.
- Le dosage de superplastifiant est donné par essai rhéologique (point de saturation).

- Détermination de la masse de chaque constituant

➤ $E/(C+F) = 0.38$ donc $E = 0.38 \cdot (430 + 43) \xrightarrow{\hspace{1cm}} E = 179.74 \text{ kg/m}^3$.

➤ Volume de la pâte = 335 l/m³.

➤ Volume de granulats = 665 l/m³.

➤ $G/S = 1$

➤ $G + S = 665 \text{ l/m}^3$
 $S = 665/2 \xrightarrow{\hspace{1cm}} S = 332.5 \text{ l/m}^3$

$G = 665/2 \xrightarrow{\hspace{1cm}} G = 332.5 \text{ l/m}^3$

➤ Sable = 866.15 kg/m^3

1) Sable fin = 284.28 kg/m^3

2) Sable grossière = 581.87 kg/m^3

➤ Gravier = 889.43 kg/m^3

1) Classe 3/8 = 442.22 kg/m^3

2) Classe 8/15 = 447.21 kg/m^3

Dans ce travail de recherches quatre compositions de béton autoplaçant seront étudiées : un béton témoin à base des granulats naturels et trois autres compositions à base des granulats recyclés de déchet des carreaux faïence par substituants de 25, 50 et 75% des gros granulats naturels 3/8 et 8/15.

Les dosages des quatre compositions de béton autoplaçant sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 20 : Composition pour 1m^3 de BAP

Formulation	BT	25DF	50DF	75DF
Ciment (kg)	430	430	430	430
Calcaire (kg)	43	43	43	43
Sable 0/1(kg)	284.3	284.3	284.3	284.3
Sable 0/4(kg)	581.9	581.9	581.9	581.9
G 3/8 (kg)	442.2	331.6	221.1	110.5
G 8/15(kg)	447.2	335.4	223.6	111.8
DF 3/8 (kg)	/	91	182	273
DF 8/15(kg)	/	91	182	273
Adjuvant (kg)	7.09	7.09	7.09	7.09

BT : béton autoplaçant sans déchet.

25DF : béton autoplaçant avec 25% déchet de faïence.

50DF : béton autoplaçant avec 50% déchet de faïence.

75DF : béton autoplaçant avec 75% déchet de faïence.

IV.3. Préparation des bétons autoplaçant

La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Le malaxage de béton est réalisé avec un malaxeur à axe vertical et mouvement planétaire de capacité 200 litre ce type de malaxeur est très efficace et fournit dans la plupart des cas un béton très homogène.

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

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- Préparer tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- Préparer les quantités des constituants (ciment, sable, gravier, adjuvant, déchet de faïence, fibre métallique, calcaire, eau).
- Placer les constituants par ordre : gravier 8/15, gravier 3/8, sable 0/4, sable, les fines et le ciment dans le malaxeur pendant(01) min pour malaxage à sec.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement l'eau de gâchage.
- Ajouter progressivement l'adjuvant.



Figure 28 : Malaxeur de béton

D'après le malaxage, rempli les éprouvettes en deux /trois couches sans vibration pour le béton autoplaçant et déterminer les caractéristiques rhéologiques des bétons obtenus selon les exigences normalisées (étalement au cône d'Abrams, boit en L, stabilité au tamis).

IV.4. Conservation des éprouvettes :

Après le gâchage de béton autoplaçant, les moules sont conservé à une température ambiante $T=20^{\circ}\text{C}$, et démoulés après 24h.



Figure 29 : Préparation des éprouvettes

IV.5. Caractéristiques des bétons à l'état frais

1) Masse volumique

La masse volumique des bétons frais a été déterminée par la formule suivante :

$$M_v = \frac{M}{V} \quad (M : \text{masse de l'éprouvette (g)}, V : \text{volume de l'éprouvette (cm}^3\text{)}).$$

Les résultats obtenus sont montrés dans le tableau 24 et représentés par la figures 35

