



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU
Faculté de Génie de la Construction
Département de Génie Civil

Mémoire de Master II Académique
Option : *Structures et Matériaux*



Thème

*Les BAP à base de granulats de béton de démolition
Résistances et approche de la durabilité*

Proposé et dirigé par :

M^{me}: O. MALEK – HADDAD

Présenté par :

M^{lle} HADDAD kahina

Promotion 2011/2012

REMERCIEMENTS

Toute notre gratitude, grâce et remerciements vont en premier lieu à DIEU le tout puissant qui m'a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail dans les meilleures conditions.

*C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que je remercie ma promotrice **M^{me} O.MALEK - HADDAD** pour la sollicitude avec laquelle elle a suivi et guidé ce travail. Pour sa disponibilité sans faille, ses précieux conseils, orientations brillantes et motivations, dont elle a fait preuve durant la réalisation de ce mémoire.*

Pour réaliser ce travail, plusieurs personnes nous ont assisté, chacune à sa manière. Il est opportun, à cette occasion, de leur réitérer nos remerciements :

*- j'adresse mes plus chaleureux remerciements à **M^{me} SI AHMED**, pour son aide et sa disponibilité.*

*- je remercie **Mr BOUHERRAOUA. Rachid**, pour son aide dans la réalisation de la partie expérimentale. Ainsi qu'aux messieurs **MAMMOU Mohand** (responsables du laboratoire de technologie de matériaux), **BOUKHEROUB. M^{ed} Ameziane** (chef de laboratoire de mécanique des sols).*

- je remercie très vivement mon fiancé Mokrane qui m'a soutenu et aider pour aller au bout de mes études et qui m'a toujours accompagné dans mes airs.

Je tiens à remercier chaleureusement tous les enseignants de la faculté de génie civil, qui nous ont enrichis de connaissances et de savoir, ainsi aux responsables de la bibliothèque, qui m'ont beaucoup facilité ma recherche bibliographique.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail, et qui me fera le plaisir d'apprécier.

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les bétons

Figure I- 1: Exemples de granulats d'origines différentes.	5
Figure I- 2: Illustration des granulats expansés : a, b l'argile ; c schiste.	7
Figure I- 3: Fuseaux préférentiels pour la granularité des sables pour béton selon la méthode de Dreux Gorisse [DRE 98].	12
Figure I- 4: Courbe de mélange optimum.	13
Figure I- 5: Test d'étalement d'un BAP.	17
Figure I- 6: Schématisation de la formation de voûtes au droit des armatures.	18
Figure I- 7: boîte en L.	19
Figure I-8 : Essai de stabilité au tamis.	19
Figure I-9 : Etalement en fonction du volume de pâte dans un BAP [YEN 99].	21
Figure I- 10: Mode d'action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment.	22
Figure I- 11: Etalement et viscosité en fonction du dosage en superplastifiant [HAD 07].	22
Figure I-12: Principe général de formulation d'un béton autoplaçant [HAD07].	23

Chapitre II : La durabilité des bétons

Figure II-1 : Représentation schématique d'un solide poreux	26
---	----

Chapitre III : Les déchets, les matériaux recyclés

Figure III- 1: Logo universel des matériaux recyclables.	37
--	----

Chapitre IV : Matériaux & formulation

Figure IV- 1 : Eprouvettes usagées trouvées au niveau de notre laboratoire.	47
Figure IV- 2 : Déchet de marbre récupéré.	47
Figure IV- 3 : Courbes granulaires des granulats naturels.	49
Figure IV- 4 : Courbes granulaires des granulats de recyclage et granulats naturels de classe 8/15.	49
Figure IV- 5 : granulats naturels, granulats de béton de démolition de fraction (8/15).	51
Figure IV- 6 : Formes de granulats recyclés.	51
Figure IV- 7 : Schématisation de la mise en place du béton autoplaçant.	52

Chapitre V: Expérimentation & Exploitation

Figure V- 1 : Malaxeur utilisé.	55
Figure V- 2 : essai d'étalement.	56
Figure V- 3: Photo descriptive de l'essai de stabilité au tamis (le tamis est de 5 mm).	57

Liste des figures

Figure V- 4: Remplissage des éprouvettes, protection des éprouvettes d'un film plastique ; apparence des éprouvettes après le décoffrage, marquage des éprouvettes.	57
Figure V- 5 : Rupture de l'éprouvette ; La presse utilisée.	58
Figure V- 6 : Dispositif de chargement pour l'essai de fendage, rupture de l'éprouvette.	59
Figure V- 7 : Résistances à la compression du BAP de référence et des BAP à granulats de recyclage.	64
Figure V- 8 : Fuseau de tendance d'évolution de la résistance à la compression des BAP en fonction du pourcentage de substitution des gravillons de béton de démolition.	65
Figure V- 9 : Résistances en traction par fendage du BAP de référence et des BAP à granulats de	
Figure V- 10 : Fuseau de tendance d'évolution de la résistance en traction par fendage des BAP en fonction du pourcentage de substitution des gravillons de béton de démolition.	67
Figure V- 11 : Porosité ouverte (accessible à l'eau) des BAP.	68
Figure V-12 : Absorption d'eau par capillarité des BAP en fonction du temps (heures).	69
Figure V-13 : Observation de la répartition des granulats de quatre BAP.	70

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les bétons

Tableau I-1 : Dimension admissible D pour les gros granulats	14
Tableau I- 2: Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.	16
Tableau I- 3: Classification des BAP en fonction de leurs propriétés de l'état frais [HAD 07].	24

Chapitre III : Les déchets, les matériaux recyclés

Tableau III- 1: Quantités de débris issus des catastrophes naturelles en Algérie.	44
---	----

Chapitre IV : Matériaux & formulation

Tableau IV- 1 : Masses volumiques et coefficients d'absorption des différents granulats.	50
Tableau IV- 2: Nomenclature des formules de BAP à base de granulats de recyclage testés.	53
Tableau IV- 3 : Composition des différents bétons pour 1 m ³	53
Tableau IV- 4 : Caractéristiques des différentes compositions.	54

Chapitre V: Expérimentation & Exploitation

Tableau V- 1 : Propriétés à l'état frais des diverses formulations	61
Tableau V- 2 : Récapitulatif des résultats de résistances et des pesées des différents BAP	62
Tableau V- 3 : Résistances moyennes en compression des BAP et calcul d'écart types	63
Tableau V- 4 : Résistances moyennes des BAP et plages de variation des résistances	63
Tableau V- 5 : Récapitulatif des résultats de résistance en traction par fendage et poids des éprouvettes des BAP.	65
Tableau V- 6 : Résistances moyennes en compression des BAP et calcul d'écart types.	66
Tableau V-7: Résultats porosité accessible à l'eau (porosité ouverte) des BAP	68
Tableau V-8 : résultats des pesées et calcul de l'absorption par capillarité, sur plus de 24 heures, des éprouvettes des différentes formules de BAP.	69

Introduction générale

1

Chapitre I : Généralités sur les bétons

I-1 Généralités	4
I-2 Composants d'un béton	4
I-2-1 Le ciment	4
I-2-2 Les granulats (gravier et sable)	5
I-2-2-1 Granulats alluvionnaires	6
I-2-2-2 Granulats de roches massives	6
I-2-2-3 Granulats de transformation	7
I-2-2-4 Granulats de recyclage	7
I-2-3 Les adjuvants	8
I-2-3-1 Les fluidifiants (réducteur d'eau)	8
I-2-3-2 les retardateurs et accélérateurs de prise du ciment	8
I-2-3-3 Les entraîneurs d'air	9
I-2-4 Les additions minérales	9
I-2-5 L'eau	10
I-3 Formulation des bétons	10
I-3-1 Méthode de Bolomey	11
I-3-2 Méthode de Dreux Gorisse	11
I-3-2-1 Choix des granulats	11
I-3-2-2 Tracé de la courbe granulaire de référence	12
I-4 Critères de classification des bétons	14
I-4-1 La dimension maximale des granulats	14
I-4-2 La résistance mécanique du béton	15
I-4-3 La consistance (ouvrabilité)	15
I-4-4 Agressivité du milieu ambiant	16
I-5 Les bétons autoplaçants	16
I-6 Propriétés recherchées dans les BAP	17
I-6-1 Déformabilité libre	17
I-6-2 Déformabilité restreinte	18
I-6-3 Résistance à la ségrégation statique	19
I-6-4 Autres propriétés	20
I-7 Corrélation entre la composition et les propriétés d'un BAP frais	20
I-7-1 Phase granulaire	20
I-7-2 Phase visqueuse	21
I-7-3 Les adjuvants	21
I-7-3-1 Les superplastifiants	21

Sommaire

I-7-3-2 Les agents de viscosité	22
I-8 Formulation des BAP	23
I-9 Les BAP et leur utilisation	24
I-10 Conclusion	25

Chapitre II : La durabilité des bétons

II-1 Introduction	26
II-2 Dégradation des bétons	26
II-2-1 Principaux processus de dégradation chimique	27
II-2-1-1 La lixiviation ou l'hydrolyse (dissolution) des hydrates	27
II-2-1-2 Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif	27
II-2-1-3 Formation de produits expansifs	27
II-2-2 Cinétique de dégradation des matériaux	27
II-2-2-1 Porosité	28
II-2-2-2 Transfert de matière	28
II-2-3 Principales attaques chimiques	29
II-2-3-1 Attaque par la carbonatation	29
II-2-3-2 Attaque par les sulfates	30
II-2-3-3 Attaque par les chlorures	30
II-2-3-4 Attaque par les eaux (lixiviation)	30
II-2-3-5 Réaction alcali-granulats	31
II-3 Conclusion	32

Chapitre III : Les déchets, les matériaux recyclés

III-1 Introduction	33
III-2 Le secteur de la construction et l'environnement	33
III-3 Les déchets et le recyclage	35
III-3-1 Définition d'un déchet	35
III-3-2 Les différentes catégories de déchets	35
III-3-2-1 Déchets dangereux	35
III-3-2-2 Déchets non dangereux	35
III-3-2-3 Déchets inertes	36
III-3-3 La gestion des déchets	36
III-3-3-1 La valorisation de la matière	36
III-3-3-2 La valorisation énergétique	36
III-3-3-3 Le stockage	37
III-3-4 Développement du recyclage	37
III-3-5 Pourquoi le recyclage ?	38

Sommaire

III-4 Développement de la filiale du recyclage dans le génie civil	39
III-4-1 Définition des déchets de construction	39
III-4-2 Le recyclage dans la construction	39
III-4-3 Utilisation des matériaux recyclés dans les bétons	39
III-4-4 Produits de recyclage et domaine d'emploi	40
III-4-5 Les différentes phases du recyclage des matériaux de démolition	40
III-4-6 Exemple concret d'utilisation des matériaux recyclés	42
III-4-7 La filiale du recyclage dans le monde	42
III-4-8 Quelques chiffres des déchets de construction en Algérie	43
III-5 Difficultés de la filiale du recyclage dans la construction	44
III-6 Conclusion	45

Chapitre IV : Matériaux & formulation

IV-1 Introduction	46
IV-2 Matériaux et formulation	46
IV-2-1 Matériaux de base utilisés	46
IV-2-1-1 Ciment	46
IV-2-1-2 Granulats	46
IV-2-1-3 Le déchet de marbre broyé	47
IV-2-1-4 Le super-plastifiant	48
IV-2-1-5 Eau de gâchage	48
IV-2-2 Caractérisation des granulats	48
IV-2-2-1 Echantillonnage (NF P 18- 553)	48
IV-2-2-2 Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)	48
IV-2-2-3 Coefficient d'absorption et masses volumiques des granulats <NF P 18-555>	50
IV-2-3 Formulation du BAP de référence	51
IV-2-4 Formulation des autres BAP	52
IV-3 Conclusion	54

Chapitre V: Expérimentation & Exploitation

V-1 Introduction	55
V-2 Confection des bétons	55
V-2-1 Préparation de la gâchée	55
V-2-1-1 Etalement des BAP	56
V-2-1-3 Essai de la stabilité au tamis	56
V-2-2 Confection des éprouvettes	57
V-2-3 Essais sur les éprouvettes	58

Sommaire

V-2-3-1 Essais de résistance à la compression à 28 jours	58
V-2-3-2 Essais de traction par fendage	59
V-2-3-3 Porosité ouverte	60
V-2-3-4 Essai d'absorption par capillarité	60
V-3 Résultats de caractérisation des BAP à l'état frais et discussions	61
V-3-1 Résultats de caractérisation à l'état frais	61
V-3-2 Discussions des résultats de caractérisation à l'état frais	61
V-3-2-1 L'étalement des BAP	61
V-3-3-2 Essai de la stabilité au tamis	62
V-4 Résistances à la compression des BAP et comparaison	62
V-4-1 Résistances des BAP à 28 jours	62
V-4-2 Etude comparative de résistances en compression des BAP	64
V-5 Résistances en traction des BAP et comparaison	65
V-5-1 Résistances des BAP à 40 jours	65
V-5-2 Etude comparative de résistance en traction des BAP	66
V-6 Porosité ouverte des BAP et absorption capillaire des BAP	67
V-6-1 Porosité ouverte	67
V-6-2 Absorption capillaire des BAP	69
V-7 Vérification de l'absence de la ségrégation	70
V-8 Conclusions	71
<i>Conclusions générales</i>	72
Annexe 1 : Différents essais de laboratoire	74
Annexe 2 : Résultats des différents essais de caractérisation	79
Annexe 3 : Mode opératoire des essais de caractérisation des BAP	84
Annexe 4 : Fiche technique du super plastifiant	84
<i>Références bibliographiques</i>	87



Introduction générale

Introduction générale

Par ses bonnes performances en résistances mécaniques et en durabilité et son coût réduit, en comparaison aux autres matériaux de construction, le béton est de loin le matériau de construction le plus utilisé au monde. Le béton est utilisé par tous et pour tout type de construction, il en résulte une demande accrue en matériau de construction notamment en granulats naturels pour approvisionner les secteurs du bâtiment et des travaux publics.

Certes, les granulats naturels se trouvent d'une façon abondante dans la nature, granulats alluvionnaires ou de carrières..., mais leur extraction est soit nuisible à l'environnement ou bien revient à des coûts excessifs. En effet, l'éloignement des carrières des centres urbains où la demande en granulats est la plus importante, associé au frais de l'énergie qui ces dernières années atteignent des records ; énergie consommée en extraction ou en transport ; les granulats deviennent de plus en plus coûteux.

Par ailleurs, l'extraction des granulats de carrière a une grande incidence sur l'environnement, comme le déboisement et le changement de relief d'un massif et de paysage; l'extraction des granulats alluvionnaire (rivières et oueds) provoque la baisse de la nappe phréatique puis le séchage des sols aux alentours des ces rivières. Ces deux procédés d'extraction ont des incidences négatives sur la faune et la flore qui dépendaient de ces massifs de terres, et de ces eaux qui finissent par disparaître. En Algérie, la législation est devenue très sévère contre toute extraction abusive des granulats de rivière et des oueds.

Pour ces raisons, environnementales et économiques, il est devenu indispensable de trouver de nouvelles sources en granulats qui peuvent apporter des solutions alternatives. Les granulats de recyclage semblent être une des solutions. Les matériaux de démolition ou de chantier provenant de la démolition ou réhabilitation du vieux bâti sont en quantité croissante et ne sont éliminés que par l'utilisation en remblai ou la mise en décharges sauvages causant un impact sur l'environnement. Ce dernier constitue un paramètre essentiel du développement durable et sa préservation passe obligatoirement par le recyclage des gravats.

En Algérie, l'utilisation des granulats recyclés dans la production du béton n'a pas encore franchi le seuil des laboratoires, et ces études sont motivées par des besoins de formation et non sous l'impulsion d'ordre environnemental ou économique.

L'impact positif de la construction avec des BAP à matériaux de recyclage sur l'environnement est multiple :

Le premier avantage vient de l'utilisation des bétons auto-plaçant à la place des bétons vibrés. Les avantages du BAP sont divers : ils se mettent en place par simple versement quelque soit la forme de l'élément à réaliser, ils permettent donc de ne pas utiliser les engins de vibration et donc élimination des perturbations sonores afférentes. Par leur fluidité les BAP occupent tous

les volumes, ils permettent d'avoir des aspects de parements meilleurs, porosité de surface moindre et donc une meilleure durabilité. Par ailleurs, ils permettent de réduire des effectifs sur chantier...

L'utilisation des déchets de marbre pour la formulation des BAP offre une économie sur l'utilisation d'une grande quantité de ciment et d'agent de viscosité. En effet, pour la formulation des BAP nous avons besoin d'une grande quantité en particules fines pour assurer l'ouvrabilité requise dans les BAP. Habituellement, on utilise pour cela une grande quantité de ciment et un agent de viscosité. Le déchet de marbre offre donc une alternative très intéressante économiquement et sur le plan de résultats de formulation.

En Algérie et de part le monde, le vieux bâti est devenu non conforme aux normes de construction en vigueur ; sur le plan de résistance ou de confort. A ceux-là se rajoutent les constructions démolies par les catastrophes naturelles. Ainsi s'offre au monde un potentiel énorme en terme de granulats de substitution aux granulats naturels. Ces granulats sont donc soit du béton de démolition soit des déchets de maçonnerie, notamment maçonnerie brique. Le recyclage de ces matériaux offre plusieurs avantages majeurs :

- disparition des décharges sauvages, réduction des volumes dans les décharges,
- préservation de l'environnement en réduisant les volumes d'extraction des carrières, et des gisements alluvionnaires ;
- économie d'énergie soit par le transport, ou par l'extraction, puisqu'il s'agit de matériaux locaux.

La présente étude a pour objectif, de réaliser des bétons autoplaçant (BAP) à base de déchets de marbre et des granulats de béton de démolition, puis de comparer ses performances en terme de résistance mécanique et de durabilité à un BAP à base de granulats de carrières.

Notre travail est scindé en deux parties :

Première partie : le travail consiste à comparer les résultats de résistance en compression à 28 jours et en traction par fendage d'un BAP à base de granulats naturels à ceux des BAP à base de granulats de béton de démolition à plusieurs proportions.

Deuxième partie : le travail consiste en l'étude comparative de la porosité (ouverte) et de l'absorption capillaire du BAP à granulats naturels et un BAP à granulats de béton de démolition. Dans cette partie, comme les essais de durabilité sont très longs, on s'est intéressé au paramètre essentiel qui régit la dégradation des bétons soit la porosité. En effet, la porosité est le paramètre qui régit la propagation de matières agressives vers l'intérieur du béton par les différents phénomènes de transfert (pérméation, diffusion, migration).

Les granulats de recyclage sont composés d'une pâte durcie, et de granulats naturels. La pâte de ces granulats a déjà vieilli et présente une certaine porosité. Par cette étude, on souhaite avoir une idée comparative de la porosité des bétons formulés par ces granulats et les bétons à granulats naturels.

L'objectif dans cette deuxième étape est d'avoir une approche sur l'aspect de durabilité de ce nouveau produit à base de granulats de démolition.

Ce présent mémoire est organisé de la manière suivante :

Après l'introduction générale, ce présent document est composé de Cinq chapitres et une conclusion générale.

Au premier chapitre : nous avons fait un rappel des définitions fondamentales sur les bétons et les méthodes de formulation des bétons.

Nous avons repris les définitions des bétons autoplaçants et les principes de leur formulation.

Au deuxième chapitre : dans ce chapitre sont récapitulés certains aspects de durabilité ainsi que les définitions sommaires des différentes attaques chimiques des bétons.

Au troisième chapitre : nous avons fait une définition des déchets et rappelé l'importance du recyclage dans le domaine du génie civil.