Tableau 21 : Masse volumique des différents types de BAP

Type de BAP	Masse volumique (Kg/m ³)
BT	2356
25%DF	2340
50%DF	2335
75%DF	2310

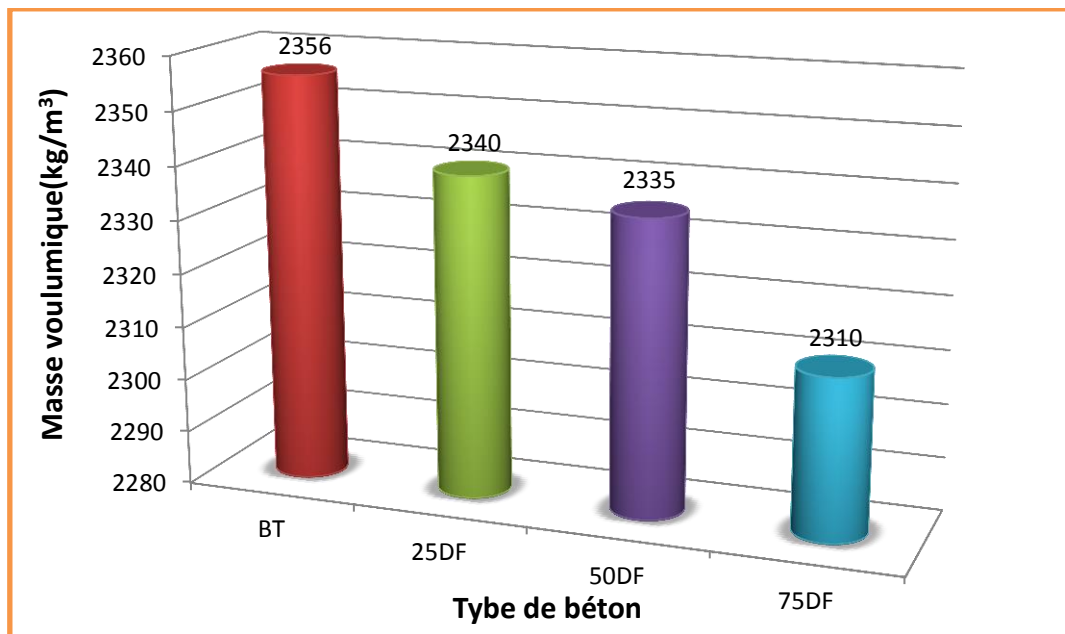


Figure 30 : Variation de la masse volumique des différents bétons

Les résultats obtenus montrent que la substitution des granulats naturels par les granulats de déchet des carreaux faïence diminue la masse volumique de béton autoplaçant. Cela est dû aux propriétés des granulats de déchet des carreaux faïence, ces derniers présentent :

- une forme angulaire qui provoque l'augmentation de la porosité du mélange granulaire
- une faible densité par rapport aux granulats naturels.

2) Essai au cône d'Abrams

Cet essai permet de mesurer la mobilité de béton autoplaçant en milieu non confiné. Le matériel utilisé pour pratiquer cet essai est constitué d'un cône d'Abrams posé sur une plaque métallique. L'essai consiste à remplir le cône d'Abrams en une fois, puis à le soulever et à mesurer le diamètre moyen de la galette d'étalement obtenue.



Figure 31: Essai d'étalement de BAP

Tableau 22 : Résultats d'étalement des différents types de BAP

Type de BAP	Etalement (cm)
BT	74
25%DF	70
50%DF	65
75%DF	62

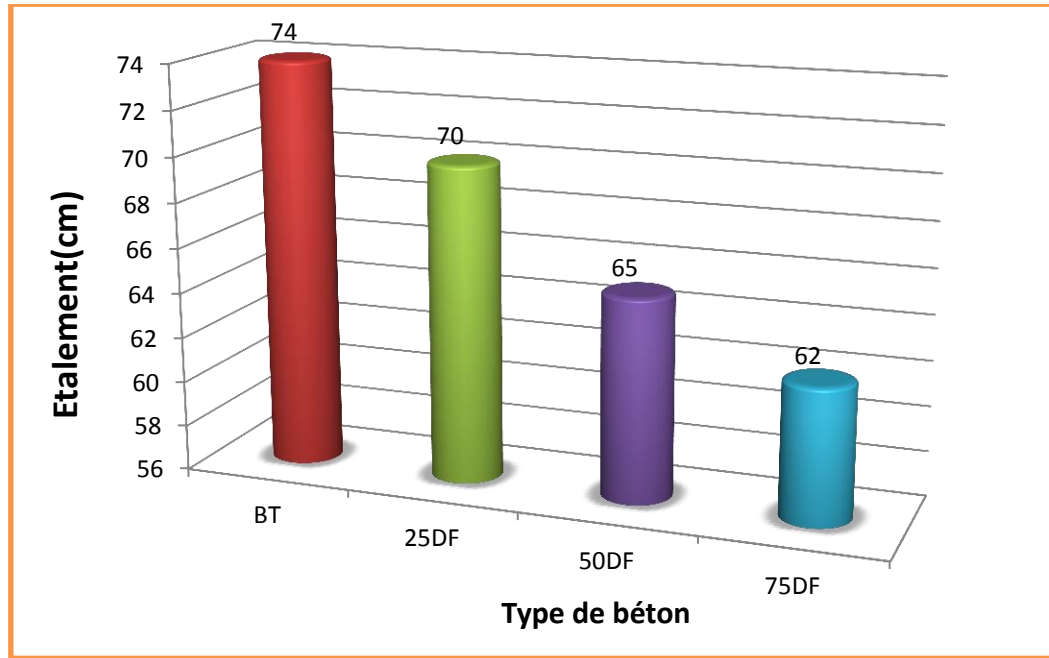


Figure 32 : variation de l'étalement des différents bétons

3) Essai à la boîte en L

Cet essai permet de tester la mobilité de BAP en milieu confiné et 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. Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticales (H1) et horizontales (H2).



Figure 33 : Essai de Boîte en L

Tableau 23 : Les résultats de mobilité mesurée par la boîte en L

Type de BAP	Boîte en L (%)
BT	0.95
25%DF	0.89
50%DF	0.86
75%DF	0.83

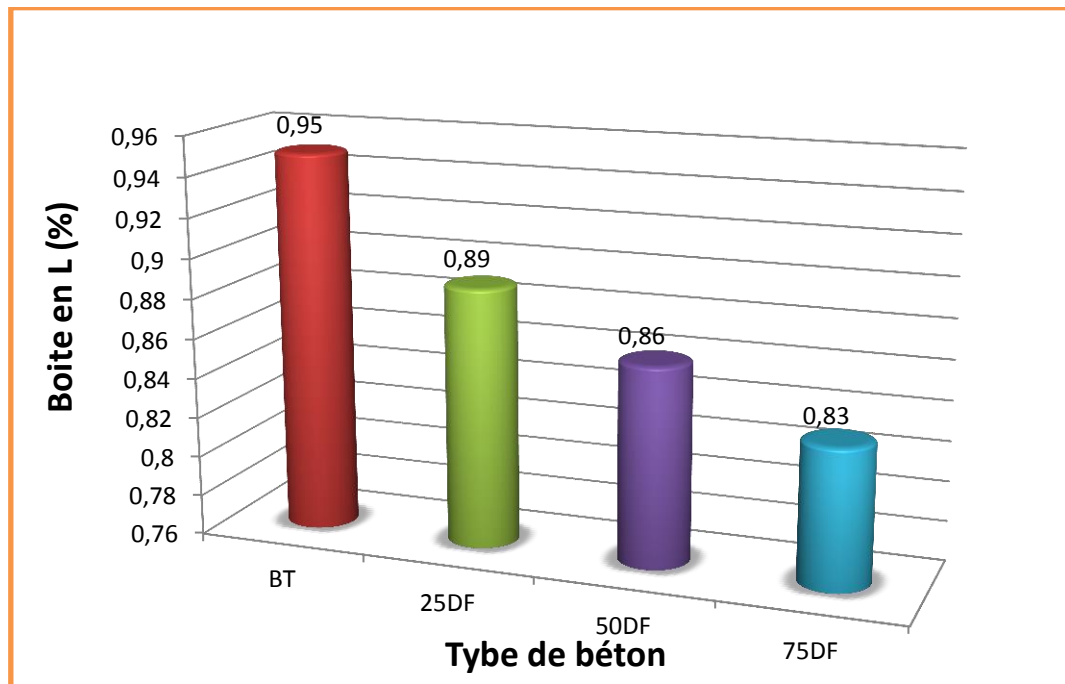


Figure 34 : variation de la mobilité des BAP mesurée par la boîte en L

4) Essai de la 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 (5L) sur un tamis (de maille 5 mm). Puis au bout de 2 minutes, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis. Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon initial Exprime la stabilité du béton.



Figure 35 : L'essai de stabilité au tamis

Tableau 24 : Stabilité au tamis des différents types de BAP

Type de BAP	Stabilité au tamis (%)
BT	7.26
25%DF	6.37
50%DF	6.04
75%DF	5.57

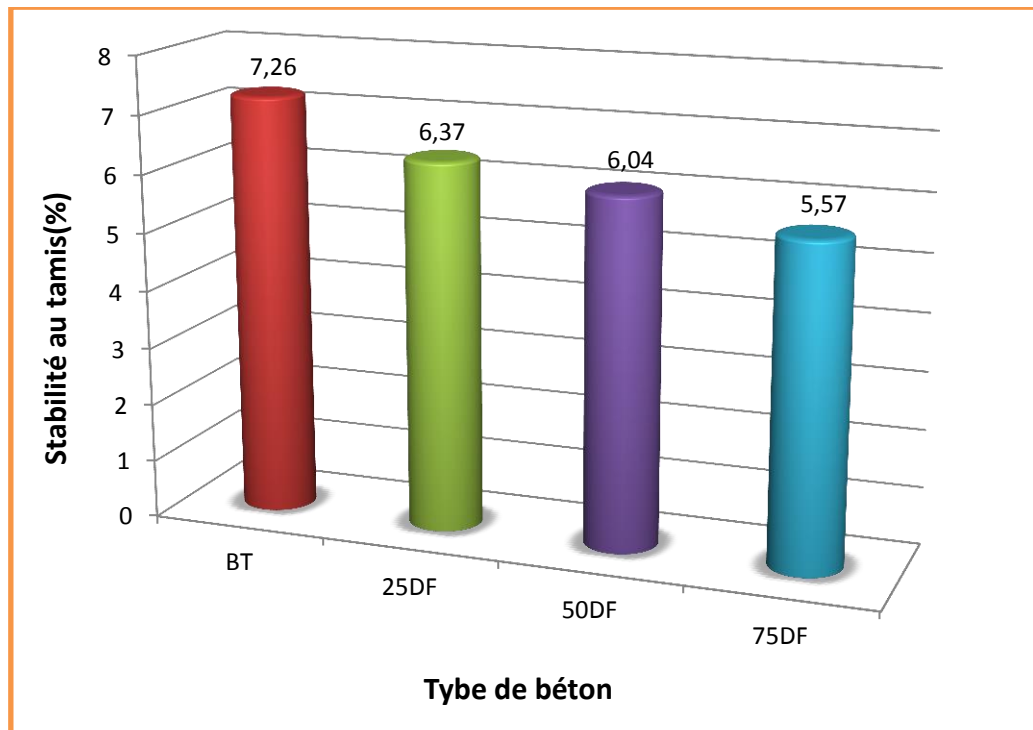


Figure 36 : variation de la stabilité au tamis des différents bétons

Les résultats des essais à l'état frais des différentes compositions de BAP sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 25 : résultats des essais à l'état frais des BAP

Type de BAP	Etalement (cm)	Boite en L (%)	Stabilité au tamis (%)
BT	74	0.95	7.26
25%DF	70	0.89	6.37
50%DF	65	0.86	6.04
75%DF	62	0.83	5.57

❖ Interprétation des résultats

-L'étalement :

L'essai d'étalement est le plus utilisé pour mesurer la capacité du matériau à s'écouler en milieu non confiné des bétons autoplaçant.

La figure (32) présente l'évolution de l'étalement de différentes compositions de béton autoplaçant.

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du taux des granulats de déchet des carreaux faïence en substituant les granulats naturels fait diminuer l'étalement de BAP, en effet les granulats de déchet des carreaux faïence étant plus poreux que les granulats naturels, conduisent le mélange à une forte absorption d'eau augmentant ainsi la viscosité (peu fluide), il résulte une diminution de l'ouvrabilité.

La diminution de l'étalement dans les BAP contenant les granulats recyclés des carreaux faïence elle n'est pas remarquable, elle varie de 5%, 12% et 16% pour les bétons contenant 25%, 50% et 75% de déchet, respectivement.