Au quatrième chapitre : nous avons présenté les résultats de caractérisation des matériaux utilisés pour la composition de nos BAP et les méthodes utilisées pour leur caractérisation. Par la suite, nous avons illustré la méthode de formulation utilisée pour nos BAP.

Au cinquième chapitre : dans ce chapitre sont décrits les modes opératoires pour les essais réalisés sur les différentes formules de BAP. Nous avons, par la suite, présenté les résultats de caractérisation des résistances à la compression à 28 jours, et ceux de la résistance à la traction par fendage. Nous avons également donné les résultats de caractérisation de la porosité ouverte et de l'absorption par capillarité.

A la fin de ce chapitre nous avons fait une étude comparative entre les différents résultats obtenus sur les BAP à granulats naturels aux résultats obtenus pour les BAP formulés à plusieurs proportions en granulats de démolition.

En dernier, nous avons récapitulés nos conclusions sur le travail menés et proposé des perspectives.

Chapitre I

Généralités sur les bétons

I-1 Généralités

De nos jours, le béton est le produit industriel le plus utilisé dans le monde. Il est fabriqué puis mis en place en phase fluide, il durcit et se consolide dans un deuxième temps, ce qui permet des réalisations techniques extrêmement variées. Le béton est considéré comme une véritable pierre reconstituée analogue aux poudingues et aux conglomérats que l'on trouve dans certains sous-sols [DEL98, BAR 97, CTB 01]. Il présente des caractéristiques de résistance et de longévité particulièrement importantes. Il est utilisé dans plusieurs types de construction : bâtiment, ouvrages d'arts, monuments, assainissement, comme éléments de décoration...

Le béton est fabriqué soit sur chantier ou en centrale à béton. C'est un matériau composite résultant du mélange granulaire enrobé d'une matrice liante formée par l'hydratation du ciment. D'autres constituants peuvent être ajoutés pour obtenir des performances particulières à l'état frais ou bien durci. L'association de l'acier au béton augmente très fortement ses propriétés de résistance en traction et de ductilité et permet de réaliser des ouvrages de grande envergure.

I-2 Composants d'un béton

I-2-1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide [NEV 00, REG 82].

Le ciment est composé essentiellement de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO), la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Ces derniers se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Na₂O +K₂O et MgO, l'oxyde ferrique.

En fonction des résistances et de la durabilité souhaitées, on peut envisager d'utiliser des ciments à base d'additifs divers, voir les exemples ci-dessous [NEV 00] :

- CPA-CEM I : Ciment portland (95 à 100 % de clinker)
- CPJ-CEM II : Ciment portland au laitier (65 à 94 % de clinker et 6 à 35 % de laitier de haut fourneau)
- CPJ-CEMII : Ciment portland aux cendres volantes (65 à 79 % de clinker et 21 à 35 % de cendres volantes).

- CHF – CEMIII : Ciment portland au laitier de haut fourneau (5 à 64 % de clinker et 36 à 95 % de laitier de haut fourneau)
- ...

I-2-2 Les granulats (gravier et sable)

La taille des granulats est comprise entre 0 et 125 mm. Leur nature et leur forme varient en fonction des gisements et des techniques de leur production. Ils sont obtenus, soit en exploitant directement les alluvions détritiques non consolidées (sables et graviers des rivières); soit en concassant des roches massives (granites, diorites, basaltes, calcaires, quartzites). On distingue quatre catégories de granulats en fonction de leur provenance :

- Les granulats d’origine alluvionnaire ;
- Les granulats de roches massives ;
- Les granulats de transformation ;
- Les granulats de recyclage.



Figure I- 1: Exemples de granulats d’origines différentes.

Les granulats ont des effets sur la résistance mécanique et sur la consistance du béton de plusieurs manières [LAR 87, LAR 00] :

- Par leurs propriétés de résistances mécaniques ;
- Par leur capacité d’adhérence la pâte liante (pâte de ciment) ;
- Par la forme de ces granulats (roulés, concassés et semi-concassés) ;
- Par leur granulométrie et le leur diamètre maximal ;
- Par la compacité du mélange granulaire formé ;
- ...

I-2-2-1 Granulats alluvionnaires

Les gisements les plus habituels sont les lits de rivières déposés par les cours d'eau et les fonds marins. En fonction de la situation du gisement par rapport à la hauteur du cours d'eau ou de la nappe phréatique de l'endroit, l'exploitation a lieu soit à sec ou dans l'eau. La forme de ces granulats est roulée. Cette forme est acquise par l'érosion. Ces granulats sont criblés (séparés) en différentes classes granulaires. On peut distinguer :

- Sables et graviers alluvionnaires fluviaux : siliceux ou silico-calcaires déposés par les cours d'eau pendant l'ère quaternaire. Ils sont exploités tout au long du réseau hydrographique.
- Alluvions marines : exploitées entre 10 et 30 mètres de profondeur sur le plateau continental. Ces granulats ne sont immergés que depuis quelques milliers d'années par suite de la remontée du niveau marin après la dernière glaciation (époque actuelle). En réalité, il s'agit d'anciennes alluvions fluviales et littorales.
- Couches de sables ou de sablons, roches sédimentaires non consolidées : déposées il y a des millions d'années.

I-2-2-2 Granulats de roches massives

Les gisements de roches massives (carrières) correspondent à une multitude de situations géologiques (couches plus ou moins épaisses, filons, épanchements volcaniques, massifs de granite...) et à des localisations géographiques très différentes. La carrière peut être implantée en plaine sur un plateau ou en montagne au bord d'une falaise. L'exploitation s'effectue à flanc de coteau ou en puits, en fonction de la situation du niveau géologique utile. On peut ainsi extraire et produire des granulats avec des roches éruptives, des roches métamorphiques et des roches sédimentaires consolidées (calcaires...).

Ces granulats sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré-criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage... On peut distinguer :

- Roches sédimentaires consolidées telles que les calcaires ou les de grès. On les exploite dans les bassins sédimentaires et dans les régions montagneuses.
- Roches métamorphiques dures telles que les quartzites ou les gneiss. Elles affleurent plus particulièrement dans les massifs montagneux anciens.
- Roches éruptives anciennes. Il s'agit de roches plutoniques à cristaux plus ou moins développés (granites, diorites, micro-diorites, gabbros...) ou de roches volcaniques (rhyolites...), exploitées dans les massifs montagneux anciens avec une répartition géographique analogue à celle des roches.

- Roches volcaniques récentes telles que le basalte, le trachyte ou l'andésite ; roches épanchées par le volcanisme récent du massif Central.

I-2-2-3 Granulats de transformation

Les granulats de transformation sont souvent d'origine minérale résultant d'un procédé de transformation industriel comprenant des modifications thermiques (cuisson) ou chimiques. Dans cette catégorie se rangent les granulats légers transformés, comme l'argile expansée (Figure I- 2 a et b), le schiste expansé (Figure I- 2 c).

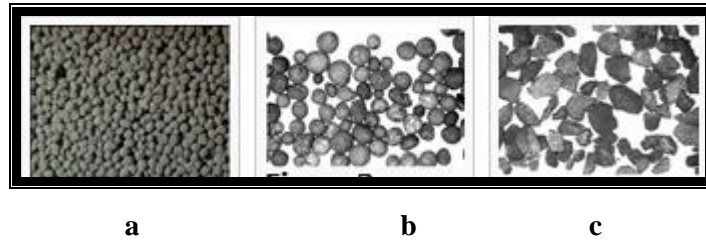


Figure I- 2: Illustration des granulats expansés : a, b l'argile ; c schiste.

La cuisson à haute température (1000 à 1200 °C), dans un four rotatif, de nodules d'argile ou de schiste produit d'une part un dégagement gazeux au sein de chaque nodule sous l'effet de réactions chimiques, ce qui entraîne l'expansion du nodule, d'autre part une vitrification de la couche externe. On obtient alors un granulat plus gros, avec une grande porosité, donc plus léger.

I-2-2-4 Granulats de recyclage

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne. Depuis, plusieurs recherches ont été menées de part le monde pour développer et promouvoir la réutilisation de ces déchets dans le secteur du bâtiment.

De nos jours, le recyclage des déchets du secteur du génie civil, notamment à la démolition, constitue une part non négligeable à la production de granulats et peut donc être considéré comme un véritable gisement. Le déchet à récupérer subit des traitements divers (concassage, tri, calibrage, nettoyage...) pour le rendre apte pour l'utilisation.



Ces déchets peuvent être du béton démoli (déchets du bâtiment, des plates formes des aéroports en béton, chaussées des routes en béton etc.), déchets de brique du bâtiment, ou déchets des éléments de trottoir, refus de l'industrie du béton disponibles sur les sites de préfabrication, filières de récupération particulières (traverses de voies ferrées ou poteaux électriques), sous-produits de l'industrie (laitiers de hauts-fourneaux, mâchefers...).

L'utilisation des granulats recyclés a une grande importance du point de vue environnemental car d'un côté elle permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions ; démolition due soit aux catastrophes naturelles soit à la démolition du vieux bâtis, donc participer à réduire les décharges dans la nature. De l'autre côté, leur réutilisation permet de protéger la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats naturels.

I-2-3 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités permettent d'améliorer certaines de ces propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans le béton [AIT 92, PAI 82]. Les principaux adjuvants sont :

I-2-3-1 Les fluidifiants (réducteur d'eau)

Ces produits jouent un double rôle. Ils sont utilisés soit pour fluidifier le béton en maintenant le rapport (Eau / Ciment) constant (rapport prévu pour une résistance donnée), donc fluidifier sans apport additionnel d'eau. Ou bien, réduire le rapport (Eau / Ciment) pour avoir de meilleurs résistance tout en ayant la même fluidité du béton [KAN 80].

Dans le premier cas, l'ajout du fluidifiant va nous permettre d'avoir des bétons de même classe de résistance mais de consistance variable allant d'un béton ferme, béton plastique, béton très plastique jusqu'au BAP. Dans le cas des BAP on utilise les super-plastifiants qui sont des fluidifiants très puissants.

La durée d'action des fluidifiants est très variable, on la choisit courte pour les bétons fabriqués sur chantier et longue pour les bétons fabriqués en centrales à béton. Pour ce dernier, le béton doit rester fluide toute au long de la durée du transport, jusqu'à la mise en place.

Le mode d'action de ces fluidifiants est décrit au paragraphe (I-7-3-1). La quantité de fluidifiant à introduire dans une formule de béton ne doit pas être trop élevée (proche du dosage à saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Le dosage à saturation des superplastifiant est déterminé au laboratoire à partir d'essais sur des mortiers (ou bétons) frais.

I-2-3-2 les retardateurs et accélérateurs de prise du ciment

Les réactions d'hydratation sont exothermiques, elles sont accélérées par l'apport de chaleur. Ainsi le bétonnage en temps chaud ou bien d'éléments massifs (où la température au cœur du béton peut atteindre 80°C) accélère la cinétique d'hydratation du ciment. Inversement, le bétonnage en temps froid ralentit les réactions d'hydratation du ciment. Ainsi, ces modifications dans les temps d'hydratation du ciment est parfois défavorable. En effet, l'accélération des réactions d'hydratation a des effets négatifs sur les résistances à long terme du béton. Dans le cas des ouvrages massifs, il y a apparition précoce de la fissuration. A l'inverse le bétonnage en temps froid entraîne du retard sur les durées du décoffrage.

Pour remédier à ces difficultés il est donc conseillé d'utiliser des retardateurs ou accélérateurs de prise. Ainsi, dans le cas du bétonnage en temps chaud ou bien d'éléments massifs, il est conseillé

d'utiliser un retardateur de prise pour freiner les réactions d'hydratation et aussi réduire la chaleur au cœur du béton, de manière à ce que les propriétés du béton soient préservées et le béton ne fissure pas. Pour le bétonnage en temps froid, il est conseillé d'utiliser les accélérateurs de prise pour cette fois-ci provoquer les réactions d'hydratation et accélérer le durcissement du béton freiné par la température ambiante.

Les retardateurs de prise peuvent être utilisés en cas de reprise de bétonnage: grâce aux retardateurs de prise il est possible d'effectuer des reprises de bétonnage après plusieurs heures d'interruption avec certaines précautions (protection contre la dessiccation). Aussi, pour le transport de longue durée du béton : l'utilisation de retardateur de prise permet de transporter sans problème tous les bétons sur de grandes distances quelles que soient les conditions (températures, risques d'embouteillage, etc).

Les accélérateurs de prise sont utilisés dans les bétons de préfabrication car ils permettent d'atteindre des résistances convenables au jeune âge, cela permet de réduire le temps d'étuvage et accélère donc le processus de fabrication. Les accélérateurs de prise permettent de réduire les délais de chantier, car ils permettent d'atteindre les résistances prévues pour 28 jours à des âges avancés. Mais il faut faire attention à la résistance à plus long terme, qui elle va en baisse par rapport à celle d'un béton sans accélérateurs de prise.

I-2-3-3 Les entraîneurs d'air

Permettent d'entraîner, à l'intérieur du béton, des microbulles d'air réparties en volume qui serviront d'espace d'expansion dans le béton durci. Ces microbulles permettent d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel et du dégel. Il améliore la résistance du béton sous l'action des incendies.

Un des modes d'action de ces microbulles peut être décrit comme suit : dans le cas du gel, l'eau contenue à l'intérieure du béton gèle et augmente de volume puis crée des surpressions à l'intérieur des pores du béton et par la suite une fissuration ; la présence des microbulles permet de freiner le développement des fissures et la dégradation du béton est arrêtée.

C'est le même mode d'action qui se développe lors des incendies, dans ce cas l'eau contenue dans les pores fermés se transforme en gaz, ce gaz et avec l'augmentation de la température provoque des surpressions sur les parois des pores et donc de la fissuration. Pour les bétons devant résister aux cycles de gel et de dégel, la teneur en air occlus doit se situer entre 4 et 6 %.

I-2-4 Les additions minérales

Il existe deux catégories de fines minérales :

- Les fines actives à caractère pouzzolanique ; ce sont des particules de faibles diamètres qui, ajoutées en quantités de l'ordre de 10 % du poids de ciment, améliorent notablement les performances de résistances et de durabilité du béton grâce à leurs propriétés pouzzolanique (cendres volantes, fumée de silice, laitier...) [NEV 00, KAR 02].

- Les fines inertes comme les fillers calcaire. L'objectif dans leur utilisation est double ; soit d'améliorer la compacité des bétons et donc sa résistance ; soit d'améliorer la consistance des bétons notamment dans le cas des bétons autoplaçants qui nécessite une forte teneur en fines pour assurer au BAP un compromis entre une bonne fluidité apportée par les fluidifiant et une bonne viscosité que l'on essaye d'avoir par l'introduction des fillers.

I-2-5 L'eau

L'eau est indispensable à la fabrication du béton. C'est d'elle que dépendent en grande partie la cohésion et la résistance de ce matériau de construction omniprésent. Associée au ciment, l'eau remplit deux fonctions : d'une part elle sert à l'hydratation du ciment et d'autre part elle permet la fluidification de la pâte.

I-3 Formulation des bétons

La formulation d'un béton ordinaire (vibré ou autoplaçant) consiste à définir les proportions de ces différents constituants. La formulation des bétons dépend des propriétés de mise en œuvre, mécaniques et de durabilité souhaitées [BAR 97, DRE 98, DEL 00]. Toutes les méthodes de formulation suivent les mêmes grandes lignes résumées comme suit :

- Choix du squelette granulaire (gravillons et sable) et du diamètre maximal des granulats ; le squelette doit être validé par un fuseau granulaire de béton correspondant au type de béton espéré. Un fuseau granulaire est obtenu par rassemblement des courbes granulaires des bétons de qualité, qui ont fait preuves dans des projets antérieurs.
- Choix de la nature du ciment et du rapport eau / ciment ;
- Choix de la quantité de ciment et donc du volume des granulats ;
- Choix des adjuvants ;
- Recherche par le biais d'essais expérimentaux des dosages en adjuvants.

Quand à la nature des granulats, souvent elle est imposée par les carrières qui fournissent la région où le béton doit être produit.

Il existe plusieurs méthodes de formulation des bétons, méthode de Bolomey, méthode d'Abrams, de Faury, de Valette, de Joisel... Dans la partie qui suit on rappelle les grandes lignes de la méthode de Bolomey et de **Dreux Gorisse**, méthodes les plus utilisées en Algérie.

Pour les BAP plusieurs approches de formulation ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise basées sur l'optimisation du mortier du béton, approche suédoise basées sur l'optimisation du volume de pâte dans le béton, approche du LCPC basée sur l'optimisation du squelette granulaire, ...) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton. Pour plus de détails sur la formulation des BAP voir le paragraphe (I-8).

I-3-1 Méthode de Bolomey

La formulation en terme de résistance à la compression, la méthode est basée sur la relation suivante :

$$R_{cb} = R_{cc} \times G \left[\frac{C}{(E + Air)} - 0,5 \right]$$

R_{cb} : résistance à la compression du béton, R_{cc} : résistance caractéristique à la compression du ciment, C : quantité ciment, E : quantité d'eau efficace (≤ 200 litres), Air : volume d'air (en litre), G : coefficient de qualité des granulaire.

La formulation du squelette granulaire du béton, ciment compris, est cherchée de façon à ce qu'elle soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique obtenue par la formule suivante-[DRE 98] :

$$p = A + (100 - A)\sqrt{d/D}$$

A : varie de 8 à 16, il est d'autant plus élevé que le dosage en ciment est plus fort. P : est le pourcentage de grains passant au tamis de diamètre d , D : est le diamètre du plus gros grain.

Cette méthode aboutit théoriquement plus au moins à une granularité continue.

I-3-2 Méthode de Dreux Gorisse

Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations déjà validées sur chantier et ayant donné satisfaction. Elle est très simple d'utilisation, elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats [DRE 98]. Les étapes de la méthode sont récapitulées dans les paragraphes suivants.

I-3-2-1 Choix des granulats

Le choix du sable à utiliser est d'une grande importance. Par cette méthode, il est conseillé d'utiliser des sables roulés car ils conduisent aux meilleurs résultats du point de vue maniabilité. La courbe granulométrique du sable doit se situer dans le fuseau A des courbes de la Figure I- 3, ce qui correspond à un module de finesse (MF) compris entre 2,2 et 2,8.

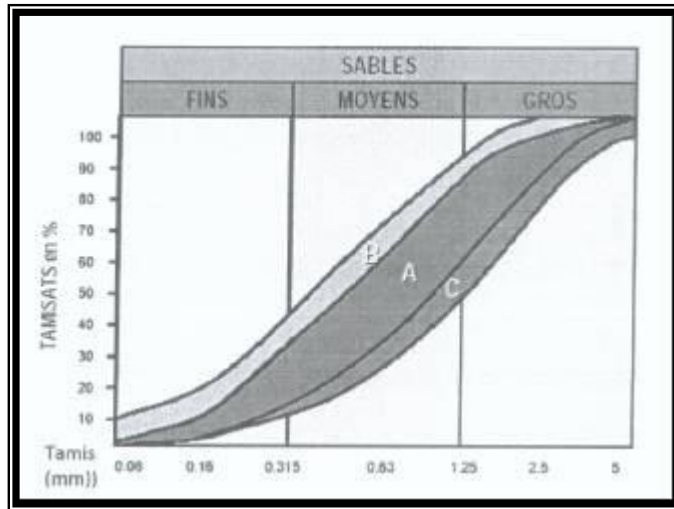


Figure I- 3: Fuseaux préférentiels pour la granularité des sables pour béton selon la méthode de Dreux Gorisse [DRE 98].

Le fuseau A correspond au sable préférentiel, MF de 2,20 à 2,80.

Le fuseau B correspond au sable trop fin, MF de 1,80 à 2,20 (induit à l'augmentation du dosage en eau).

Le fuseau C correspond au sable trop grossier, MF de 2,80 à 3,20.