Les résultats montrent aussi que toutes les compositions vérifient la condition d'étalement pour un béton autoplaçant (plus de 60 cm) même avec 75% de déchet.

La diminution négligeable de l'étalement des BAP contenant les granulats de déchet des carreaux faïence est due à la couche de l'émaillage très lisse que présentent ces granulats, cette couche peut participer à la mobilité et l'écoulement du mélange à l'état frais (Voir figure 46).

-Boite en L :

L'essai de la boîte en L est exploité à travers le taux de remplissage (rapport des hauteurs de béton en fond est en début de boîte) qui doit en principe être supérieur à 0,8.

Les résultats de l'essai du taux de remplissage par la boîte en L utilisé pour mesurer la capacité du béton à s'écouler en milieu confiné montre des valeurs acceptables jusqu'à 75% de substitution des granulats naturels par les granulats de déchet des carreaux faïence,

Les résultats sont conformes à ce que l'on peut attendre d'un béton auto -plaçant. Cependant, le plus important dans cet essai est que le béton testé s'écoule à travers les armatures correctement, ce qui est en relation directe avec l'ouvrabilité. On peut dire que tous les BAP contenant les granulats de déchet des carreaux faïence ont donné des résultats conformes aux exigences des BAP, donc la mobilité des BAP dans un milieu confiné est assurée.

-Stabilité au tamis :

Les résultats d'essais de stabilité au tamis utilisé pour mesurer la capacité des bétons autoplaçant à résister à la ségrégation dynamique, montrent des valeurs acceptables pour toutes les compositions.

L'essai de stabilité au tamis permet de calculer un taux de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Le BAP témoin à base des granulats naturels et tous les BAP à base des granulats recyclés de déchet des carreaux faïence, présentent un taux de ségrégation très proche varie de 5.57% à 7.26%, inférieur à 15%, synonyme d'une stabilité correcte.

IV.6.Caractéristiques des bétons à l'état durci:

Nous présentons dans cette partie les résultats des essais de vitesse de son, de la résistance à la compression et de la résistance à traction par flexion. Les pertes de résistance sont calculées par rapport au BAP témoin.

1. vitesse de propagation du son :

C'est un essai non destructif qui consiste à mesurer la vitesse longitudinale du son à travers le béton à l'aide d'un appareil comportant une boîte de mesure et deux têtes, une émettrice et l'autre réceptrice.

Le tableau (26), présent l'ensemble des résultats d'essais de vitesse de son.

Tableau 26 : Vitesse de son des différents BAP

Type de BAP	Vitesse de propagation du son(m/s)
BT	4820
25%DF	4700
50%DF	4620
75%DF	4283

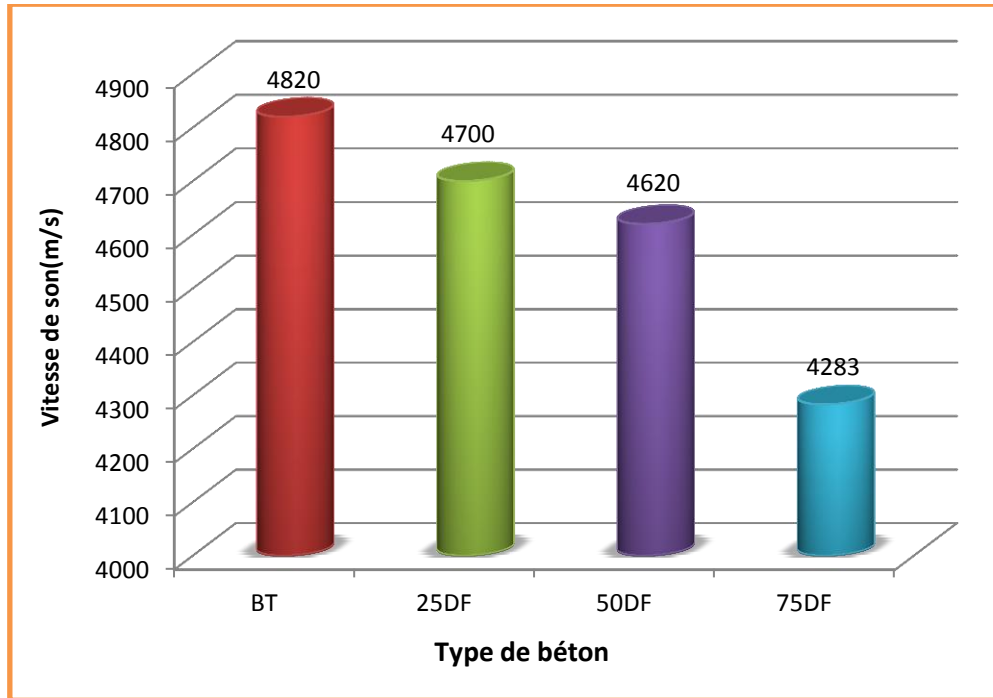


Figure 37 : variation de la vitesse de son des différents bétons

❖ **Interprétation :**

Les résultats obtenus montrent que la substitution des granulats naturels par les granulats de déchet des carreaux faïence, diminue la vitesse de propagation de son de béton autoplaçant. Cela est due aux propriétés des granulats de déchet des carreaux faïence, ces derniers présentent une forme angulaire qui provoque l'augmentation de la porosité du mélange granulaire et par conséquent une diminution de la vitesse de propagation de son.

Tous les bétons présentent une vitesse de propagation de son supérieure à 4500 m/s donc ils sont classés comme des bétons de bonne résistance mécanique.