Il est à noter : qu'un sable grossier (fuseau C) risque d'entraîner une moins bonne maniabilité et une possible ségrégation et qu'un sable fin (fuseau B) nécessite une grande quantité d'eau pour humidifier le sable donc améliorer la maniabilité, ce qui peut pénaliser la résistance mécanique du béton.

Il est toujours possible de modifier le module de finesse d'un sable par l'adjonction d'un deuxième sable de module de finesse différent. Soit MF le module de finesse visé et MF1 le module de finesse du sable (S1) dont on dispose.

Si $MF_1 > MF$ il faut trouver un sable S2 de module de finesse $MF_2 > MF$ et les combiner dans les proportions S1 et S2 indiquées ci-dessous :

$$S_1 = \frac{MF - MF_2}{MF_1 - MF_2} \quad ; \quad S_2 = \frac{MF_1 - MF}{MF_1 - MF_2}$$

I-3-1-2 Tracé de la courbe granulaire de référence

La composition granulométrique optimale est représenté par une ligne brisée OAB voir figure suivante :

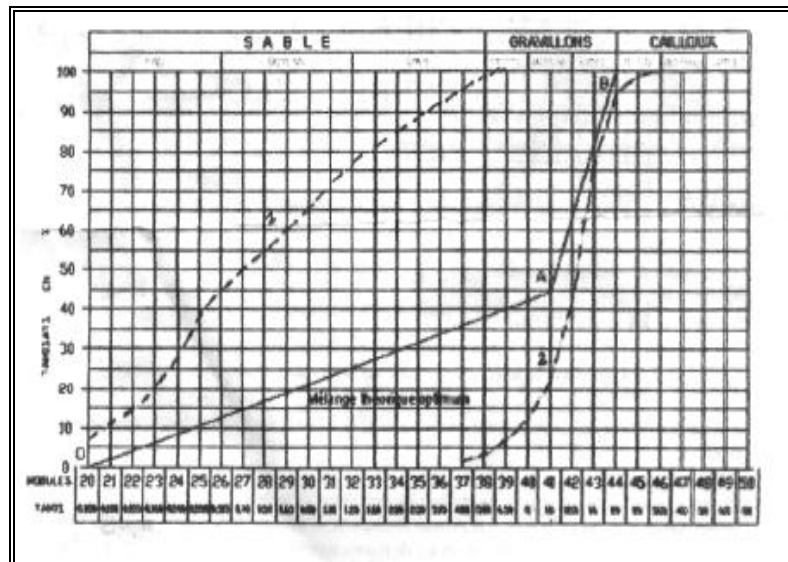


Figure I- 4: Courbe de mélange optimum.

Le point (B) (à l'ordonnée 100%) est confondu avec le point d'ordonnée 100 % de la courbe granulométrique du plus gros granulat. Le point de brisure (A) a les coordonnées ainsi définies :

En abscisse :

Si $D \leq 20$ mm, l'abscisse est $D/2$.

Si $D \geq 20$ mm, l'abscisse est située au milieu du segment délimité par D et par le tamis de 5 mm.

D : dimension des plus gros grains du squelette granulaire retenu par la méthode de Dreux-Gorisse, est telle que le refus sur le tamis correspondant soit le plus proche possible de 8%.

En ordonnée :

$$y = 50 - \sqrt{D} + K$$

K : terme correcteur qui dépend : du dosage en ciment, de l'efficacité de serrage à la mise en place (vibration); de la forme des granulats et du module de finesse MF du sable.

Dans le cas d'une vibration normale du béton et des dosages habituellement utilisés en ciment.

$K = 6 MF - 15$ Si le sable est roulé ;

$K = 6 MF - 13$ Si le sable est concassé.

Une fois la courbe granulaire de référence est définie, reste à définir les proportions du gravier et du sable qui vont permettre d'approcher au plus près cette courbe.

I-4 Critères de classification des bétons

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui en béton armé ont des propriétés très disparates tant par leur destination que par leurs dimensions, leur durée de vie ..., toute étude de composition de béton doit en tenir compte. Il convient donc d'en définir avec une grande clarté le cahier des charges qui contient les critères de la composition du souhaité en fonction de l'usage envisagé de l'ouvrage prévu.

Quatre critères se distinguent et doivent être retenus [DRE 98] :

- la dimension maximale des granulats ;
- les propriétés mécaniques (souvent : résistance caractéristique à la compression) ;
- l'ouvrabilité (affaissement, étalement);
- l'agressivité du milieu ambiant (durabilité).

I-4-1 La dimension maximale des granulats

La dimension maximale des granulats d'un béton, D , correspond à la dimension maximale du plus gros granulats considéré séparément : elle se détermine par tamisage et sa valeur est telle que le pourcentage de refus sur le tamis de mailles D_{mm} soit compris entre 1 % et 15 % (Norme NF P 18-541)

Pour les bétons non armés le diamètre maximal des granulats dépend essentiellement de la fonction envisagée du béton, et des volumes prévus par les coffrages (gros béton, béton de propreté...). Dans ces cas le diamètre maximal des granulats peut atteindre les 20 centimètres.

Pour les bétons armés, cette dimension dépend essentiellement de l'espacement entre les barres de ferrailage (confinement, encombrement) et de leur densité, mais aussi l'enrobage et du diamètre des barres d'acier [BAEL 91, BAR 99].

Dans tous les cas, le diamètre maximal est choisi de manière à assurer le bétonnage correct des éléments en béton armé et précontraint, il est donc décrit dans les documents normatifs en vigueur.

Le tableau I-1 résume quelques règles à respecter pour définir une valeur admissible de D .

Tableau I-1 : Dimension admissible D pour les gros granulats.

Caractéristiques de la pièce à bétonner	Valeur maximale de D
e espacement entre armatures principales	e
r rayon moyen des mailles de ferrailage	$0,8r$
R rayon moyen du moule	R
h_m épaisseur minimale de la pièce	$h_m/5$

Le rayon moyen r d'une maille de ferrailage est le rapport entre la surface de la maille et son périmètre ; le rayon moyen R du moule est le rapport entre le volume à remplir dans la zone la plus ferrillée et la surface de coffrage et d'armatures en contact avec le béton.

I-4-2 La résistance mécanique du béton

On a vu au paragraphe formulation des bétons, que la résistance mécanique dépend principalement de la nature du ciment et du rapport eau/ciment ; ainsi dans les cahiers des charges, souvent la résistance mécanique à la compression du béton est toujours imposée. En effet, pour l'étude de tout projet de construction il est impératif de prévoir au préalable la résistance du béton avec lequel sera construit l'ouvrage. Cette valeur est fonction de nature de l'ouvrage et des sollicitations auxquels il sera sujet (ouvrage d'art, bâtiment industriel, habitation, stockage, en région sismique, neigeuse...).

Il existe différentes classes de bétons ordinaires, leur désignation est indiquée par la lettre B suivie d'un chiffre qui donne une indication de leur résistance exprimée en MPa (B16, B20, B25, B30, B35, B40...).

Mais en plus des bétons à résistance ordinaires, on trouve également des BHP (béton à haute performance) pour qui les résistances peuvent atteindre les 100 MPa et les BTHP (bétons à très haute performance) dont les résistances dépassent les 120 MPa. Toutes fois ces bétons sont à coût très élevés, et nécessite un grand savoir faire.

En Algérie, dans le règlement parasismique Algérien 99 version 2003, la résistance caractéristique des bétons est imposée dans une plage comme suit : $20 \text{ MPa} \leq R_{c28j} \leq 40 \text{ MPa}$. La valeur minimale est imposée pour garantir une qualité des matériaux, la valeur maximale est imposée, car au-delà de 40 MPa le béton devient moins ductile et dissipe mal l'énergie sismique.

Ainsi, la résistance caractéristique doit être validée en laboratoire selon les normes en vigueur en Algérie et en fonction des constituants de la formule finale à utiliser. Cette résistance caractéristique se calcule d'après des résultats sur éprouvettes de contrôle (soumises à la rupture) en déduisant de la moyenne k fois l'écart type (sur l'ensemble des valeurs). Il convient donc que l'on vise dans l'étude du béton une valeur moyenne probable supérieure à la résistance caractéristique exigée.

D'après les règlements en vigueur, on prend pour k la valeur 0,85 à 1,2 en général et selon les cas; il convient donc de viser une résistance moyenne d'environ 15 à 20 % supérieure à la résistance caractéristique exigée.

Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et à son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (proportion gravier/sable).

I-4-3 La consistance (ouvrabilité)

L'ouvrabilité d'un béton correspond à son aptitude à se mettre en place compte tenu de son utilisation dans un ouvrage donné et en fonction des moyens de mise en œuvre et des ces propres caractéristiques. La consistance est souvent mesurée par le cône d'Abrams (affaissement

ou étalement), mais elle peut également être mesurée à l'aide du maniabilimètre, à la table à secousse, plasticimètre... L'ouvrabilité est, pour le béton, une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de composition et de mise en œuvre.

Les bétons sont classés comme suit :

Tableau I- 2: Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.

Consistance du béton	Affaissement (cm)	Serrage nécessaire
Très ferme	2	Vibration puissante
Ferme	3 à 5	Bonne vibration
Plastique	6 à 9	Vibration normale
Très plastique	10 à 15	Simple piquage
Fluide	≥ 16	Léger piquage

Lorsque l'affaissement est total, on parlera alors d'un béton autoplaçant. Dans ce cas, on mesure le diamètre moyen (étalement) de la galette de béton formée. Les bétons autoplaçants ont généralement un étalement compris entre 55 et 75 cm

I-4-4 Agressivité du milieu ambiant

La présence de risques environnementaux agressifs (eaux agressives, fortes teneur en gaz carbonique, milieux acides, présence de chlorures, ...) et les conditions d'exploitation spécifiques (revêtement de fours ou incendies, conditions météorologiques extrêmes : gels sévères) sont des considérations qui conditionnent la durée de vie de l'ouvrage, et donc la composition du béton (type de ciment, rapport eau/ ciment, nature minéralogique des granulats, utilisation des additions minérales à caractère pouzzolanique, et éventuellement d'adjuvant).

En vue de l'objectif de durabilité, le choix de la classe de résistance du béton est en fonction de l'agressivité du milieu, elle est d'autant plus élevée que le milieu est plus agressif. Cela signifie que l'exigence de durabilité peut parfois déterminer la résistance à prendre.

On peut considérer qu'un niveau de résistance adapté au milieu environnant est un premier critère de qualité qui doit cependant être complété par d'autres conditions, en effet, tous les bétons de même résistance à la compression ne sont pas également durables.

I-5 Les bétons autoplaçants

Un béton autoplaçant (BAP) est un béton qui se met en place sans vibration, par simple versement. Les BAP constituent une alternative intéressante pour les bétons vibrés ; leurs caractéristiques font que leur utilisation est très variée et parfois plus avantageuse que celles des bétons vibrés. En effet, par leur composition (forte teneur en fines, volume de gravillons réduit...) ils assurent des qualités de parement meilleures que dans le cas des bétons vibrés, ils offrent une meilleure mise en place dans les coffrages à géométries complexes et à fort

confinement, la suppression de la vibration du béton permet une réduction des nuisances sonores sur chantier et la réduction de l'effectif en personnel [AFGC 00, TEG 05, HAD07].

En 2005, un premier guide européen intitulé « The European guideline for self compacting concrete : specification, production and use » sur les BAP est publié [TEG 05]. Dans ce guide sont décrites les spécifications des BAP mais surtout les méthodes et essais de leur caractérisation à l'état frais ou bien lors de leur mise en place.

À l'état durci, les BAP sont régis par les mêmes réglementations que les bétons vibrés.

I-6 Propriétés recherchées dans les BAP

Les principales propriétés auxquelles devront répondre les BAP, à l'état frais, peuvent être subdivisées en trois catégories [SKA 99, TEG 05, SCH 05] :

I-6-1 Déformabilité libre

La déformabilité libre est définie comme étant l'aptitude qu'a un BAP à se mettre en place sans apport de vibration. Un BAP doit avoir une bonne capacité de remplissage et réduire au maximum la formation des vides aux coins des coffrages.

L'essai le plus utilisé pour caractériser la déformabilité libre d'un BAP est l'essai au cône d'Abrams.

Essai au cône d'Abrams

L'ouvrabilité d'un béton est souvent imposée par un cahier des charges dans le but d'assurer une bonne mise en place. Dans le cas des BAP, c'est l'étalement qui est utilisé comme indicateur d'ouvrabilité (Figure I- 5). L'étalement est la moyenne d'au moins deux mesures de diamètres de la galette de béton qui se forme après le soulèvement du cône d'Abrams (diamètre maximal et diamètre perpendiculaire, souvent exprimé en mm) et à un temps suffisamment long pour que le béton arrête de s'étaler (étalement final).

Pour les BAP, les recommandations préconisent un étalement dans une plage de 550 à 850 mm.

Le guide Européen sur les BAP définit les différentes classes de BAP comme suit [TEG 05] :

Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm ;

Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm ;

Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm.



Figure I- 5: Test d'étalement d'un BAP.

En plus de la mesure d'étalement, on peut également mesurer le temps au bout duquel le béton cesse de s'étaler ainsi que le temps T500 qui correspond à 500 mm d'étalement après soulèvement du cône. Chacune de ces mesures donne un renseignement différent sur le béton. Le temps T500 et le temps final sont deux indicateurs de la viscosité du béton. Quant à l'étalement final, il permet d'estimer le seuil de cisaillement du béton.

Une appréciation visuelle de la galette permet d'avoir des indications sur l'état de ségrégation du béton. En effet, la formation d'un nid de cailloux au centre de la galette ou d'un halo de pâte à la périphérie de la galette de béton, lors de l'essai, sont des signes de ségrégation du béton.

I-6-2 Déformabilité restreinte

La déformabilité restreinte se traduit par la capacité qu'a un BAP à traverser, sans blocage, ni formation de voûtes au voisinage des armatures. Cette propriété est aussi appelée résistance à la ségrégation dynamique. Lors de l'écoulement d'un BAP, les risques de séparation de la phase granulaire de la pâte sont très élevés, notamment en présence d'armatures. Au coulage du béton, la trajectoire des granulats se trouve modifiée, les granulats ont tendance à converger vers les mêmes endroits en formant des voûtes au voisinage des armatures (figure I-6) bloquant alors l'écoulement du béton.

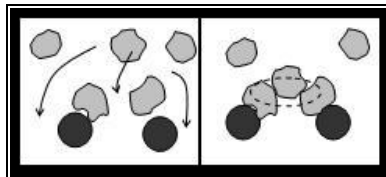


Figure I- 6: Schématisation de la formation de voûtes au droit des armatures.

Parmi les essais développés pour caractériser la déformabilité restreinte des BAP, il y a la boîte en L décrit au paragraphe suivant.

Boîte en L : C'est un essai d'écoulement qui permet de caractériser la capacité de remplissage d'un béton, sans blocage, sous son propre poids. Cet essai simule les conditions réelles d'écoulement du béton dans des coffrages ferrailés, et permet d'apprécier le béton par l'intermédiaire d'une valeur mesurable.

La boîte en forme de L est composée de deux compartiments séparés par une trappe, empêchant le passage du béton avant essai, et d'armatures intercalées devant la trappe (figure I-7). Le guide européen sur les BAP recommande de choisir le nombre de barreaux à placer devant la trappe en fonction de la structure à réaliser : trois barreaux de fer rugueuses à espacement de 41 ± 1 mm pour la caractérisation des BAP d'ouvrages très ferrailés ; deux barreaux de fer à espacement de 59 ± 1 mm pour le restant des ouvrages.

Le mode opératoire de l'essai peut être décrit comme suit : un échantillon d'environ 13 litres de béton frais est versé dans le compartiment amont de l'appareil. Après arasement l'échantillon est laissé au repos pendant 1 minute. La trappe est ensuite tirée afin de laisser le béton s'écouler à

travers les armatures. A la fin de l'essai, on mesure le **dénivelé** entre la partie verticale et l'extrémité aval de la partie horizontale [H_2 / H_1] (voir Figure I- 7).

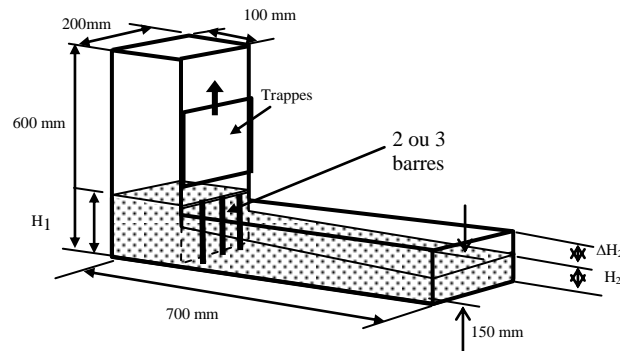


Figure I- 7: boîte en L.

Les BAP sont classés en deux catégories selon que l'on utilise 2 ou 3 barreaux de fer :

Classe PA1 $\geq 80\%$ avec deux barreaux

Classe PA2 $\geq 80\%$ avec trois barreaux.

Une dénivelée inférieure à 80 % indique un risque de blocage du BAP et une séparation de phases : amoncellement des granulats au droit des armatures et écoulement de la pâte de travers.

I-6-3 Résistance à la ségrégation statique

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

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

Pour caractériser la ségrégation statique d'un BAP on utilise l'essai de stabilité au tamis.

Essai de stabilité au tamis : L'essai consiste à garder un échantillon de 10 litres de béton frais au repos pendant une durée de 15 minutes. Après ce temps, un sous-échantillon de quantité de $(4,8 \pm 0,2)$ kg de cet échantillon est versé sur un tamis de 5 mm d'ouverture. Après deux minutes d'attente, la laitance qui traverse le tamis est alors pesée (voir figure I-8).

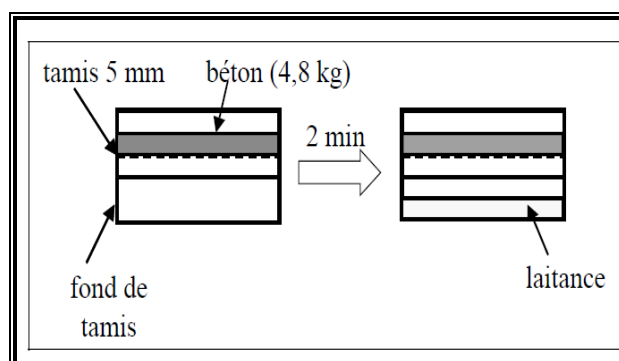


Figure I-8 : Essai de stabilité au tamis.

Le pourcentage de laitance par rapport au sous-échantillon est désigné comme l'Indice de Stabilité, et est calculé par la relation suivante :

$$IS = \frac{POIDS\ LAITANCE}{POIDS\ Sous\ ECHANTILLON} \times 100$$

La classification de la stabilité des BAP est donnée comme suit :

SR1 : $IS \leq 20 \%$,

SR2 : $IS \leq 15 \%$.

En dessous de 15 % la stabilité est satisfaisante. Toutefois, une stabilité inférieure à 5 % nécessite une attention particulière. Dans ce cas, la pâte ou le mortier est très visqueux pour s'infiltrer dans tous les vides granulaires et assurer une bonne qualité de parement. Au-delà de 20 % les BAP ont une mauvaise stabilité, ils sont inutilisables.

I-6-4 Autres propriétés

Nous venons de voir les propriétés qui qualifient un béton d'autoplaçant. Toutefois, le BAP comme les autres bétons doit répondre aux exigences habituellement recommandées dans les cahiers des charges comme la robustesse, maintien d'ouvrabilité dans le temps, pompabilité, résistance et durabilité, etc.

I-7 Corrélation entre la composition et les propriétés d'un BAP frais

Pour illustrer l'effet des éléments de composition sur les propriétés d'un BAP frais nous distinguons trois éléments principaux : la phase granulaire, la phase visqueuse et les adjuvants.

I-7-1 Phase granulaire

Les granulats influencent les propriétés des BAP de plusieurs manières : par leur volume par rapport au volume total du béton ; par leur diamètre maximal ; par leur distribution granulaire [NAN 01, SON 02].

Selon H. Okamura et M. Ouchi le volume de gravillons (diamètre compris entre 5 et 20 mm) à introduire dans un BAP ne devrait pas excéder les 50 % du volume solide du béton, et le volume du sable (diamètre inférieur à 5 mm) doit être inférieur à 40 % du volume du mortier de ce béton. Lorsque le volume des gravillons excède 50 % du volume solide l'énergie initialement nécessaire pour l'écoulement du béton est consommée par les contraintes de cohésion inter-granulaires favorisant ainsi la formation de voûtes (figure I- 6) [OKA 03].

Le diamètre maximal des granulats doit être choisi de sorte à éviter tous les risques de blocage de l'écoulement du béton. Plus ce diamètre est grand plus les risques de blocage en zones confinées sont importants. De même, plus le diamètre maximal est grand, plus les risques de pénétration dans la pâte, par l'effet de la gravité, sont importants.

D'après le guide européen sur les BAP, il est conseillé de limiter le diamètre maximal à des valeurs comprises entre 10 et 20 mm. De la même manière, il est conseillé de privilégier les granulats roulés par rapport aux granulats concassés, car les roulés par leur forme favorisent l'écoulement du béton [TEG 05, SKA 99].

I-7-2 Phase visqueuse

La phase visqueuse (pâte) regroupe l'eau, le ciment, les additions et les fines granulaires. Dans un BAP, la pâte doit être suffisamment fluide pour ne pas empêcher l'écoulement des granulats et suffisamment dense pour empêcher toute forme de ségrégation. De plus le volume de pâte à introduire dans le béton doit être égal au volume de la porosité du squelette augmenté d'un volume minimum de lubrification [YEN 99].

YEN et AL ont permis de mettre en évidence une corrélation linéaire entre le volume de pâte du béton et sa fluidité (figure I-9). Plus le volume de la pâte est grand, plus le béton est fluide.

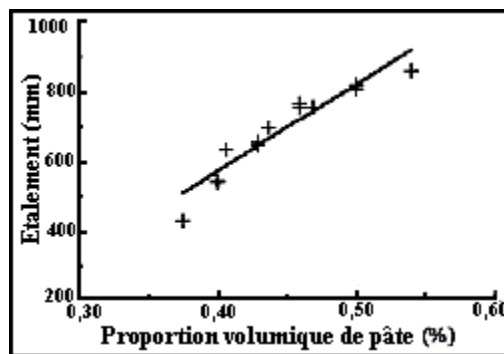


Figure I-9 : Etalement en fonction du volume de pâte dans un BAP [YEN 99].

La pâte joue aussi un rôle par sa viscosité, le volume de pâte à introduire dans un BAP est calculé de sorte à réduire les frottements inter-granulaires et à conférer au béton la fluidité souhaitée [HAD 07].

I-7-3 Les adjuvants

Pour atteindre une grande fluidité sans ségrégation, les méthodes de formulation des BAP préconisent de réduire le volume des gravillons et d'optimiser le volume des fines jusqu'à parfois 500 kg/m^3 . Or, une augmentation excessive des fines conduit à une grande viscosité du béton et à des difficultés de mise en place, sans parler des problèmes de surcoût engendrés [PAI 82]. L'introduction d'adjuvants fluidifiants ou viscosants est une solution souvent envisagée.

I-7-3-1 Les superplastifiants

Les superplastifiants sont des produits organiques souvent de synthèse. Ce sont des composés solides ou sous forme de solutions aqueuses à base de polymère formaldéhyde naphthalène sulfonate, polymère formaldéhyde mélamine sulfonate, carboxylates, polysaccharides [JOL 98, AIT 01, RAM 98]. Leur mode d'action peut-être décrit comme suit :

Lors du gâchage du béton, des floculats (amas) de grains de ciments se forment enfermant à l'intérieur des particules d'eau, eau qui se trouve alors piégée et donc ne participe pas à la fluidification du béton à l'état initial. On introduit alors les fluidifiants ou les super-plastifiants qui interagissent avec les particules du ciment en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation, et donc libérer l'eau initialement piégée. Cette eau est par la suite fournie pour fluidifier le béton et permet donc d'avoir une ouvrabilité meilleure.

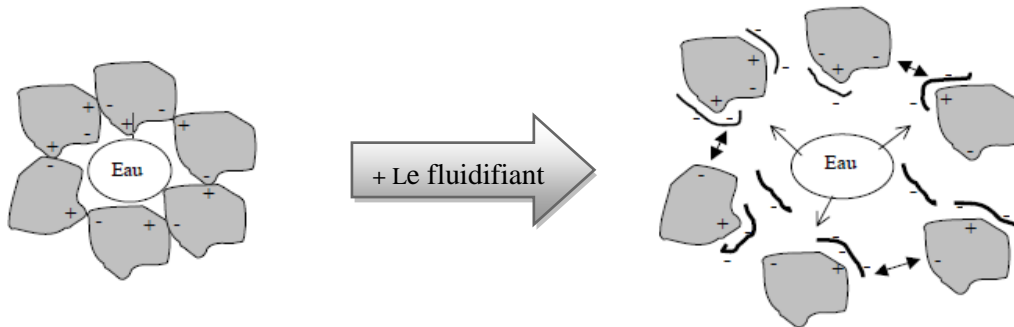


Figure I- 10: Mode d'action des super-plastifiants - Dégelation des grains de ciment.

Dans le cas des BAP, l'utilisation des superplastifiants a pour objet d'améliorer l'ouvrabilité du béton, en diminuant son seuil de cisaillement et sa viscosité [JOL 98]. Figure I- 11 est un exemple représentatif de l'effet d'introduction d'un superplastifiant sur l'ouvrabilité du béton ; plus le dosage en superplastifiant est grand plus le béton devient fluide jusqu'à une certaine valeur où l'augmentation du dosage en superplastifiant n'a plus d'effets sur l'étalement. De la même manière, la viscosité du BAP change faiblement jusqu'à un dosage à partir duquel elle commence à baisser d'une manière significative.

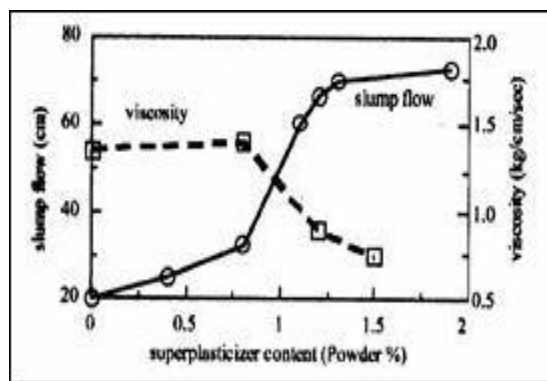


Figure I- 11: Etalement et viscosité en fonction du dosage en superplastifiant [HAD 07].

Les superplastifiants doivent également assurer un maintien de rhéologie dans le temps, jusqu'à la mise en place (temps de confection et de transport, mise en place jusqu'au début de prise).

I-7-3-2 Les agents de viscosité

Les agents de viscosité sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, en forme de grandes chaînes, qui ont pour fonction principale de

réduire la tendance au ressuage et à la ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse. Leur mécanisme d'action peut être écrit comme suit [AFGC00] :

1. les chaînes des polymères se fixent sur les molécules d'eau par adsorption, ces dernières se trouvent alors piégées ;
2. les molécules d'eau, déjà piégées par les chaînes de polymères, s'attirent entre elles et s'enchevêtrent créant des gels, ainsi le mouvement de l'eau se trouve réduit,
3. quand la vitesse de cisaillement augmente, les chaînes ont tendance à s'aligner, ce qui augmente la viscosité

Les agents de viscosité sont introduits dans la formule de BAP pour lui conférer une certaine robustesse. Avec l'agent de viscosité le BAP devient plus visqueux, les gravillons se déplacent avec la même vitesse d'écoulement que la pâte, sans séparation de phases.

D'après l'AFGC, l'utilisation de l'agent de viscosité se justifie dans le cas des bétons à rapport eau/liant élevé car les fines ne seraient pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton [AFGC 00].

I-8 Formulation des BAP

En majorité, les méthodes de formulation des BAP se spécifient par la formulation du squelette granulaire du BAP. La formulation en terme de résistance et de durabilité reste inchangée en comparaison aux méthodes classiques de formulation des bétons vibrés. Toutes les méthodes de formulation se basent sur les mêmes grandes lignes que celles décrites au paragraphe I.3.

Les BAP doivent satisfaire deux propriétés qui sont contradictoires : une bonne fluidité et une bonne viscosité. La démarche généralement adoptée pour la formulation des BAP est telle que décrite sur la figure I- 12 [HAD 07]. Ainsi, les méthodes de formulation des BAP nécessitent un programme expérimental assez conséquent pour fixer la **nature** et les **proportions** des composants de la pâte qui assurera une viscosité nécessaire pour éviter les problèmes de ségrégation d'une part et une bonne fluidité d'autre part.

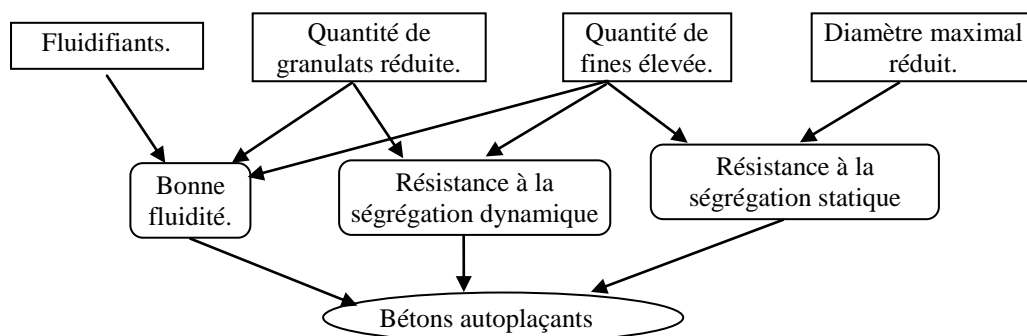


Figure I-12: Principe général de formulation d'un béton autoplaçant [HAD07].

Plusieurs méthodes pratiques de formulation des BAP existent, ces dernières procurent des formules théoriques dont les propriétés doivent être vérifiées et validées en laboratoire.

La méthode développée par Okamura et Ozawa préconise l'optimisation *au plus* du volume de pâte au détriment du volume des granulats, volume de gravillons inférieur à 50 % au volume solide du béton. La méthode conduit à des volumes de pâte très élevés, des quantités de liant significatives et donc à des bétons très onéreux [OKA 03].

La méthode proposée par Bui et Montgomery, préconise l'optimisation *au moins* du volume de pâte. Ils considèrent un volume de pâte égal à la porosité du squelette granulaire du béton augmenté d'une valeur qui conduirait à une bonne lubrification. Ce volume est a priori de l'ordre de 42 à 48 % du volume total de l'échantillon [NAN 01]. Ce volume est par la suite corrigé par un coefficient dû à la lubrification des granulats.

De nos jours, certains laboratoires ont établi des fuseaux qui leur permettent de faciliter la recherche du squelette granulaire. Ainsi en fonction des granulats à utiliser il suffit alors de chercher les proportions qui vont permettre d'avoir un squelette du béton qui rentre dans le fuseau. Parmi les fuseaux des BAP développés il y a celui du CTG Italcementi Group [HAD07].

I-9 Les BAP et leur utilisation

Dans le Tableau I- 3 suivant est décrit un exemple de classification des BAP en fonction de leurs propriétés et des utilisations possibles.

Tableau I- 3: Classification des BAP en fonction de leurs propriétés de l'état frais [HAD 07].

Viscosité ↑				Résistance à la ségrégation / déformabilité restreinte
VS 2 VF 2	Rampes			Valeurs spécifiques des classes SF1 & 2
VS 1 ou 2 VF 1 ou 2		Murs et piles	Éléments fins et élancés	Valeur spécifique de classe SF 3
VS 1 VF 1	Planchers et dalles			Valeur en SR spécifique pour les classes SF 2 & SF 3
	SF 1	SF 2	SF 3	
	Étalement →			

SF : étalement, VS : temps à 500 mm d'étalement ; VF : temps au V-funnel, SR : résistance à la ségrégation.

I-10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous sommes revenus sur les généralités des bétons et les bétons autoplacants. Nous avons discuté l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés des bétons, puis des méthodes de formulation des bétons et des BAP.

Chapitre II

La durabilité des bétons

II-1 Introduction

Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation était appréciée par sa résistance à la compression. En effet, la résistance est une propriété étroitement liée à la structure poreuse donc à la perméabilité et la diffusivité et par conséquent à la durabilité. La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons.

Un béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs. Cette qualité peut être caractérisée au moyen de deux grandeurs physiques : la perméabilité et la diffusivité. La première est relative au déplacement d'un fluide sous l'effet d'une pression motrice, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que leur interconnexion figure II.1. La seconde est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration.

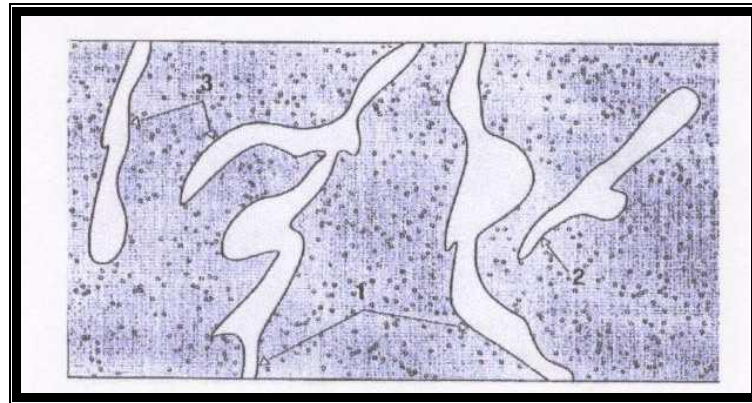


Figure II-1 : Représentation schématique d'un solide poreux.

- 1- Pores traversant la pièce de part et d'autre
- 2- Pores fermés
- 3- Pores semi-fermés

La dimension et la connectivité des pores varient d'un béton à un autre en fonction de leur composition (compacité granulaire, rapport eau/ ciment, nature des ciment, teneur du béton en éléments fin...) mais aussi du mode de malaxage et de mise en place (durée de malaxage, manque de vibration...).

II-2 Dégradation des bétons

La mauvaise durabilité de matériaux cimentaires se manifeste par une dégradation résultant d'une action simultanée des phénomènes internes au matériau (réaction physico-chimique) et des facteurs externes (conditions d'exposition). Ces phénomènes peuvent être subdivisés en plusieurs catégories [NEV 00] :

- Les effets physiques, actions de la température, cycle de gel dégel, incendie.
- Actions mécaniques dues aux sollicitations dynamiques, à l'abrasion et à la fatigue.

- Les effets chimiques qui sont très nombreux, les environnements agressifs peuvent être liquide (eau de mer, pluies), solides (sols gypseux), gazeux (gaz carbonique)
- Effets biologiques dus principalement à la présence de bactéries (conduites d'égouts).

II-2-1 Principaux processus de dégradation chimique

Il est à noter que la structure interne du ciment est un milieu très alcalin possédant un pH voisin de 13. Par conséquent, tous les environnements lui sont agressifs. Sa structure poreuse le rend plus vulnérable devant la présence de liquide et de gaz qui le traverse ; les processus de perméation le régissant sont la perméabilité et la diffusion.

II-2-1-1 La lixiviation ou l'hydrolyse (dissolution) des hydrates

Lorsque l'eau entre en contact avec la pâte de ciment, elle tend à dissoudre certains produits qui sont à base de calcium. La chaux formée par l'hydratation est la plus vulnérable vis-à-vis des processus de dissolution [BAR 92]. Le processus de dissolution a pour effet d'accroître la porosité, et par conséquent, la résistance mécanique de la pâte de ciment chute.

II-2-1-2 Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif

Les eaux agressives sont en grande partie des milieux acides par rapport à la solution interstitielle. Ce qui favorise leurs réactions avec la pâte de ciment pour former de nouveaux produits qui peuvent être solubles et se diffuser par la suite vers l'extérieur. Ou bien elles peuvent se précipiter et remplir les pores, ne participant à aucune fonction de liaison ou de résistance.

II-2-1-3 Formation de produits expansifs

La formation de produits expansifs est fonction des matériaux utilisés ou du type d'exposition produite, on citera par exemple [NEV 00] :

- L'attaque par les sulfates produit des gels expansifs. C'est le cas des sulfates de sodium qui réagissent avec la portlandite pour former du gypse à volume plus important que les produits d'origine.
- Réactions alcali-silice qui produit du gel de silice fortement expansif. Les alcalins contenus dans la solution interstitielle réagissent avec la silice contenue dans les grains produisant des produits silico-alcalin qui sont expansifs en présence d'eau.
- Corrosion des armatures forme du dioxyde de fer fortement expansif au voisinage des barres et provoque l'éclatement du béton.

Ces produits expansifs créent de très grandes pressions internes qui provoquent la fissuration de la matrice de ciment.

II-2-2 Cinétique de dégradation des matériaux

La cinétique de dégradation de la pâte de ciment est régie par la vitesse de transfert par diffusion ou par perméabilité des substances chimiques. Ces dernières sont fonction des dimensions des pores ainsi que de leur connectivité. L'étude de la porosité et du transfert de

matière paraît indispensable pour pouvoir déterminer ou prévoir la position du front de dégradation à n'importe quel âge du matériau.

II-2-2-1 Porosité

Les analyses porosimétriques d'une pâte de ciment durcie distinguent deux familles de pores. [BAR 92]

Pores capillaires : qui sont des pores à grande taille (environ 0,5 μm), ils correspondent aux espaces entre grains de ciment non remplis d'hydrates. Leurs tailles sont inversement proportionnelles à la durée d'hydratation et augmentent proportionnellement avec le rapport E/C, plus les grains de ciment sont rapprochés et plus le diamètre moyen des pores est petit. La porosité capillaire dépend également de la taille des grains de ciment anhydres. [NEV00, BAR98], le degré d'hydratation du matériau augmente avec la diminution de la taille des grains anhydres. Pour une pâte entièrement hydratée, la connectivité capillaire n'est plus assurée de ce fait, les phénomènes de diffusion et de perméabilité sont réduits.

Pores de gel hydraté : ils sont de dimension inférieure à quelques dizaine de nanomètres. Ils constituent la structure micro poreuse des silicates de calcium hydratés, ces pores sont peu influencés par le rapport E/C [NEV00].

Dans le cas de béton et des mortiers, une zone plus poreuse apparaît aux interfaces pâte/granulat (auréoles de transition). Cette porosité est due à la modification des réactions en surface des inclusions dures à cause de la présence excessive d'eau due au ressuage et aux effets de paroi. Les granulats créent un effet de paroi ce qui entraîne une compacité plus faible des grains de ciment à l'interface des granulats et donc une porosité plus importante qui est rapidement remplie d'eau. A tout âge, la porosité au voisinage de l'interface des granulats demeure plus élevée que celle du cœur de la pâte de ciment. [BAR 92]

II-2-2-2 Transfert de matière

La durabilité des matériaux est fonction de son aptitude à être traversé par des liquides, des gaz. On distingue 3 modes de transfert dans un matériau cimentaire.