Les deux figures suivantes expliquent la propagation d'une onde dans un milieu poreux et compact. Dans un milieu compact le temps déroulé pour passer du point A au point B est plus faible, donc la vitesse de propagation est plus élevée, par contre dans un milieu poreux c'est le cas contraire.

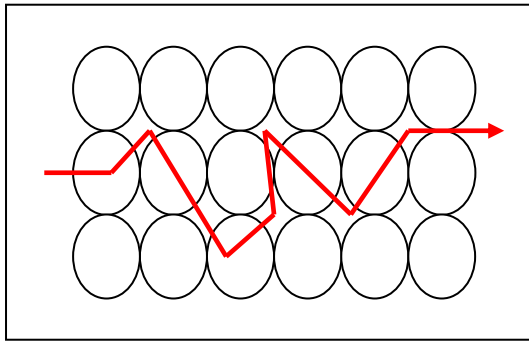


Figure 38 : Vitesse de son dans un milieu poreux

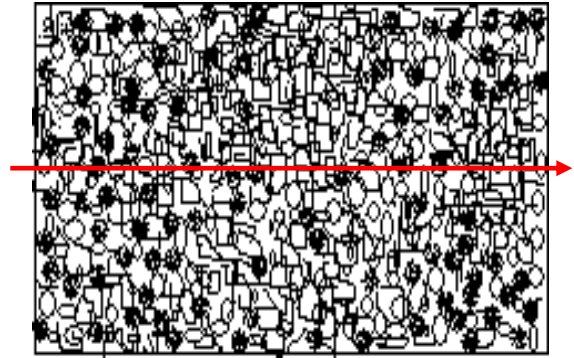


Figure 39 : Vitesse de son dans un milieu compact

2. Résistances mécaniques à la compression et à la flexion :

L'essai de résistance mécanique à la compression est utilisé pour mesurer la résistance à la rupture par compression axiale des éprouvettes.

Avant d'entamer l'essai, les éprouvettes préparées (11*11*22 cm) subissent une opération de surfacage des deux bases.

L'essai de traction par flexion est effectué sur des prismes (7×7×28 cm). Le prisme est placé dans une machine d'essai de flexion et soumis à des charges croissantes jusqu'à sa rupture.



Figure 40 : hotte de surfacage



Figure 41: Essai de compression axiale



Figure 42: Eprouvette prismatiques pour essai de flexion



Figure 43: Essai de flexion 3 points

L'ensemble des résultats mécaniques à la compression et à la flexion obtenue à 28 jours sont regroupés dans le tableau(27) et présentés par l'histogramme (32,34).

Tableau 27 : Résistance à la compression et à la flexion à 28 jours des BAP

Type de BAP	résistance à la compression(MPa)	résistance à la flexion (MPa)
BT	46	9.2
25%DF	40	8.6
50%DF	38	7.8
75%DF	32	7.6

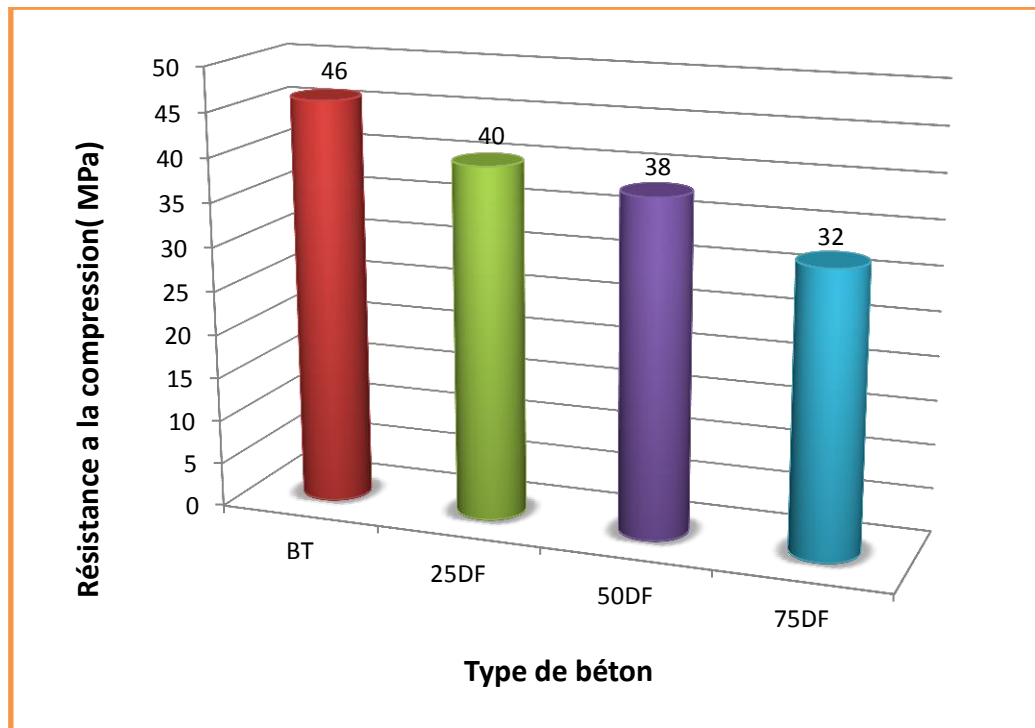


Figure 44: variation de la résistance à compression des différents bétons

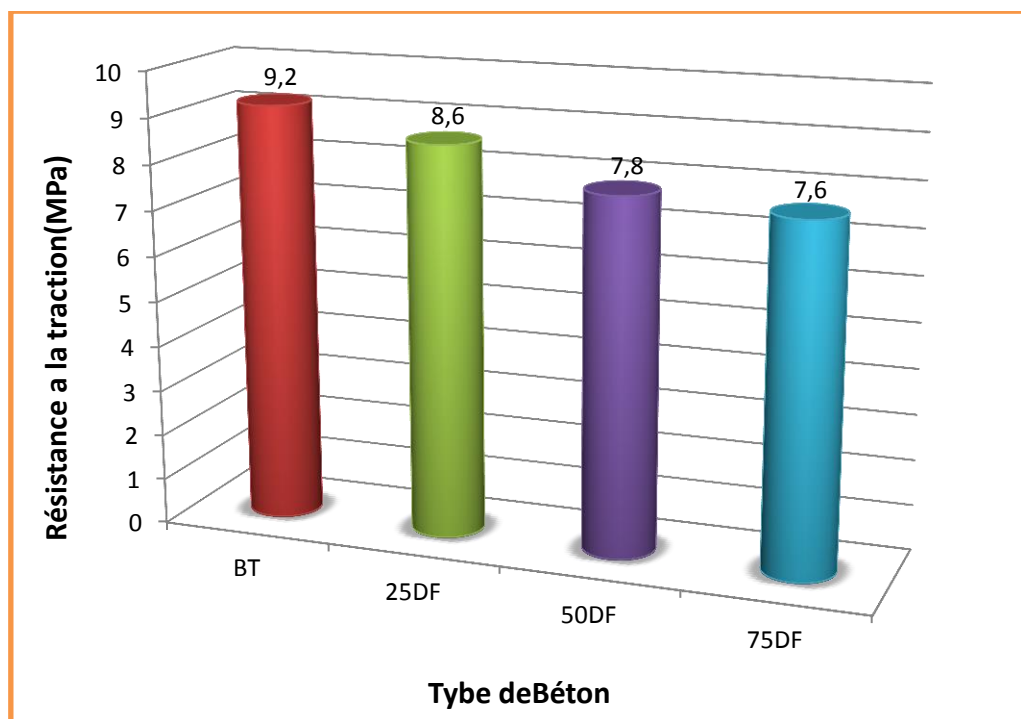


Figure 45 : variation de la résistance à la traction des différents bétons

Le tableau suivant montre les pertes des résistances mécaniques à la compression et à la flexion des BAP à base des granulats de déchet des carreaux faïence par rapport au béton à base de granulats naturels.

Tableau 28 : Pertes des résistances à la compression et à la flexion à 28 jours des BAP

Type de BAP	Perte de résistance à la compression (%)	Perte de résistance à la flexion (%)
BT	/	/
25%DF	13	6
50%DF	17	15
75%DF	30	17

D'après les résultats des essais mécaniques obtenues, on peut constater que la résistance à la compression à 28 jours (figure 32) est une fonction décroissante avec l'augmentation de la quantité des granulats recyclés de déchet des carreaux faïence, cette diminution est proportionnelle aux quantités des granulats recyclés substitut les granulats naturels, il atteint 30% dans le cas de béton contenant 75% de granulats recyclés.

Pour la résistance à la flexion (figure 34), nous avons remarqué la même tendance. En effet, l'augmentation du taux des granulats recyclés, diminue la résistance à la flexion à 28 jours de 17% pour un taux de 75% de substitution (tableau 28)

Cette réduction des résistances mécaniques peut être expliquée par :

- La faible dureté et résistance des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels du type silico-calcaires.
- La forme angulaires que présentent les granulats recyclés (voire figures 46) qui provoque une augmentation de taux de vide et par la suite une réduction de la compacité du béton.

- La faible rugosité des granulats recyclés due à la présence d'une couche d'émaillage (voir figure 46), cette couche diminue le pouvoir liant et empêche l'adhérence entre les grains.

Tous les mélanges de BAP à base des granulats recyclés présentent des résistances plus faibles que les mélanges de BAP à base des granulats naturels. Néanmoins les mélanges de BAP à base de 25% et 50% des granulats recyclés notés par 25%DF et 50%DF, ont des résistances mécaniques à la compression et à la flexion proches à celle de BAP à base des granulats naturels. La perte des résistances mécaniques atteint d'environ 17% au maximum.

Les images des facettes de rupture des éprouvettes représentées par la figure (47), montrent clairement la bonne distribution des granulats recyclés de déchet des carreaux faïence dans les mélanges des BAP, cela peut expliquer les bonnes résistances mécaniques obtenues.

Donc on peut conclure que ces formulations peuvent être utilisées pour des constructions de structure, et dont l'intérêt environnemental et écologique permet l'utilisation des granulats recyclés des carreaux faïence.