Transport de liquide par perméation : Le processus de perméation est dû à un gradient de pression entre deux milieux. Le mouvement du liquide se fait de la zone à grande pression vers la zone à pression moins élevée. Ce mode de transport est négligeable pour le cas des matériaux cimentaires à cause de leur faible propriété de perméation. [Le Bellego 01]. Le débit du fluide q est décrit par la loi de Darcy

$$\vec{q} = \frac{K}{\mu} \text{grad}(p) \quad (\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}) \quad (\text{II-1})$$

K : perméabilité intrinsèque (m^2) ; μ : viscosité dynamique du fluide ($\text{kg}/\text{m}/\text{s}$) ; P : pression hydraulique (Pa).

Transport par migration: traduit le mouvement des ions sous l'application d'un champ électrique. L'orientation des particules dépend directement de la valence (loi de Nerst). Cette

technique est utilisée par B.GERARD (1996), essai (leaching induced by forced transport) pour des essais de dégradation accélérée.

Transfert par diffusion : c'est le processus le plus rencontré dans le transport de matières à travers les matériaux. Lorsque le béton est mis au contact avec une solution agressive le phénomène de diffusion se déclenche. Le mouvement est dû au gradient de concentration entre l'intérieur et l'extérieur. Le débit d'ions est calculé à partir de la première loi de Fick. La diffusion est suivie de réactions chimiques entre les hydrates et la solution interstitielle.

$$\vec{q} = -D \text{grad}(C) \quad (\text{mol/m}^2/\text{s}) \quad (\text{II-2})$$

D : coefficient de diffusion ; C : concentration.

Le transport des ions agressifs se fait par diffusion en solution aqueuse ou en phase gazeuse, la pénétration des gaz s'effectue dans l'air contenu dans la porosité du matériau (pénétration du gaz carbonique CO₂). La variation de concentration dans l'eau interstitielle de la pâte de ciment, provoquée par la diffusion engendre des sur/sous saturations par rapport à différentes phases solides, ce qui rompt l'équilibre thermodynamique et provoque des phénomènes de dissolution ou de précipitation.

La cinétique de dégradation est la résultante des deux cinétiques de diffusion et de dissolution ou précipitation, la cinétique des réactions chimiques est très grande devant celle de la diffusion. Raison pour laquelle les phénomènes de dégradation sont gouvernés principalement par le processus de diffusion et par conséquent par la valeur de la concentration en ions dans la solution agressive.

II-2-3 Principales attaques chimiques

II-2-3-1 Attaque par la carbonatation

En présence d'humidité, le gaz carbonique contenu dans l'air, au contact du ciment, forme de nouveaux produits (CaCO₃). La carbonatation provoque le changement de la composition chimique de la microstructure des hydrates, par conséquent les propriétés liantes et mécaniques du matériau sont modifiées. L'action du CO₂ sur le matériau se manifeste même à très faibles concentrations (environ 0.03 en volume d'air) [NEV 00]. Les parois des tunnels destinés à la circulation routière sont un très bon exemple de structure en béton les plus exposés à une concentration très élevée en CO₂. La carbonatation est influencée par plusieurs facteurs parmi d'autres :

La porosité notamment, la tortuosité a une grande influence sur la diffusion qui est le processus qui contrôle le phénomène de carbonatation [BAR 92].

Le degré d'humidité des pores. Si les pores sont saturés, la vitesse de diffusion du gaz carbonique est très lente alors que si les pores sont secs le CO₂ demeure sous forme gazeuse et ne peut attaquer les hydrates. La vitesse de carbonatation la plus élevée se produit lorsque l'humidité relative est comprise entre 50% et 75% [NEV 00].

La variation de la température (entre 20°, 30° jusqu'à 50°) accélèrent un peu la carbonatation mais, au-delà de 60°, 70° le phénomène d'évaporation d'eau des pores se déclenche, ainsi le gaz carbonique ne trouve plus d'eau pour réagir et le phénomène la carbonatation va en baisse.

La concentration en gaz carbonique dans l'air : Plus la concentration en gaz carbonique extérieur est grande, plus la différence de concentration entre l'intérieur et l'extérieur est importante et plus la cinétique de diffusion devient grande et donc la carbonatation devient importante.

II-2-3-2 Attaque par les sulfates

La présence des sulfates de calcium, de sodium, magnésium et d'ammonium dans l'environnement de la pâte de ciment représente un risque de dégradation majeur qu'on ne peut négliger. Lorsqu'ils sont mis en solution, les sulfates réagissent avec les hydrates de la pâte de ciment durcie mais également avec les produits anhydres, (aluminat tricalcique C₃A restant dans la pâte durcie). Ces réactions produisent de nouveaux composants expansifs «ettringite ». Ces produits, créent des tensions internes considérables qui, à une certaine limite, provoquent la fissuration de la pâte durcie et donc la diminution de ces caractéristiques mécaniques [BAR 92, NEV 00]. Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, contenus dans les sols ou issus des déchets industriels, mais ils peuvent également parvenir d'une succession de processus de transformations chimiques et biologiques. C'est le cas de l'acide sulfurique produit par les bactéries présentes dans les canalisations des eaux usées. [DRE 98, BAR 97].

La pénétration des sulfates est régie par le processus de diffusion, leur agressivité est en relation directe avec la porosité de la pâte de ciment et donc le rapport E/C, mais également, avec le type de ciment utilisé, notamment la teneur en C₃A incorporé dans le mélange anhydre car, les sulfates réagissent avec les C₃A.

II-2-3-3 Attaque par les chlorures

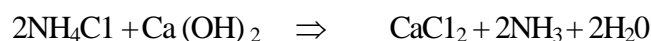
Autres que la corrosion des aciers, les chlorures quand ils sont à forte concentration (eau de mers et sel de déverglaçage) provoquent l'altération des hydrates. Une partie des chlorures est fixée par les silicates de calcium hydratés, une autre par l'hydroxyde de calcium formant des composés expansifs comme l'oxychlorure de calcium CaCl₂ Ca(OH)₂ H₂O, le monochloroaluminat C₃A CaCl₂ 10H₂O et la chloroettringite CaCl₂ 3CaSO₄ 31H₂O. [BAR 92, NEV 00]

Les chlorures de magnésium réagissent également avec la portlandite.



Le Mg(OH)₂ formé, appelé brucite, précipite dans les pores à la surface du béton en constituant une couche de surface protectrice qui empêche la réaction de se poursuivre.

Le chlorure d'ammonium réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former du chlorure de calcium et de l'ammoniaque qui sont très solubles dans l'eau.



II-2-3-4 Attaque par les eaux (lixiviation)

L'eau représente un vecteur commun de toutes les attaques. Sa présence déclenche et/ou

accélère leurs mécanismes d'action. L'eau pure peut nuire à la pâte de ciment, du fait qu'au contact de la solution interstitielle caractérisé par une basicité (PH compris entre 12,5 et 13,5), l'eau crée un déséquilibre thermodynamique entre la solution interstitielle et les hydrates, ce qui engendre le changement de phase des hydrates. La lixiviation est influencée par deux catégories de facteurs

- ceux liés à la solution agressive : son pH qui traduit le caractère de basicité ou d'acidité de la solution; sa dureté : soit la somme des concentrations en cations métalliques présent dans l'eau, sa teneur en dioxyde de carbone agressif, en sulfate, etc.
- ceux liés à la pâte de ciment : le type de ciment utilisé, le rapport E/C et donc la porosité.

Les eaux de mer : L'attaque chimique résulte des réactions simultanées entre les sulfates et les chlorures contenues dans l'eau et des constituants du ciment [BAR 92, NEV 00].

Les eaux de pluies : Les pluies propres ont généralement un pH compris entre 5 et 7. Les pluies provoquent une dégradation superficielle suivant des processus plus ou moins complexes mettant en jeu des phénomènes de dissolution dus aux acides (sulfurique, nitrique, carbonique) et d'expansion dus à la cristallisation des sels. [NEV 00].

Attaque par les eaux usées : L'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation de produits soufrés. Cet hydrogène sulfuré se combine avec l'humidité atmosphérique puis se condense sous forme d'acide sulfurique sur les parois du béton et réagit avec les hydrates. Cette réaction provoque la dégradation du béton. On peut aussi retrouver des eaux riches en minéraux provenant des zones industrielles. Selon le type de minéraux qu'elles véhiculent, elles attaquent les bétons avec lesquels elles sont en contact [BAR 92, NEV 00].

II-2-3-5 Réaction alcali-granulats

Le béton peut subir des désordres dus aux réactions chimiques produites entre la solution interstitielle, fortement basique et alcaline, avec certaines phases minéralogiques présentes dans les granulats. La réaction alcali-granulats produit des produits expansifs, ce qui conduit à la fissuration et à la baisse des performances mécaniques de la matrice de ciment. Selon la pétrographie des granulats, on distingue deux types de réaction pouvant se produire [BAR 92]

a - réaction alcali-silice : réaction entre les phases siliceuses réactives des granulats, l'opale amorphe, la calcédoine, la tridymite et la pâte de ciment

b – réaction alcali-carbonate : qui a lieu entre quelques calcaires dolomitiques et les alcalins du ciment Cette réaction conduit à la décomposition des cristaux de dolomite disséminés dans la fine matrice microcristalline des granulats calcaires.

Pour que la réaction alcali granulat se développe dans un béton, plusieurs conditions doivent être réunies présence de granulats réactifs, une concentration en alcalins élevée dans la solution interstitielle et surtout des conditions d'humidité très élevée, soit plus de 85%. A ceux-là s'ajoutent le type de ciment et le rapport E/C qui conditionnent la porosité et donc le transfert d'ions dans le matériau.

II-3 Conclusion

La durabilité, mais aussi les propriétés mécaniques des bétons dépendent essentiellement de la porosité soit le volume des vides. On vient de voir que toutes les attaques chimiques et leurs cinétiques sont régies par la porosité et la connectivité des pores dans le béton durci. La cinétique de dégradation du béton est régie par la vitesse de transfert par diffusion ou par perméabilité des substances chimiques. Ces dernières sont fonction des dimensions des pores ainsi que de leur connectivité. Par conséquent, l'étude de la porosité et du transfert de matière paraît indispensable pour pouvoir déterminer ou prévoir la position du front de dégradation à n'importe quel âge du matériau, soit donc prévoir la durée de vie d'une construction.

La porosité est un paramètre déterminant de la résistance et la durabilité du béton. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs.

L'absorption d'eau par immersion est le résultat des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Elle est déterminée par immersion d'une éprouvette de béton dans l'eau jusqu'à masse constante et en mesurant l'augmentation de masse. Elle est exprimée en pourcentage de la masse sèche de l'éprouvette. Etant une image de la porosité, l'absorption d'eau est utilisée comme un indicateur de la qualité du béton.

Chapitre III

*Les déchets, les
matériaux recyclés*

III-1 Introduction

Il y a peu de temps encore, pour se débarrasser des déchets, il suffisait de les déverser dans les cours d'eau, la mer ou de les abandonner dans les forêts, alors, on a commencé à entendre parler de pollution des rivières, des nappes phréatiques, des océans, de perturbation de chaînes alimentaires et des maladies qui sont apparues, ce qui a poussé l'homme à se préoccuper de la qualité de son environnement. En effet, depuis le début des années 1990, la protection de l'environnement est devenue une préoccupation collective. La question des déchets est quotidienne et touche chaque individu, chacun peut et doit être acteur d'une meilleure gestion des déchets qui sont estimés en hausse pour les années à venir.

Différentes lois, notamment celles de la directive européenne du 15 juillet 1975 et du 3 juillet 1992, regroupées et inscrites dans le code de l'environnement, fixent les objectifs à respecter pour gérer correctement les déchets :

- Prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets;
- Organiser le transport des déchets;
- Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute action visant à obtenir des matériaux réutilisables ou de l'énergie;
- Informer le public des effets pour l'environnement et la santé publique;
- Limiter le stockage définitif aux seuls déchets résiduels, ultimes.

III-2 Le secteur de la construction et l'environnement

Contre tous les avantages que procure le béton à l'humanité, la production du béton a des inconvénients sur l'environnement. Dans le processus de fabrication du béton, on porte atteinte à l'environnement soit à la phase de production de ses constituants (granulats, ciment, adjuvants...), soit à la phase de sa production lui-même, et éventuellement par l'aspect visuel du béton dans l'environnement.

La production du béton se fait essentiellement avec des granulats d'origines naturelles. Ainsi, le recours à de nouvelles carrières est parfois difficile à réaliser en raison : d'une réglementation rigoureuse (préservation des paysages, interdiction d'extraction de granulats alluvionnaires...), mais aussi l'épuisement ou éloignement des gisements naturels ces centrales de production des bétons.

En effet, l'implantation d'une carrière entraîne une modification du paysage (contrastes de forme, de couleurs...) avec des incidences très variables selon les types d'exploitation (apparition d'un plan d'eau, d'un front de taille minéral, déboisement, etc.).

Sur une autre échelle l'extraction de granulats dans les rivières provoque l'incision verticale du lit de la rivière par érosion en amont et en aval des exploitations. Ceci se traduit par un abaissement du fond de la rivière qui a plusieurs conséquences :

- l'appauvrissement écologique au niveau du lit mineur car le substratum alluvial est une zone d'habitat pour les poissons, les invertébrés, les végétaux aquatiques alors que le substratum rocheux mis à nu est beaucoup moins favorable pour la faune et la flore ;
- l'abaissement de la nappe alluviale, notamment en période d'étiage, provoque l'assèchement des zones humides et la modification des peuplements végétaux. Il s'ensuit une disparition de la diversité de milieux d'intérêt écologique au niveau du lit majeur. La ressource en eau se trouve diminuée, en quantité et en qualité.
- la déstabilisation des ouvrages d'art (ponts...) qu'il est alors nécessaire de conforter par des seuils.

La production du ciment conduit au dégagement de poussières et de gaz qui polluent l'atmosphère et mettent en danger la vie humaine et l'agriculture avoisinantes.

Les principaux polluants rencontrés dans l'industrie du ciment sont :

- Le dioxyde de soufre (SO₂) émis à la combustion au niveau du four se transforme en SO₃ dans l'atmosphère. En présence d'humidité il provoque des pluies acides.
- L'oxyde d'azote (NO₂) produit pendant la combustion, continue à s'oxyder dans l'atmosphère pour former des pluies acides.
- D'autres gaz nocifs peuvent également être produits, c'est le cas du monoxyde de carbone (CO) produit au niveau du four à la combustion incomplète ou lorsque le four est mal réglé, ce gaz est considéré toxique. Le dioxyde de carbone (CO₂) produit quand la combustion est complète. Le CO₂ n'est pas officiellement un polluant mais son augmentation dans l'atmosphère pose le problème actuel de l'effet de serre.
- Les poussières représentent la forme de pollution la plus importante au niveau des cimenteries. Elles sont plus ressenties par la population pour des raisons physiologiques et psychologiques.

Par la production du béton, le premier impact des déchets des centrales de fabrication du béton près à l'emploi « BPE » est visuel : rejet de laitance de béton qui s'accumule et prend en masse, conduisant à un colmatage des réseaux et un dépôt dans le milieu naturel.

Bruits sonores aux alentours des chantiers.

Densification, voir ralentissement de la circulation dans les centres urbains dû à la présence des camions de transport des matériaux et bétons.

Deux besoins se ressentent actuellement :

- Trouver des ressources alternatives aux granulats naturels et limiter donc l'impact de leur extraction sur l'environnement ;

- Traiter les déchets des constructions en ruine.

Donc l'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent de chercher de nouvelles sources d'approvisionnement. Le recyclage des matériaux de construction est la solution la plus prometteuse. Le recyclage permet non seulement de répondre au déficit de production, mais aussi de mieux protéger l'environnement.

Les déchets de démolition représentent un gisement important suite à la déconstruction des vieux bâtis et aux différentes catastrophes.

III-3 Les déchets et le recyclage

Dans le cadre d'une garantie de sécurité environnementale à long terme, la caractérisation des déchets est une phase préalable essentielle dans le choix du stockage ou de valorisation: elle permet de décrire le déchet, de le connaître et d'anticiper sur son comportement à venir.

Le recyclage est le procédé qui permet la fabrication de nouveaux produits à partir de la réutilisation partielle ou totale des matériaux en fin de vie « faire du neuf à partir du vieux » donc les déchets deviennent des matières premières.

III-3-1 Définition d'un déchet

Un déchet, selon loi du 15 juillet 1975, modifiée par la loi du 13 juillet 1992, relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux du code de l'environnement Français : selon la loi du 15 juillet 1975, est défini comme déchet "tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau ou produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon".

III-3-2 Les différentes catégories de déchets

Une catégorie de déchets peut se trouver dans des classes différentes selon les critères relatifs à chaque catégorie, ces critères sont : la nature, l'origine, type de collecte, composition, consistance, hétérogénéité, etc. On considère 3 grandes catégories de déchets :

III-3-2-1 Déchets dangereux

Potentiellement le plus polluant pour l'environnement et créant le plus de dangers pour la santé humaine. Ce déchet nécessite des précautions particulières vis-à-vis de la protection de l'environnement.

III-3-2-2 Déchets non dangereux

Ce sont les déchets industriels ordinaires qui ne contiennent pas de substances toxiques ou dangereuses. Ils sont assimilables à un déchet de consommation ou à des ordures ménagères.

III-3-2-3 Déchets inertes

Ils sont souvent solides (minéraux) ne subissant aucune transformation physique, chimique importante: pavés, sables, gravats, tuiles, béton, carrelage. Ils ne sont pas biodégradables et ne n'affectent pas les 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. Ils proviennent des chantiers de construction, mais aussi des mines et des carrières.

III-3-3 La gestion des déchets

Les principaux objectifs dans la gestion des déchets sont :

- Prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets, notamment en agissant sur la fabrication et sur la distribution des produits;
- Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir à partir des déchets des matériaux réutilisables ou de l'énergie;
- Assurer l'information du public sur les effets pour l'environnement et la santé publique, des opérations de production et d'élimination des déchets ainsi que sur les mesures destinées à en prévenir ou à en compenser les effets préjudiciables.
- Organiser le transport des déchets et le limiter en distance et en volume;
- ...

Les déchets peuvent donc être soit valorisés comme matière première ou comme source énergétique, ou bien stockés.

III-3-3-1 La valorisation de la matière

Elle regroupe les procédés suivants:

- Le Recyclage : réintroduction d'un déchet dans un cycle de production en remplacement total ou partiel d'une matière première vierge.
- Le Réemploi : nouvel emploi du déchet pour un usage analogue à celui de sa première utilisation.
- La Régénération : procédé physique ou chimique qui redonne au déchet les caractéristiques permettant de l'utiliser en remplacement d'une matière première vierge.
- La Réutilisation : utilisation du déchet pour un usage différent de son premier emploi, ou introduction de ce matériau dans un autre cycle de production que celui dont il est issu.

III-3-3-2 La valorisation énergétique

Elle consiste à récupérer l'énergie du déchet en l'incinérant. L'incinération c'est la réalisation d'une combustion complète du déchet dans un four, adapté aux caractéristiques de ces déchets, à une température de 700 à 900° C.

III-3-3-3 Le stockage

Si le déchet ne peut être valorisé, il est alors stocké dans des centres adaptés en fonction de leurs natures (dangerosité) : les Centres de Stockage des Déchets Ultimes (CSDU), anciennement Centre d'Enfouissement Technique (CET).

L'élimination des déchets par l'incinération ou le stockage devient de plus en plus gênante à cause de l'impact négatif sur l'environnement, il est donc important de connaître l'impact environnemental des déchets afin d'améliorer et déterminer les filières de valorisation les plus adaptées et les plus respectueuses pour l'environnement.

Le recyclage tend à se développer de plus en plus comme méthode de gestion des déchets.

III-3-4 Développement du recyclage

Le recyclage est utilisé dès l'âge du bronze. À cette époque, les objets usagés en métal sont fondus afin de récupérer leur métal pour la fabrication de nouveaux objets. Dans toutes les civilisations, l'art et la manière de « faire du neuf avec du vieux » existent. Par exemple, les vieux chiffons, puis les papiers et cartons, sont récupérés pour faire de la pâte à papier. La situation change avec le développement progressif puis massif de l'industrialisation et de la consommation. La gestion des matières premières et des déchets devient de plus en plus difficile, les unes devenant trop rares et les autres trop envahissantes.

En 1970, le recyclage est mis en avant par des partisans de la défense de l'environnement qui lancent le logo actuel pour marquer les produits recyclables.



Figure III- 1: Logo universel des matériaux recyclables.

La situation évolue progressivement. Les consommateurs se sensibilisent à l'étiquette « produit recyclable » qui est reconnaissable grâce au logo. Le procédé se généralise dans l'industrie qui s'organise pour le favoriser. Le ramassage des déchets ménagers par récupération sélective se développe afin de faciliter l'industrialisation du recyclage. Les gouvernements légifèrent pour encadrer ces diverses activités. Par exemple, en 2006, les pays développés mettent en place un système d'achat de l'électricité produite par le traitement des déchets: telle que l'incinération des ordures ménagères.

Le recyclage, au sens de l'Arrêté du 16 mars 1995 du gouvernement de Bruxelles, est la transformation des débris en vue de leur utilisation comme matière première secondaire. Certains débris (à savoir les déchets de construction ou de bâtiments à caractère d'habitation

ne contenant pas de matériaux putrescibles ou inflammables) peuvent être utilisés tels quels, comme remblais, de même que les terres non contaminées. D'autres, ne pourront être directement réemployés. Il faudra d'abord en extraire les éventuels contaminants (bois, papiers, métaux, plastiques,...), puis les concasser. Les granulats ainsi obtenus pourront être réutilisés lors de la construction de routes ou de travaux d'infrastructure. [Bruxelles, 1995].

Les débris, avant d'être réutilisés, nécessitent de passer par une installation de recyclage (tri, concassage, criblage...) et de faire l'objet d'une identification préalable puis d'une étude de formulation permettant ainsi, d'en valider le réemploi envisagé (assises traitées, béton routier, remblais..).

III-3-5 Pourquoi le recyclage ?

Depuis plusieurs dizaines d'années, le volume des déchets dans le monde produit par habitant ne cesse d'augmenter. Cela représente une menace pour l'environnement car la seule solution était de détruire les déchets par incinération ou enfouissement. Mais depuis peu, la mentalité des hommes a évolué et, au lieu de se débarrasser de tous les déchets, nous avons décidé de valoriser une bonne partie d'entre eux, c'est à dire de les transformer afin de pouvoir les réutiliser et donc la possibilité d'économies de matières. Cela permet donc de sauvegarder les ressources naturelles de la Terre et de limiter également la pollution de l'air et des sols. Cependant tous les déchets ne sont pas recyclables, c'est pour cela que les déchets dits «ultimes» sont encore enterrés.

Parmi les biens faits économiques et environnementaux du recyclage on trouve :

- la réduction des déchets donc la pollution.
- réduction des volumes des décharges et de l'incinération, procédés qui favorisent la pollution des sols et de l'air, et donc protection de la nature.
- création d'emplois.
- la réduction des nuisances liées aux transports des matières premières, limite donc la consommation du carburant et le dégagement du CO₂, limite la sollicitation du réseau routier etc.
- offre des ressources d'approvisionnement en matières premières alternatives aux autres sources, exemples :
 - o l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
 - o une tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
 - o le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
 - o chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;
 - o chaque feuille de papier recyclé fait économiser 1 L d'eau et 2,5 W d'électricité en

plus de 15g de bois.

-

III-4 Développement de la filiale du recyclage dans le génie civil

La production de granulats recyclés s'est développée au début des années 90. Elle répond au besoin de réduction des volumes de déchets de construction, qui représentaient alors près d'un cinquième de la masse totale de déchets.

III-4-1 Définition des déchets de construction

Ce sont des déchets provenant des chantiers de construction, de rénovation, de transformation, d'entretien ou de la démolition de bâtiments, d'ouvrages d'art, de routes ou d'autres installations. Ces déchets sont constitués de :

- déchets inertes constituent la quasi-totalité, environ 70% de la quantité de ces déchets (bétons, briques, tuiles, ...). Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique.
- déchets non dangereux représentent 25% des déchets (plastiques, métaux, bois non traités, ...).
- déchets dangereux avec un pourcentage de 5% (amiantes, plâtres...) d'un point de vue réglementaire nécessitent des précautions particulières.

Les déchets de construction sont souvent simples à collecter et à transformer, ils sont peu dangereux. En revanche, ils représentent des volumes importants à transporter et à stocker.

III-4-2 Le recyclage dans la construction

Les matériaux de démolition peuvent être considérés du point de vue de l'environnement, des déchets ; ils relèvent alors de la réglementation concernant les déchets. Si on les envisage d'un point de vue technique, ce sont des matériaux qui doivent obéir à des règles de conformité en vue de leur utilisation. L'emboîtement des deux domaines relève précisément de l'activité de valorisation, capable de transformer un déchet en ressource.

Mieux gérer ces déchets participe activement à la protection de l'environnement, en contribuant à limiter le développement des décharges sauvages et du brûlage et l'enfouissement sur les chantiers, en limitant la pollution des sols, des eaux et de l'air.

III-4-3 Utilisation des matériaux recyclés dans les bétons

Les spécifications de la norme 18-541, les granulats ne doivent pas contenir de fortes teneurs en matières organiques, sulfates, sulfures, chlorures, ainsi que certaines formes de silice ou silicate, substances susceptibles de nuire à la qualité du béton (corrosion des armatures, gonflement, fissuration) et donc à la résistance de celui-ci.

Des études se font de part et d'autres afin de caractériser des bétons élaborés avec des granulats de recyclage. Certains travaux ont montré que ces bétons sont poreux avec des valeurs de perméabilité deux fois plus élevées que celles des bétons de granulats naturels tandis que leurs propriétés physiques et mécaniques décroissent à mesure que le taux de remplacement des granulats naturels par des granulats de recyclage augmente. En 2002 (Gomez-Soberon) confirme ce résultat : la porosité à l'eau et l'absorption augmente avec l'augmentation de la teneur en granulats recyclés, tandis que la résistance en compression diminue nettement dès que le taux de remplacement dépasse 30 %.

[Pimienta, Delmotte, (1997)] ont montré que la fabrication de blocs préfabriqués en béton à granulats recyclés était possible sous réserve d'utiliser davantage de sable naturel et d'augmenter de 10 % la teneur en ciment.

En somme, les bétons aux granulats de recyclages sont encore dans leurs débuts, n'ont pas encore dépassé le stade du laboratoire. Néanmoins, certains pays des chantiers ont été réalisés avec ces matériaux comme le "Environmental building" en Grande-Bretagne ou encore le "Deftse Zoom", projet de construction d'habitations aux Pays-Bas.

III-4-4 Produits de recyclage et domaine d'emploi

Selon Destombes et al les produits résultant de la démolition vont des graves non calibrées aux granulats classés tels que sables et gravillons, en passant par diverses qualités de graves. Ainsi ils associent à chaque produit un domaine d'emploi possible comme suit :

A. les graves de recyclage (GR) : destinées principalement au domaine routier ; elles sont classées selon leur granularité, dureté, propreté et teneur en sulfates en cinq catégories :

GR0 : Ces granulats sont utilisables en couches de forme ;

GR1 : Elles sont employées dans les remblais où les GR0 sont interdites ;

GR2 , GR3 et GR4 : Leurs possibilités d'emploi dans les assises de chaussées peuvent se présenter en deux cas : les graves non traitées (GNT) et les graves traitées aux liants hydrauliques (GH).

B. Les sables et gravillons : ils sont destinés à la réalisation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou de graves non traitées reconstituées après recomposition et humidification en centrale de malaxage.

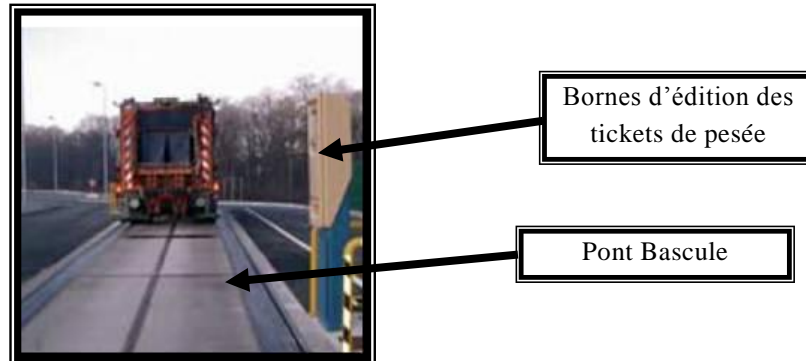
L'emploi de ces matériaux dépend essentiellement de leurs caractéristiques mécaniques résiduelles.

III-4-5 Les différentes phases du recyclage des matériaux de démolition

Les déchets de construction sont acheminés vers des plates formes de recyclage où

ils sont transformés en subissant les opérations suivantes :

Le contrôle et la pesée : Contrôler et peser les matériaux inertes qui arrivent à l'aide de Pont bascule.



Le tri et le pré criblage : Triage des différentes catégories de déchets et stockage à des endroits différents, pré criblage, désolidarisation béton-acier. Ce tri s'effectue à l'aide de Benne cribleuse – trieuse, tractopelle.

Le concassage : Le concassage est l'opération qui permet la réduction granulométrique des matériaux. Il s'agit d'un procédé purement mécanique qui consiste, le plus souvent, à placer les matériaux entre deux plaques métalliques dont l'une est fixe et l'autre est mobile et se rapproche de la plaque fixe. En fonction de la vitesse du rapprochement on parlera d'écrasement ou de percussion. On utilise des concasseurs :

- **Concasseur primaire** : ils sont utilisés pour réduire les gros blocs (bloc rocheux de 1 m³, environ trois tonnes) qui arrivent directement du site de la carrière ou du chantier.
- **Concasseur secondaire** : les matériaux provenant du concassage primaire sont encore réduits par cette étape de concassage. Sont utilisés dans cette opération une benne, un concasseur et un chargeur.
- **Concasseur tertiaire** : pour obtenir des matériaux encore plus fins (sables, filler...), on utilise des concasseurs adaptés (cônes, barres, boulets...)



Tractopelle



Concasseur

Le criblage final : Le criblage est l'opération qui permet la séparation granulométrique des éléments.

Le procédé consiste à faire passer ou refuser les éléments par un orifice de dimension donnée, qui est généralement de forme carrée. Les éléments sont alors triés par rapport à leur plus petite dimension. Le matériel utilisé dans cette procédure est : une cribreuse, une table de tri et une bande transporteur.



Cribleuse

Stockage : sur une installation de concassage, les mouvements de matériaux sont réalisés par des tapis roulants élévateurs. Ils sont stockés et classés en fonction de leur taille.

Après ces opérations, les matériaux ainsi obtenus sont destinés à la réutilisation. Toute fois ces matériaux doivent être vérifiés s'ils sont conformes aux normes exigées par les réglementations.

III-4-6 Exemple concret d'utilisation des matériaux recyclés

Au désert du Taos aux Etats-Unis, avec des températures extérieures allant de moins 30 à plus 50°C, l'architecte Mickael Reynolds, a eu l'idée de créer une maison réalisée intégralement à partir de matériaux recyclés locaux.



La maison, dans laquelle il vit depuis 20 ans maintenant, est composée intégralement de pneus et de bouteilles recyclés. Elle est quasi indépendante énergiquement grâce au solaire et éolien, tout en ayant un système de récupération d'eau chauffé par l'énergie solaire.

III-4-7 La filiale du recyclage dans le monde

Selon la Portland Cement Association des États-Unis, 38 États emploient du béton recyclé comme base de granulats et 11 états utilisent le matériau comme granulat dans les applications

de nouveau béton.

Aux Etats-Unis, les 20 plus importants producteurs de granulats recyclés ont utilisé 29,4 Mt de matériaux d'asphalte et de béton en 2003, d'après le magazine Construction and Demolition Recycling. Le plus important producteur américain de granulats recyclés était la Vulcan Materials Co., qui a fait le traitement de 3,7 Mt de matériaux.

D'après les estimations, la région du Grand Toronto recycle environ 2,5 Mt de béton chaque année. De plus, les entrepreneurs du Québec, principalement ceux de la région de Montréal, ont recyclé environ 1,2 Mt de vieux béton en 2004.

En France, la production de granulats recyclés a progressé de 8 millions de tonnes entre 2001 et 2006, pour atteindre 20 % du volume total (estimé) de granulats consommés pour 2006 - soit 13 millions de tonnes.

En Suisse les quantités de gravats produites sur les chantiers atteignent les 12 millions de tonnes par année.

Quant à l'Algérie, aucun progrès significatif pour favoriser la filière du recyclage des déchets de construction et de démolition qui sont estimés en hausse c'est pourquoi il faut surmonter tous les obstacles pour promouvoir cette filière de valorisation, qui a des conséquences bénéfiques non seulement sur la protection de l'environnement, mais également sur la rentabilité économique que peuvent engendrer.

III-4-8 Quelques chiffres des déchets de construction en Algérie

Vu le manque de statistiques annuelles sur les débris générés en Algérie, on se contentera alors des rapports présentés par : [AFPS, 2003] et [C.A.T.E, 2003].

- L'association française du génie parasismique (AFPS), dans son rapport préliminaire sur le séisme du 21 mai 2003, déclare que parmi les dégâts causés, 190000 unités touchées dont 160000 logements environs, 30% des unités ne seront pas récupérables (à démolir).

- La Commission de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (C.A.T.E), dans son rapport du 13 avril 2003 sur "L'urbanisation et les risques naturels et industriels en Algérie inquiétudes actuelles et futures", a présenté les statistiques ci-dessous (voir tableau 2).

Tableau III- 1: Quantités de débris issus des catastrophes naturelles en Algérie.

Lieu	Date	Dégâts
El Asnam - Chlef (<i>séisme</i>)	10 octobre 1980	2900 logements détruits
Mascara (<i>séisme</i>)	18 août 1994	1000 habitations détruites
Skikda (<i>explosion gazoduc</i>)	3 mars 1998	10 maisons détruites et 50 maisons endommagées
Ain-Temouchent (<i>séisme</i>)	22 septembre 1999	600 habitations détruites et 1200 sérieusement endommagées
Bab El-Oued Alger (<i>inondations</i>)	9 et 10 novembre 2001	22400 logements endommagés et 300 à détruire complètement

Ces quantités très importantes et gênantes de matériaux abandonnées dans la nature, peuvent être valorisées et recyclées, permettant d'une part de libérer de l'espace pour les constructions nouvelles, et d'autres parts d'absorber le manque en granulats.

III-5 Difficultés de la filiale du recyclage dans la construction

Outre les freins psychologiques liés à la notion de déchets, la filiale du recyclage souffre principalement de l'absence de normes propres aux matériaux recyclés. Sauf exception, l'utilisation de ces matériaux se fait sur la base d'un comparatif avec des matériaux dits nobles. Manque d'une volonté d'imposer l'utilisation de ces matériaux recyclés.

Le développement de la réutilisation des matériaux de démolition repose principalement sur la rentabilité économique de l'opération. Pour favoriser ce développement, des mesures sont envisageables mais peuvent avoir des effets secondaires allant à l'encontre des objectifs recherchés :

- la hausse des coûts de réception dans les installations de recyclage repositionne la mise en décharge qui devient plus attractive,
- le réajustement de l'incitation au recyclage par l'augmentation du coût de la mise en décharge accroît les risques de multiplication des dépôts sauvages. Les décharges sauvages, bien qu'interdites, acceptent le stockage des matériaux à des coûts très faibles rendant les coûts de valorisation démesurés.

Par ailleurs, deux facteurs devraient, à moyen terme, contribuer à développer le recyclage :

- l'augmentation plus rapide du coût rendu des granulats naturels liée à la prise en compte des données environnementales de plus en plus contraignantes,
- le développement de nouvelles pratiques dans la démolition, orientées vers une

technique de déconstruction adaptée à la récupération sélective des matériaux potentiellement valorisables.

III-6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé l'impacte de la production du béton sur l'environnement, et le besoin de recours à des ressources nouvelles.

Ensuite, nous avons consacré une partie de ce chapitre à la définition du déchet, du recyclage et ses différentes procédures afin d'enrichir les connaissances de nos lecteurs et les encourager à opter pour ce genre de solution qui reste, en tout cas, la plus économique et surtout la plus préservatrice de la nature.

On a vu dans les diverses études, que les déchets issus de la démolition et la réhabilitation des constructions est apriori une source très prometteuse en terme de substitution aux granulats naturels.

L'utilisation des granulats recyclés à une grande importance du point de vue environnemental car cela permet de préserver la nature en réduisant l'extraction des granulats naturels ; mais cela permet également de réduire le nombre de décharges de ces matériaux.

Chapitre IV

Matériaux et formulation

IV-1 Introduction

Les granulats sont considérés comme des éléments essentiels dans la composition du béton ordinaire et des bétons spéciaux. L'utilisation des granulats recyclés a une grande importance du point de vue environnemental. D'un côté elle permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions due aux catastrophes naturelles ou la démolition du vieux bâti, cela permet de préserver l'environnement par la réduction des déchets dans la nature. D'un autre côté; leur réutilisation permet de protéger la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats naturels et donc de l'environnement.

L'objectif de cette étude est de formuler des bétons autoplaçant (BAP) à base de matériaux de recyclage (déchets de marbre, granulats de béton de démolition). Les bétons ainsi formulés seront comparés à un BAP à base de granulats naturels. Les critères de comparaison choisis étant la résistance mécanique en compression, la résistance mécanique à la traction, la porosité ouverte (accessible à l'eau), et l'absorption capillaire des bétons.

Pour atteindre notre objectif nous avons confectionné 4 formules de BAP en faisant varier les pourcentages des granulats naturels et des granulats de béton de démolition.

IV-2 Matériaux et formulation**IV-2-1 Matériaux de base utilisés**

Dans notre étude, nous avons utilisé des matériaux naturels locaux et ceux du recyclage.

IV-2-1-1 Ciment

Le ciment utilisé pour notre étude est un ciment de type CPJ- CEM II/B 42,5 N provenant de l'usine Hammam Eddalaa région de M'sila, Algérie.

Les différentes caractéristiques que se soit chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont données sur la fiche technique élaborée par le producteur au niveau d'un laboratoire spécialisé conformément aux normes NA 442 et EN 197-1.

IV-2-1-2 Granulats

Les granulats utilisés dans cette étude sont de deux catégories : les granulats naturels et les granulats de béton de démolition. Les paramètres de caractérisations de ces granulats sont donnés au paragraphe IV-2-2.

Les granulats naturels : Ces granulats ont une forme semi concassés. Ces granulats sont de trois classes granulaires délivrées sous les appellations commerciales suivantes : Sable 0/3, Gravier 3/8, Gravier 8/15.

Les granulats de recyclages : les granulats de béton de démolition nous les avons préparés par concassage manuel d'éprouvettes usagées trouvées au niveau de notre laboratoire (voir figure IV-1). Les granulats ainsi obtenus sont séparés aux tamis 8 mm et 15 mm pour avoir la fraction granulaire 8/15.



Figure IV- 1 : Epreuves usagées trouvées au niveau de notre laboratoire.

IV-2-1-3 Le déchet de marbre broyé

Pour la formulation de nos BAP on a utilisé le déchet de marbre comme addition minérale. Ce déchet est récupéré d'une marbrerie de Larbâa Nath Irathen. Le marbre est fourni sous forme d'une pâte humide (voir figure IV-2).