Figure 46 : Granulats recyclés de déchet des carreaux faïence

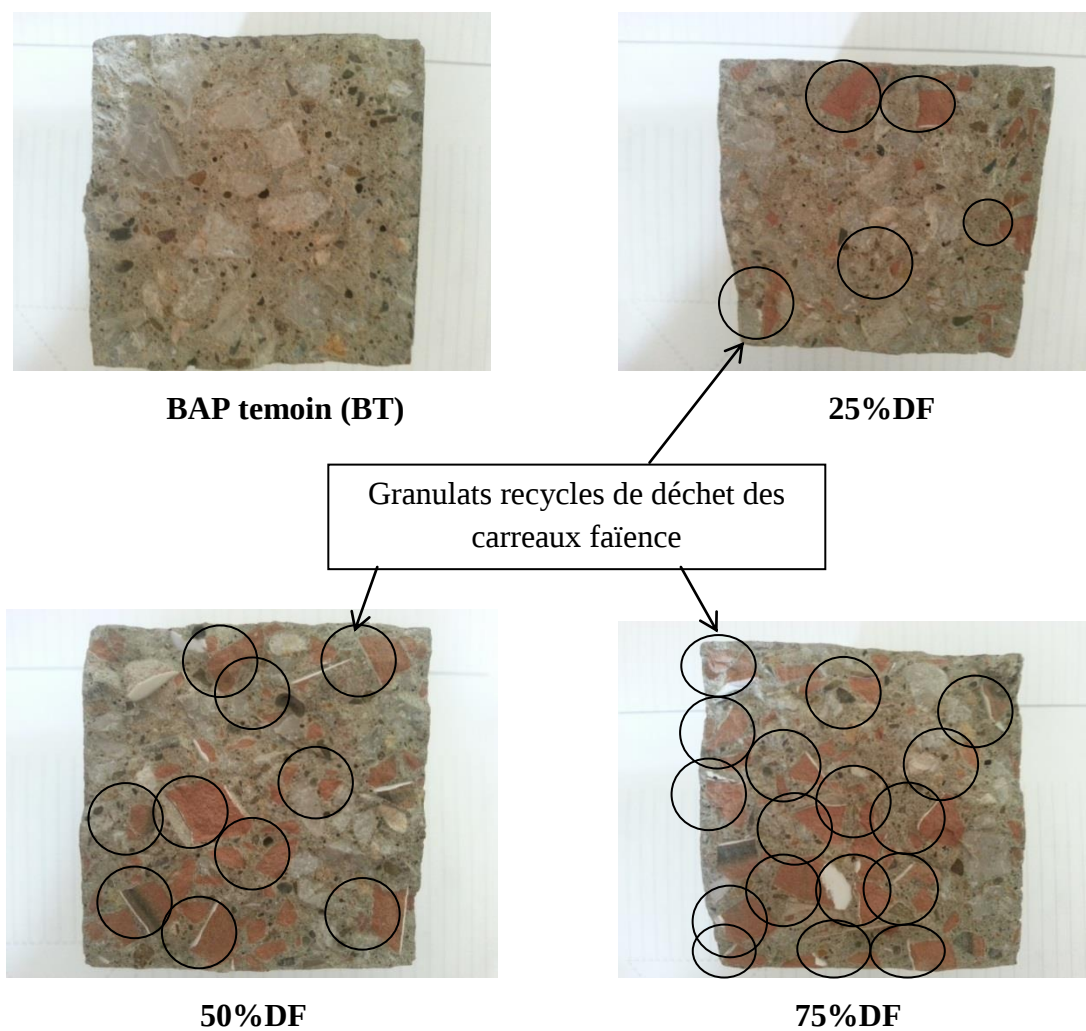


Figure 47 : Facettes de ruptures des BAP

CONCLUSION GENERALE

Notre étude a pour objectif la formulation et la caractérisation rhéologique et physico mécanique d'un béton autoplaçant à base des granulats recyclés de déchets des carreaux faïence par substitution des granulats naturel. Plusieurs formulations de béton autoplaçant avec différents dosages en granulats recyclés ont été étudiées à l'état frais pour estimer les propriétés : étalement, stabilité au tamis et boîte en L et à l'état durci pour estimer les propriétés mécaniques : résistance à la compression et résistance à la traction par flexion.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure :

- L'analyse granulométrique effectuée sur les granulats recyclés de déchets des carreaux faïence montre des courbes granulométriques continues avec une bonne distribution granulométrique et très proche à celle des granulats naturels.
- La méthode japonaise nous a permis de donnée une meilleure composition de béton dont les propriétés à l'état frais et durci sont satisfaisantes.
- L'augmentation du taux des granulats recyclés de déchet des carreaux faïence fait diminuer l'étalement de BAP, il résulte une diminution de l'ouvrabilité mais, qui reste toujours dans les normes et toutes les compositions vérifient la condition d'étalement pour un béton autoplaçant (plus de 60 cm) même avec 75% de déchet.
- Les résultats de l'essai du taux de remplissage par la boîte en L utilisé pour mesurer la capacité du béton à s'écouler en milieu confiné montre des valeurs acceptables jusqu'à 75% de substitution des granulats naturels par les granulats de déchet des carreaux faïence, donc la mobilité de tous les BAP dans un milieu confiné est assuré
- L'essai de stabilité au tamis qui permet de calculer le taux de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante montre que tous les BAP avec déchet ont un taux de ségrégation inférieur à 15%, synonyme d'une stabilité correcte.
- la substitution des granulats naturels par les granulats de déchet des carreaux faïence, diminue la vitesse de propagation de son de béton autoplaçant. Les bétons à base de 25% et 50% des granulats recyclés, présentent une vitesse de propagation de son supérieure à 4500 m/s donc ils sont classés comme des bétons de bonne résistance mécanique.
- Tous les mélanges de BAP à base des granulats recyclés présentent des résistances mécaniques à la compression et à la flexion plus faibles que les mélanges de BAP à base des granulats naturels. Néanmoins les mélanges de BAP à base de 25% et 50% des granulats recyclés notés par 25%DF et 50%DF, présentent des résistances mécaniques

proches à celle de BAP à base des granulats naturels. La perte des résistances mécaniques est de l'ordre de 17% au maximum. Donc on peut conclure que ces formulations peuvent être utilisées pour des constructions de structure, et dont l'intérêt environnemental et écologique permet l'utilisation des granulats recyclés des carreaux faïence.

Enfin on peut dire que la substitution partielle des granulats naturels par les granulats recyclés de déchets des carreaux faïence dans un béton autoplaçant offre une nouvelle source d'approvisionnement et permet d'économiser les granulats naturels, surtout avec le problème d'épuisement en ressources naturelles que fait face le marché des granulats.