Figure IV- 2 : Déchet de marbre récupéré.

La pâte est dans un premier temps séchée à une température 105 °C. Les mottes de marbre obtenues sont par la suite broyées pour disperser la poudre. La poudre grossière est concassée pour réduire son diamètre et optimiser la quantité à récupérer. Nous avons alors récupéré par tamisage les fines à diamètre inférieur à 1 mm.

Cette addition est inerte, l'objectif dans son utilisation dans la formulation des BAP est double : d'une part cela permet d'améliorer la compacité du béton ; d'autre part, la poudre est utilisée comme substituant d'une part du ciment, dans le cas des BAP. En effet, au début des BAP les formulateurs utilisent une grande quantité de ciment pour atteindre l'ouvrabilité souhaitée. Or, l'utilisation excessive du ciment rend les BAP non économique. Les fines inertes sont alors utilisées pour atteindre l'optimum en termes d'économie et d'ouvrabilité.

IV-2-1-4 Le super-plastifiant

Dans notre étude on a utilisé le Super plastifiant MEDAPLAST SP 40, produit par Granitex. Ce super-plastifiant est aussi un haut réducteur d'eau. Il permet d'obtenir des bétons et mortiers de grande qualité en termes de résistance et de fluidité. En plus de sa fonction principale de super-plastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton. MEDAPLAST SP 40 permet également un maintien d'ouvrabilité sur une longue période (2heures). Voir fiche technique en annexe 4 pour plus d'indications sur ce produit.

IV-2-1-5 Eau de gâchage

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau du robinet, qui est une eau potable.

IV-2-2 Caractérisation des granulats

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiments et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage, il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire.

IV-2-2-1 Echantillonnage (NF P 18- 553)

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, ceux-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble. L'opération d'échantillonnage est essentielle et elle s'effectue en général en deux étapes :

1. Prélèvement d'échantillon global du matériau, soit dans une carrière ou dans une usine.
2. Au laboratoire, prélèvement d'un échantillon par quartage pour les essais prévus. Cet échantillon doit être représentatif de l'échantillon du prélèvement de départ (voir annexe 1 pour les détails de la méthode d'échantillonnage).

IV-2-2-2 Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon.

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant des tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis. (Voir annexe1).

Quant à la courbe granulaire, il est bien de la connaître, car plus une courbe est régulière plus le squelette granulaire formé est compacte (meilleure compacité du squelette du béton). Par ailleurs, la courbe granulaire a aussi un effet sur l'ouvrabilité du béton [DEL 00].

Dans ce qui suit nous avons présenté les résultats de l'essai pour les granulats utilisés. Sur la figure IV-3 sont représentées les courbes des granulats naturels utilisés (Sable 0/3 ; gravillons 3/8 et gravillons 8/15).

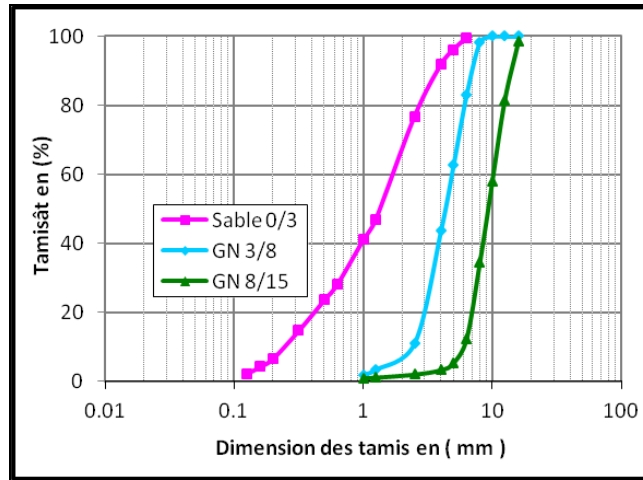


Figure IV-3 : Courbes granulaires des granulats naturels.

Module de finesse du sable

Le module de finesse est défini comme étant la somme des refus cumulés (en pourcentage ramené à l'unité) sur les tamis de modules : 23, 26, 29, 32, 35, 38. Ce paramètre est en particulier utilisé dans les calculs de composition des bétons.

Le module de finesse de notre sable est :

$$MF = \frac{95,66 + 85,29 + 71,81 + 53,00 + 23,21 + 3,88}{100} = 3,33$$

$$MF = 3,33 \Rightarrow \text{Sable grossier}$$

Sur la figure IV- 4 sont représentées les courbes des granulats de béton de démolition, et des gravillons naturels de classe 8/15.

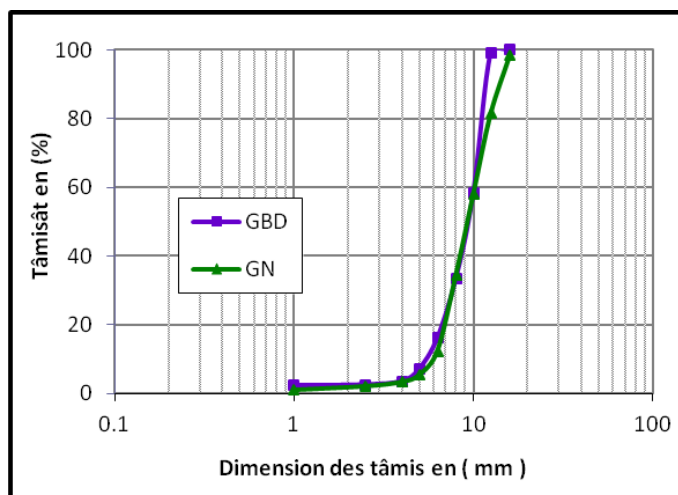


Figure IV- 4 : Courbes granulaires des granulats de recyclage et granulats naturels de classe 8/15.

GN : granulats naturels ; GBD : granulats de béton de démolition.

D'après la figure IV- 4 on remarque que la courbe granulair de GBD, est semblable à celle des GN.

Le descriptif des essais de granulométrie ainsi que les calculs des différents résultats sont donnés dans l'annexe 2.

IV-2-2-3 Coefficient d'absorption et masses volumiques des granulats <NF P 18-555>

La mesure d'absorption est essentielle pour la formulation des bétons. En effet cette mesure va nous permettre de corriger la quantité d'eau finale à introduire dans la composition du béton. En fonction de l'état des granulats avant la gâchée (granulats secs ou saturés ou simplement humides), on doit recalculer la quantité d'eau à introduire dans le béton : ainsi si les granulats sont secs, ils risquent d'absorber de l'eau efficace prévue pour l'hydratation du ciment, et donc voir le rapport E/C en baisse ; à l'inverse si les granulats sont humides ou saturés, dans ce cas les granulats peuvent fournir au béton plus d'eau, et le rapport E/C change en hausse.

Les résultats de caractérisation de l'absorption ainsi que ceux des masses volumiques des différents granulats sont récapitulés dans le tableau IV-1 ci-dessous (les détails de calcul sont donnés dans l'Annexe 2):

Tableau IV- 1 : Masses volumiques et coefficients d'absorption des différents granulats.

	Granulats naturels			Granulats recyclés
	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravillon de béton de démolition 8/15
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,74	2,73	2,71	2,68
Masse volumique réelle (g/cm ³)	2,59	2,63	2,63	2,45
Ab(%)	2,06	1,38	1,15	1 ^{er} essai 3,48
				2 ^{ème} essai 3,80

NB : on a fait deux essais d'absorption pour les granulats de recyclage pour confirmation de cette valeur qui nous semblait être excessive (celle des GBD est deux fois plus grande que celle des GN), les résultats des deux essais sont du même ordre de grandeur voir tableau IV.1.

D'après les résultats on constate que les granulats naturels et les granulats recyclés ont des masses volumiques absolues semblables; par contre les masses volumiques réelle des granulats recyclés sont inférieures que celle des granulats naturels, ceci s'explique par la présence des pores dans les granulats recyclés.

L'essai d'absorption d'eau explique la différence entre les deux granulats (gravier naturels 8/15 et bétons concassés de fraction 8/15) du point de vue densité, parce que les bétons concassés ayant une forte absorption d'eau (environ de 4%) en comparaison avec les granulats naturels (environ de 1%). On peut expliquer ce phénomène par la forte porosité des bétons concassés en

comparaison à celle des granulats naturels. Ce ci est aussi dû à la présence d'une porosité résiduelle de la pâte durci du béton de démolition.

Comparaison des granulats naturels et granulats de recyclage de fraction 8/15



Figure IV- 5 : granulats naturels, granulats de béton de démolition de fraction (8/15).

La forme des grains pour le gravier naturel ainsi que celui provenant du béton concassé est plus au moins ronde, alors que pour celle de grains de brique concassé, a la forme angulaire aigue. La texture des particules des gros granulats issues du béton concassé est couverte d'une couche relativement non négligeable de mortier de ciment. Sur la figure IV-6 est représentée une schématisation des granulats issus de la démolition.

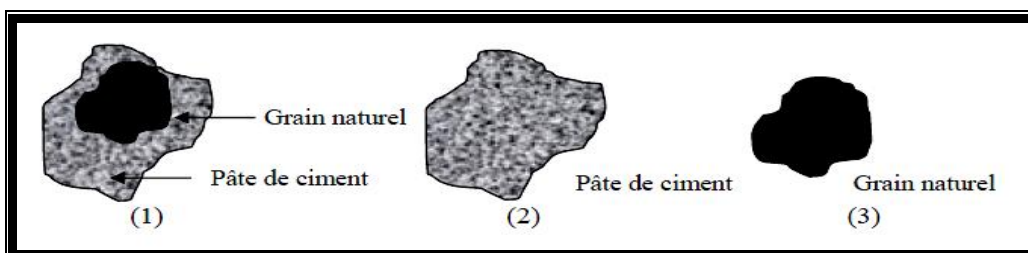


Figure IV- 6 : Formes de granulats recyclés.

- (1) Un grain de gravier enrobé par la pâte de ciment,
- (2) Une pâte de ciment durci seule,
- (3) Un grain de gravier naturel.

Les autres caractéristiques des différents agrégats sont présentées dans le tableau II-2 ci- dessus.

IV-2-3 Formulation du BAP de référence

Pour la formulation d'un BAP, il faut satisfaire deux propriétés qui sont opposés. Une bonne fluidité contre une bonne viscosité ; soit une bonne capacité d'écoulement sans

ségrégation des différentes phases du béton. Ceci rend la phase de formulation plus complexe et plus pointue que les bétons ordinaires vibrés. Les meilleures caractéristiques rhéologiques du béton sont obtenues par le choix des proportions optimales des différents constituants.

Plusieurs méthodes pratiques de formulation des BAP existent, ces dernières procurent des formules théoriques dont les propriétés doivent être vérifiées et validées par des tests de laboratoire voir paragraphe I-12.

Pour la formulation du BAP, nous sommes d'abord passés par les étapes de formulation des bétons ordinaires en termes de résistance et de fraction volumique d'un volume de 1 m³ de béton. Nous avons donc utilisé la méthode de Dreux Gorisse. Pour la formulation du squelette granulaire de notre BAP de référence, nous avons utilisé les courbes des granulats naturels (sable est gravillons 3/8 et 8/15) pour tracer une première courbe granulaire du béton prescrite par la méthode de Dreux Gorisse. Nous avons alors définis les proportions granulaires de ces trois granulats.

Une fois, tous les composants d'un béton sans les additions de marbre sont obtenus, nous avons alors, repris cette formule, nous avons substitué une partie du volume solide prévu pour les granulats, nous l'avons remplacé par des fines de marbre, tout en préservant les proportions volumiques des trois granulats utilisés (voir figure IV-7).

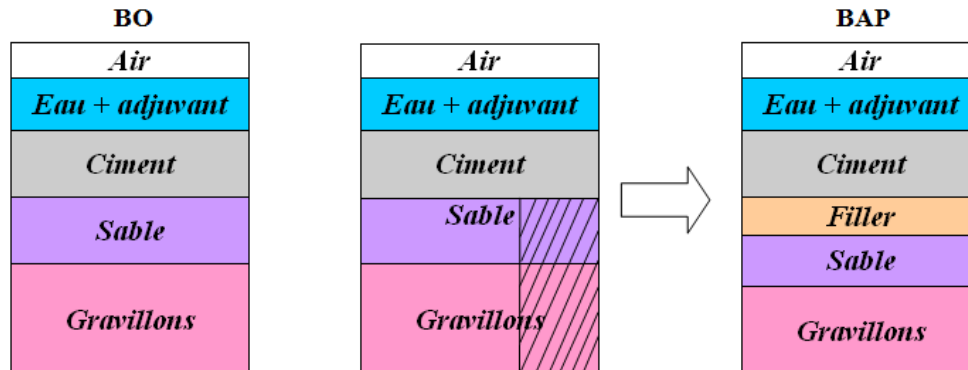


Figure IV- 7 : Schématisation de la mise en place du béton autoplaçant.

Nous avons en dernier réajusté les proportions de chacun des granulats pour que la courbe granulaire finale s'ajuste au mieux avec le fuseau des BAP (voir le détail des compositions dans le tableau IV-3).

Une fois la formule connue, on passe à l'étape test de la formule en laboratoire pour le réajustement, pour avoir la formule (composition) de référence (BAPR) à utiliser pour le reste de l'étude.

IV-2-4 Formulation des autres BAP

Pour définir la composition des bétons autoplaçants à base de granulats de recyclage, nous avons repris la composition de référence (BAPR), et nous avons alors fait une substitution

volumique des granulats de classe granulaire 8/15 par les granulats de recyclage à différents pourcentages.

Les différentes compositions ainsi formulées sont données dans le tableau suivant :

Tableau IV- 2: Nomenclature des formules de BAP à base de granulats de recyclage testés.

Référence	Désignation du BAP	% de GN	% de GBD
BAP1R	BAPR 100/0	100	0
BAP1A	BAPR 100/0	100	0
BAP2R	BAP 50/50	50	50
BAP2A	BAP 50/50	50	50
BAP3R	BAP 25/75	25	75
BAP3A	BAP 25/75	25	75
BAP4R	BAP 0/100	0	100
BAP4A	BAP 0/100	0	100

GN : granulats naturels ; **GBD** : granulats de béton de démolition ; **BAP1R** : BAP destiné pour la résistance ; **BAP1A** : BAP destiné pour l'absorption.

Toutes les compositions étudiées au cours de ce projet de recherche sont présentées dans le tableau IV-3 Les quantités de granulats sont données en masse de matériaux secs.

Tableau IV- 3 : Composition des différents bétons pour 1 m³

Compositions (kg/m ³)	Désignation des bétons							
	BAP1R 100/0 16/04/12	BAP1A 100/0 22/04/12	BAP2R 50/50 24/04/12	BAP2A 50/50 29/04/12	BAP3R 25/75 07/05/12	BAP3A 25/75 06/05/12	BAP4R 0/100 02/05/12	BAP4A 0/100 29/04/12
Ciment	350	350	350	350	350	350	350	350
Fillers marbres	200	200	200	200	200	200	200	200
Sable 0/3	460	460	460	460	460	460	460	460
Gravillon 3/8	110	110	110	110	110	110	110	110
Gravillon 8 /15	520	520	251	251	130	130	*	*
Béton concassé	*	*	264	264	375	375	500	500
Eau totale	194,4	194,4	199,6	199,6	201,6	201,6	206	206
Superplastifiant (%)	1,6047	1,4	1,55	1,675	1,63	1,63	1,70	1,75

Tableau IV- 4 : Caractéristiques des différentes compositions.

Caractéristiques	Bétons							
	BAP1R 100/0	BAP1A 100/0	BAP2R 50/50	BAP2A 50/50	BAP3R 25/75	BAP3A 25/75	BAP4R 0/100	BAP4A 0/100
Rapport E_{eff} / C	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
Rapport G / S (volumique)	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
Volume de pâte (l)	580	580	580	580	580	580	580	580
Volume de granulats en (l)	420	420	420	420	420	420	420	420
Volume de fines (diamètre < 80 μm)	426	426	426	426	426	426	426	426

IV-3 Conclusion

D'après les résultats de l'essai d'absorption on constate que les granulats de béton de démolition ont un coefficient d'absorption supérieur à ceux de granulats naturels. Ceci s'explique par la porosité élevée de matériau.

Chapitre V

*Expérimentation &
Exploitation*

V-1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons présenté les étapes de confection des BAP ; depuis les pesées des matériaux jusqu'aux essais de caractérisation. On a décrit les méthodes d'essais utilisées, les conditions de fabrication et de conservation des éprouvettes. Nous avons par la suite présenté les résultats de caractérisation des BAP à l'état frais, puis les résistances en compression à 28 jours et en traction par fendage, effectuées sur des éprouvettes (16×32) cm², ensuite les résultats de la porosité ouverte et d'absorption par capillarité de nos BAP.

Nous avons dans une deuxième phase, donné les interprétations, comparaisons et conclusions des résultats de caractérisation des différentes formulations étudiées.

V-2 Confection des bétons

V-2-1 Préparation de la gâchée

Pour la confection des bétons, il y a lieu dans un premier temps de préparer le nécessaire en matériel et matériaux.

Pour uniformiser les essais, nous avons décidé de travailler avec des granulats secs. Il a donc fallu mettre en étuve tous les granulats pour sécher pendant au moins 24 heures. Après séchage, faire en sorte que tous les granulats soient ramenés à la température ambiante et les mettre en sac pour éviter qu'ils reprennent de l'humidité.

Préparer les moules prévus pour les éprouvettes de béton, les moules sont huilés pour faciliter le décoffrage.

Préparer les pesées des matériaux à utilisés (gravillons, ciment, filler...). Séparer l'eau en deux quantités ($\approx 10\%$ pour l'humidification des granulats et $\approx 90\%$ le reste d'eau prévue pour le béton).

Tous le matériels nécessaire est préparé (balances, récipient, spatules, truelles, cône d'Abrams, table pour l'étalement, boîte en L, tamis et fond de tamis pour l'essai de stabilité, chronomètre, mètre Tout le matériel est pré-humidifié. Le malaxeur utilisé est à axe vertical de mouvement planétaire.



Figure V- 1 : Malaxeur utilisé.

Après avoir déterminé les proportions de chaque composant, la séquence de malaxage retenue a été la suivante :

- Humidifier tout le matériel à utiliser ;
- Introduire le sable et les gravillons dans le malaxeur ;
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30 s ;

- d. Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement l'eau de pré-humidification et le mélanger pendant 30 s ;
- e. Laisser reposer 1 mn 30 s ;
- f. Ajouter le ciment et la poudre de marbre, ensuite mélanger le tout durant 30 s ;
- g. Verser l'eau restante graduellement et laisser se malaxer pendant 60 s ;
- h. Introduire le super-plastifiant et malaxer pendant 1mn 30 s.
- i. Effectuer immédiatement les essais de caractérisation du béton frais, voir la description des essais en annexe 3 (Essai d'étalement, Essai de stabilité au tamis).
- j. Remplir les moules d'éprouvettes par simple versement (sans vibration).

V-2-1-1 Etalement des BAP

L'essai au cône d'Abrams est l'un des essais les plus couramment utilisés car il est très simple à mettre en œuvre. Cet essai est traditionnellement utilisé pour mesurer l'affaissement d'un béton et ainsi définir son caractère plus ou moins plastique « norme NFP 18 451 soit NA 431 ».

L'affaissement des BAP étant total, c'est une mesure du diamètre de la galette obtenue après étalement qui est réalisée. Cette mesure permet de déterminer la capacité du matériau à s'écouler en milieu non confiné donc sans obstacle. (Voir figure V- 2). Lors de l'essai d'étalement une observation visuelle peut nous renseigner sur la stabilité du béton (absence de ségrégation).



Figure V- 2 : essai d'étalement.