L'utilisation des déchets recyclés dans la fabrication des bétons autoplaçant offre une bonne solution au problème de la gestion des déchets pour préserver l'environnement et la protection contre pollution.

BIBLIOGRAPHIE

[1] : **Hanna FARES** : «propriétés mécaniques et physico-mécaniques de bétons autoplaçant exposés à une température élevée». Thèse de doctorat de l'université de Cergy-pontoise. décembre2009.

[2] : Guide d'utilisation du béton en site maritime Benoit THAUVIN & Michel MENGUY (centre d'étude techniques maritimes et fluvial)

[3] : **BENKECHKACHE Ghofrane** «Etude de comportement diffère des bétons autoplaçant Influence des paramètres de composition et de chargement», thèse de magister novembre 2007 université mentouri Constantine.

[4] : **François CUSSIGH** « béton autoplaçant ». Technique de l'ingénieur.

[5] : **SLIMANI Abderezzak** « Science et technologie des bétons », mémoire d'ingénieure 2007.

[6] : **Fiche Techniques** «Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre».

[7] : **Aoufi Mourad, 2006** : « Formulation et caractérisation des propriétés rhéologique et physico-mécanique d'un béton autoplaçant », mémoire d'ingénieur de l'université M'hamed BOUGARRA- Boumerdes, 2006.

[8] : **NF EN 197-1** «La normalisation des ciments».

[9] : **KATTAB.R** «valorisation de sable de dune». Thèse doctorat ENP Alger 2007.

[10] : **DREUX. G.** «Nouveau guide du béton». Ed, Eyrolles, PARIS, (1998).

[11] : document d'une entreprise canadienne qui travaille en Algérie.

[12] : **NF EN 934-2**(sept.2002), adjuvant pour béton, mortier et coulis.

[13] : **Berkouk Kahina et Ameur Tassadit**, « Etude de l'efficacité des superplastifiant sur les propriétés rhéologique de BAP». Mémoire de fin d'étude de l'Université de Boumerdes 2006-2007.

[14] : **Stéphan ASSIE** : «durabilités de béton autoplaçant». Thèse de doctorat de l'institut national des Science appliqués de Toulouse. Octobre 2004.

[15] : **Turcry P.**, Thèse de doctorat en Génie Civil, « Retrait et fissuration des bétons autoplaçant – Influence de la formulation », Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, le 3 février 2004.

- [16] : **Touloum N.** Attaché de recherche division matériaux unité physico-chimie cycle de formation CRERIB2013.
- [17] : **ABDLHAMID R'MILI** «Etude de formulation et de comportement des bétons autoplaçant», Thèse de doctorat de l'école Nationale d'ingénieurs de Tunis 2010.
- [18] : **CHALLAH Kaci et BEKHTAOUI Ouardai** « Caractérisation rhéologique et physique-mécanique d'un béton autoplaçant renforcé de fibres de polypropylène et de fibres métalliques». Mémoire de fin d'étude de l'Université de Boumerdes 2008-2009.
- [19] : Site Web de groupe holcim, [http:// www. Holcim.com](http://www.Holcim.com).
- [20] : Association français de génie civil «Béton autoplaçant –Recommandation provisoires», document scientifique et technique, AFGC juillet 2000.
- [21] : **Sandrine BETHMONT** « Mécanisme de ségrégation dans les bétons autoplaçant», Thèse de doctorat de l'Ecole National des Ponts et Chaussées.
- [22] : **Thèse Afrique science** «les BAP renforcés par un fibrage mixte et multi-échelle : De la formation au comportement mécanique » et « l'influence des paramètres de composition sur le comportement du BAP à l'état frais».
- [23] : **Tabet Nesrine** «contribution à l'étude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur les comportements physique-mécanique des bétons autoplaçant fibres » Thèse doctorant de faculté des sciences de l'ingénieur 2011-2012.
- [24] : **Maher EL BARRAK** « contribution a l'étude de l'aptitude a l'écoulement des bétons autoplaçant a l'état frais» thèse doctorat de l'université de Toulouse 2005.
- [25] : **Khemissi Redouane** «Caractérisation et choix d'une filière de traitement des déchets ménagers et assimilés de la ville d'Oran» thèse de Magister Université d'Oran 2013-2014.
- [26] : **SAADANI Sabrina** « Comportement des bétons à base de granulats recyclés» thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine.
- [27] : **SPERANDIO K** « identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en œuvre par les collectivités locales» thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2001.
- [28] : **Mehdi Cheikh Rouhou** «Les déchets de chantier et le recyclage des matériaux dans le secteur du bâtiment» thèse de fin de formation 2007.
- [29] : **Barkat Abderezzak** «valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrage en béton » thèse de Magister Université Kasdi Merbah Ouargla 2006-2007.
- [30] : «lexique déchet », 2004.

- [31] : **Ademe P-C** «guide de déchet de l'artisanat» 2004.
- [32] : «lexique déchet », 2004.
- [33] **Ramachandranv-S**« utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton», conseil national de recherches Canada, juin 1981.
- [34] : **BONNET S, TURATSINZE A et GRANJU J-L** « effets de l'incorporation de granulats en caoutchouc, issus du broyage de pneus usagés sur la résistance à la fissuration d'un mortier de ciment», décembre 2004-N° 6.
- [35] : **AICHOUCH Amine et BELKBIRE Hocine** « élaboration d'un béton autoplaçant léger à base des déchets de plastique» DEUA Boumerdes 2011.
- [36] : **François PERCHE** « adsorption des poly carboxylates et de lignosulfates sur poudre modèle et ciments »Thèse de doctorat.