V-2-1-3 Essai de la stabilité au tamis

L'essai au tamis est utilisé pour caractériser la stabilité du béton, soit son caractère à résister à la ségrégation statique : descente des gros gravillons par l'effet de la gravité et remonté de la pâte qui est légère.



Figure V- 3: Photo descriptive de l'essai de stabilité au tamis (le tamis est de 5 mm).

Cet essai nous permet également de voir s'il y a un problème de ressuage précoce (soit dans les 15 minutes après la gâchée) (voir figure V- 3).

V-2-2 Confection des éprouvettes

Nous avons utilisé des moules cylindrique (16×32) cm^2 conformément à la norme NF P18-406 pour la résistance mécanique en compression.

Après mise en place du béton dans les moules (fabrication des éprouvettes), ils sont laissés pendant 24 heures dans la salle de fabrication. Nous avons protégé les éprouvettes d'un film en plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées. On a remarqué que la qualité des produits finis (aspect) est très bonne. (Voir figure V- 4).



Figure V- 4: Remplissage des éprouvettes, protection des éprouvettes d'un film plastique ; apparence des éprouvettes après le décoffrage, marquage des éprouvettes.

Une fois démoulés, on mentionne sur la surface supérieure des éprouvettes la date de leur confection et la référence du béton. Les éprouvettes sont par la suite immergées dans un bac rempli d'eau à la température ambiante. Les éprouvettes sont alors conservées jusqu'à l'âge de 28 jours soit 27 jours dans le Bac d'eau.

Les éprouvettes sont alors retirées, pesées, pour être testées aux essais prévus (résistance à la compression à 28 jours, résistance en traction par fendage à 40 jours, porosité ouverte, et absorption capillaire).

V-2-3 Essais sur les éprouvettes

Pour notre étude nous avons confectionné 4 formules de BAP en faisant varier les pourcentages des granulats naturels et des granulats de béton démolition. Ces BAP sont testés en compression et en traction d'une part, puis nous avons évalué leur porosité ouverte ainsi que leur absorption capillaire. Une étude comparative est alors effectuée entre les résultats du BAP de référence et ceux des BAP à granulats de recyclage.

V-2-3-1 Essais de résistance à la compression à 28 jours

La résistance mécanique en compression d'un béton correspond à la charge de rupture (charge maximale enregistrée) au cours de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette (voir figure V- 5).

Les éprouvettes utilisées pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés sont cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm.

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 2000 KN, (voir figure V- 5). La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.



Figure V- 5 : Rupture de l'éprouvette ; La presse utilisée.

V-2-3-2 Essais de traction par fendage

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien".

La rupture de l'éprouvette s'effectue suivant un plan diamétral vertical sous l'influence des contraintes de traction qui se développent perpendiculairement à la traction de compression.

Pour éviter une rupture locale en compression au niveau des génératrices de chargement et répartir la charge appliquée, deux bandes minces en acier sont insérées entre les plateaux de chargement et l'éprouvette. Sans les bandes, la résistance mesurée est habituellement plus faible de 8 % en moyenne [NEV00].

Cette configuration induit un effort de traction uniforme le long du plan diamétral situé entre les deux génératrices. Les déformations se localisent rapidement par l'apparition, le plus souvent, d'une seule fissure transversale dans la zone du plan diamétral sollicité, la rupture est caractérisée par le fendage de l'éprouvette en deux moitiés à travers le plan diamétral (Figure V-6)

Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera évaluée selon l'équation :

$$f_{ij} = 2 \frac{P}{\pi D L} \quad \text{V-1}$$

Avec : P : effort de compression appliqué, j : âge du béton (en jours) au moment de l'essai, D et L : diamètre et longueur du cylindre en (mm).

Les dispositions de mise en charge sont précisées dans le schéma ci-dessous par la norme N F P 18-408.



Figure V- 6 : Dispositif de chargement pour l'essai de fendage, rupture de l'éprouvette.

Les éprouvettes utilisées pour déterminer la résistance à la traction par fendage des différents bétons étudiés sont cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm.

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 200 kN, (voir figure V- 6). La résistance en traction par fendage a été évaluée suivant la norme NF P 18-408. La mise en charge s'effectue avec une vitesse constante de 0,5 MPa/s, jusqu'à la rupture de l'éprouvette (voir figure V- 6).

V-2-3-3 Porosité ouverte

Elle est caractérisée par le volume poreux mesuré à partir de la porosité ouverte accessible à l'eau, s'obtient par simples pesées de l'échantillon sec et saturé.

En fait, la porosité est la somme de la porosité connectée ou ouverte (ensembles de pores reliés à l'extérieur) et de la porosité fermée (celle qui n'est pas connectée avec l'extérieur). Seule la première est accessible aux fluides.

Dans notre essai nous avons mesuré la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton. Effectuée sur des éprouvettes cylindriques de base 16 cm et de hauteur 32 cm, les opérations sont effectuées dans l'ordre suivant :

- Immersion dans un bac à eau durant 28 jours; avant la pesée, l'éprouvette est essuyée avec un tissu absorbant de manière à la débarrasser de l'excès d'eau de la surface extérieure;
- Séchage durant 72 heures jusqu'à masse sèche constante dans une étuve dont la température est maintenue à 80°C.

Il faut souligner que le traitement en salle sèche est absolument nécessaire afin que l'eau contenue dans tous les pores accessibles, à des profondeurs par rapport à la surface extérieure, puisse quitter l'éprouvette.

La porosité accessible à l'eau (P_{ae}) est exprimée en pourcentage de la masse sèche et calculée par la relation suivante :

$$P_{ae} = \frac{m_{humide} - m_{sèche}}{m_{sèche}} \times 100 \quad \text{V-2}$$

Avec : m_{humide} : la masse humide constante de l'éprouvette après immersion en (kg); $m_{sèche}$: la masse sèche constante de l'éprouvette après séchage à l'étuve en (kg).

V-2-3-4 Essai d'absorption par capillarité

Les éprouvettes séchées pendant 72 heures, sont ensuite immergées dans un récipient sur une hauteur de 5 cm. Pour que le fond de ces éprouvettes soit accessible à l'eau on a mis des billes au fond du bac. A chaque échéance de pesée, les éprouvettes sont essuyées à l'aide d'un tissu absorbant, pesées, puis replacées dans le récipient. Les échéances de pesées sont les suivantes : 1, 2, 3, 4.5, 6, 5,24 ,26 ,29 heures.

Le coefficient d'absorption capillaire est exprimé en pourcentage de la masse sèche et calculé par la relation suivante :

$$Abs(t) = \frac{m(t) - m_{sèche}}{m_{sèche}} \times 100 \quad \text{V-3}$$

Avec : $m(t)$: la masse de l'éprouvette à une échéance donnée en (kg); $m_{\text{sèche}}$: la masse sèche constante de l'éprouvette après séchage à l'étuve en (kg).

V-3 Résultats de caractérisation des BAP à l'état frais et discussions

V-3-1 Résultats de caractérisation à l'état frais

La plupart des formulations de BAP sont conçues actuellement de manière empirique voir la bibliographie. Cependant, on doit concilier deux caractéristiques contradictoires la fluidité et la viscosité pour limiter la ségrégation. Par conséquent les BAP doivent satisfaire plusieurs tests, à savoir (l'étalement au cône d'Abrams, le LBox et la stabilité au tamis). Les essais de caractérisation ont été effectués selon les procédures décrites au chapitre I (voir paragraphe **I-10-1**). Toute fois, dans notre cas, nous n'avons pas caractérisé nos BAP à la boîte en L car La boîte disponible dans notre laboratoire est métallique, elle présente un état de rouille assez avancé, ce qui a rendu l'écoulement du BAP à l'intérieur assez difficile. Le béton s'adhère aux parois rouillées.

Tableau V- 1 : Propriétés à l'état frais des diverses formulations.

		Dosage en SP	Etalement (mm)	Stabilité au tamis (%)
BAP1R	BAPR 100/0	1,60	680	12,70
BAP1A	BAPR 100/0	1,40	570	/
BAP2R	BAP 50/50	1,55	570	09,05
BAP2A	BAP 50/50	1,70	750	/
BAP3R	BAP 25/75	1,63	640	03,34
BAP3A	BAP 25/75	1,63	690	/
BAP4R	BAP 0/100	1,70	650	08,50
BAP4A	BAP 0/100	1,75	660	/

On rappelle que le BAP1A et BAP1R sont les mêmes formules, mais deux gâchées différentes. Nous avons été obligé de gâcher en deux fois, car la capacité du malaxeur est limitée et nous permet pas de faire des volumes importants en béton. De ce fait, la mesure de la stabilité au tamis nous l'avons faite une seule fois pour chaque formule (première gâchée uniquement).

Avec le super-plastifiant utilisé nous avons pu avoir des BAP et cela dans la plage des dosages prescrits dans la fiche technique du produit (soit 2 %).

V-3-2 Discussions des résultats de caractérisation à l'état frais

V-3-2-1 L'étalement des BAP

L'étalement d'un béton auto-plaçant peut varier entre 550 et 850 mm selon l'association française du génie civil [AFGC, 2000]. Les résultats obtenus présentés sur le tableau V-1, montrent que tous nos BAP ont des étalements situés à l'intérieur du domaine des BAP.

Pour toutes les compositions de BAP, l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était absente. Les gravillons ont toujours été entraînés correctement par la pâte de ciment et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton.

Nos bétons présentent un bon étalement sans ségrégation, donc cette composition respecte le critère d'étalement d'un BAP.

V-3-3-2 Essai de la stabilité au tamis

Tous nos bétons ont présentés une bonne stabilité au tamis, pas de ségrégation statique. En effet, la quantité de laitance est située dans le domaine des BAP, soit inférieure à 20 % pour tous les BAP validés (voir tableau V- 1).

V-4 Résistances à la compression des BAP et comparaison

V-4-1 Résistances des BAP à 28 jours

Les valeurs des résistances mécaniques de toutes les éprouvettes est pour les différents bétons sont données dans le tableau V- 2. Nous avons également donné les valeurs des pesées de toutes les éprouvettes. Sur le même tableau nous avons donné les résistances moyennes ainsi que les pesées moyennes correspondant à chaque BAP. Ces moyennes sont calculées en utilisant la relation suivante :

$$X_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} X_i}{3} \quad \text{V-4}$$

Avec : X correspond à la variable mesurée (résistance puis pesée).

Tableau V- 2 : Récapitulatif des résultats de résistance et des pesées des différents BAP.

BAP\éprouvettes		n° 01	n° 02	n° 03	Moyennes
BAPR100/0	Poids (kg)	14.74	14.78	14.74	14.75
	R _{C28} (MPa)	26.05	27.74	27.35	27.05
BAP 50/50	Poids (kg)	14.53	14.60	14.63	14.59
	R _{C28} (MPa)	24.64	25.02	21.16	23.61
BAP 25/75	Poids (kg)	14.54	14.46	14.52	14.51
	R _{C28} (MPa)	23.21	21.48	25.24	23.31
BAP 0/100	Poids (kg)	14.48	14.53	14.56	14.52
	R _{C28} (MPa)	21.43	22.21	17.72	20.45

Pour la discussion des résultats de résistances, nous avons calculé en plus des valeurs moyennes de résistance, les écarts type des trois mesures de résistance. Nous avons regroupé ces

valeurs sur le tableau V- 3. Les écarts type sont calculés, dans un premier temps sur les trois mesures de chacun des bétons selon la formule suivante :

$$Ecart\ type = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{ci} - R_{cmoy})^2}{n - 1}} \quad \text{V-5}$$

Avec : n : nombre de mesures (pour un nombre d'opération limitée $n \leq 10$ on prend n-1 au lieu de n) ; R_{cmoy} : résistance à la compression moyenne de l'éprouvette i.

Tableau V- 3 : Résistances moyennes en compression des BAP et calcul d'écarts types (MPa).

	n 01	n 02	n 03	Moy	<u>Etype</u>
BAPR 100/0	26.05	27.74	27.35	27.05	<u>0.88</u>
BAP 50/50	24.64	25.02	21.16	23.61	<u>2.13</u>
BAP 25/75	23.21	21.48	25.24	23.31	<u>1.88</u>
BAP 0/100	21.43	22.21	17.72	20.45	<u>2.40</u>

Les 4 valeurs d'écart type obtenues sur les 4 formules de BAP sont légèrement différentes. Cette différence est due au fait que le nombre d'éprouvettes testées pour chacune des formules est petit (population de l'échantillon de 3 éprouvettes).

Et comme on ne connaît pas la précision de la presse de béton, nous avons alors estimé notre écart type de résistance à la compression de nos bétons par la moyenne des écarts type de chacun des bétons. L'écart type de la population => l'écart type de l'échantillon et l'inverse n'est pas valable : l'écart type de l'échantillon \neq l'écart type de la population.

Moyenne des écarts type = 1,82.

Tableau V- 4 : Résistances moyennes des BAP et plages de variation des résistances.

	Moyenne	Moyenne – 1,82	Moyenne + 1,82
BAPR 100/0	27.05	25.22	28.87
BAP 50/50	23.61	21.78	25.43
BAP 25/75	23.31	21.49	25.13
BAP 0/100	20.45	18.63	22.28

Ce tableau nous renseigne donc sur les valeurs caractéristiques en résistance de chaque BAP, ainsi que la plage de variation de chacune des valeurs.

Notre premier constat porte sur la résistance à 28 jours du BAP de référence. Avec les matériaux utilisés, qui sont des matériaux locaux nous avons formulé un BAP qui présente une bonne résistance mécanique à la compression à 28 jours (27 MPa) tout en sachant que nous avons utilisé un ciment 42,5 et un rapport E/C = 0,43.

En ce qui concerne les autres BAP testés, ils ont des valeurs de résistance à 28 jours supérieures à 20 MPa et inférieures à 26 MPa. Le BAP à 100% de granulats de recyclage présente une valeur de 20.45 MPa. Pour les autres BAP leurs résistances sont situées entre celles des BAP à 100 % de granulats de recyclage et 100 % de granulats naturels.

V-4-2 Etude comparative de résistances en compression des BAP

Pour une meilleure comparaison nous avons représenté sur la figure V- 7 les BAP selon le pourcentage de substitution des granulats naturels par les granulats de recyclage (de gauche vers la droite : BAP à 100% de granulats naturels, puis 50%, 25 % et en dernier le BAP à 0 granulats naturels soit 100% de granulats de béton de démolition).

Les résultats sont représentés sous forme d'histogramme, l'écart type des mesures est schématisé par une barre d'erreur.

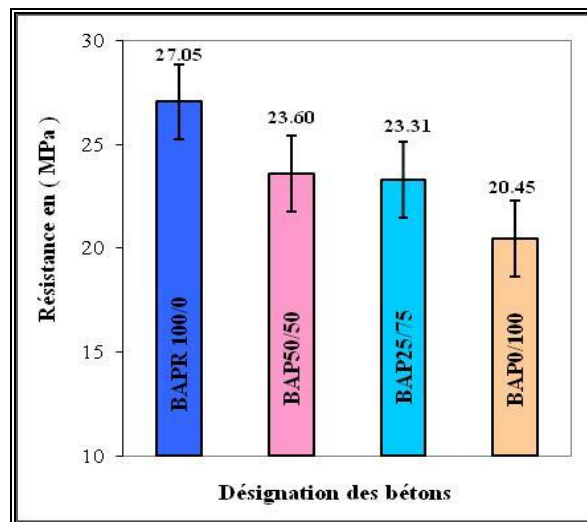


Figure V- 7 : Résistances à la compression du BAP de référence et des BAP à granulats de recyclage.

Sur la figure V-7, on constate que le BAP50/50 et le BAP25/75 ont quasiment les mêmes résistances (23.60 MPa et 23.31 MPa) et sont inférieures à celle du BAP de référence (BAPR 100/0) soit 27.05 MPa. Le BAP0/100 a une résistance de 20.45 MPa qui est inférieure à celle du BAP100/0.

Globalement, on peut conclure que la résistance à la compression a tendance à baisser légèrement en fonction du taux de substitution de granulats recyclés comme représenté sur la figure suivante.

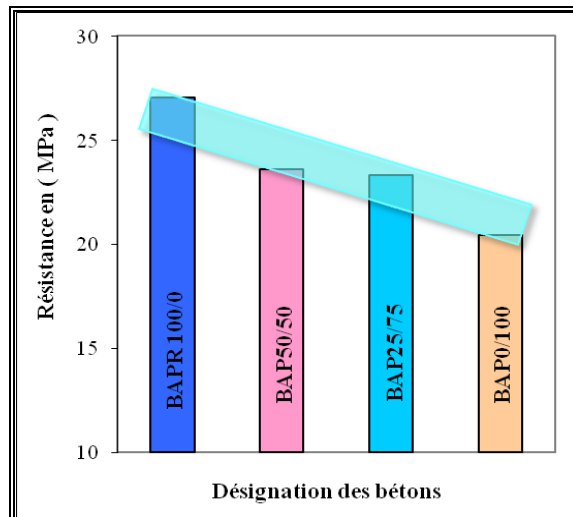


Figure V- 8 : Fuseau de tendance d'évolution de la résistance à la compression des BAP en fonction du pourcentage de substitution des gravillons de béton de démolition.

Toute fois, il est bien de souligner que le fait de substituer aux granulats naturels, en partie ou en totalité, par des granulats de béton de démolition on obtient des bétons à résistances légèrement inférieur à celle du BAP de référence à granulats naturels.

V-5 Résistances en traction des BAP et comparaison

V-5-1 Résistances des BAP à 40 jours

Les valeurs des résistances mécaniques en traction par fendage de toutes les éprouvettes est pour les différents bétons sont données dans le tableau V- 5.

Tableau V- 5 : Récapitulatif des résultats de résistance en traction par fendage et poids des éprouvettes des BAP.

BAP\éprouvettes		n ° 01	n ° 02	n ° 03	Moyennes
BAPR 100/0	Poids (kg)	14.82	14.83	14.84	14.83
	R ₁₄₀ (MPa)	1.86	2.42	1.94	2.07
BAP 50/50	Poids (kg)	14.60	14.59	14.54	14.58
	R ₁₄₀ (MPa)	2.01	2.14	2.45	2.20
BAP 25/75	Poids (kg)	14.56	14.55	14.59	14.57
	R ₁₄₀ (MPa)	1.77	1.91	1.77	1.82
BAP 0/100	Poids (kg)	14.48	14.49	14.51	14.49
	R ₁₄₀ (MPa)	1.88	1.79	1.92	1.86

Sur ce tableau sont données les résistances moyennes calculées en utilisant relation V-4

V-5-2 Etude comparative de résistance en traction des BAP

Pour comparer les valeurs de résistance en traction par fendage des différents BAP, nous avons procédé de la même manière qu'à la comparaison des résultats en résistance à la compression. Nous avons calculé les écarts types, dans un premier temps sur les trois mesures de chacun des bétons. Ensuite, nous avons calculé la moyenne des écarts type qui égale à 0,17 voir tableau suivant :

Tableau V- 6 : Résistances moyennes en traction des BAP et calcul d'écarts types (MPa).

	n 01	n 02	n 03	Moy	<i>Etype</i>	Moy - 0,17	Moy + 0,17
BAPR 100/0	1.86	2.42	1.94	2.07	<u>0.30</u>	1.90	2.24
BAP 50/50	2.01	2.14	2.45	2.20	<u>0.22</u>	2.03	2.37
BAP 25/75	1.77	1.91	1.77	1.82	<u>0.08</u>	1.65	1.99
BAP 0/100	1.88	1.79	1.92	1.86	<u>0.06</u>	1.69	2.03

Sur la figure V-9, les résultats sont représentés sous forme d'histogrammes, nous avons de plus, représenté pour chaque colonne les barres d'erreurs correspondant aux valeurs mesurées.

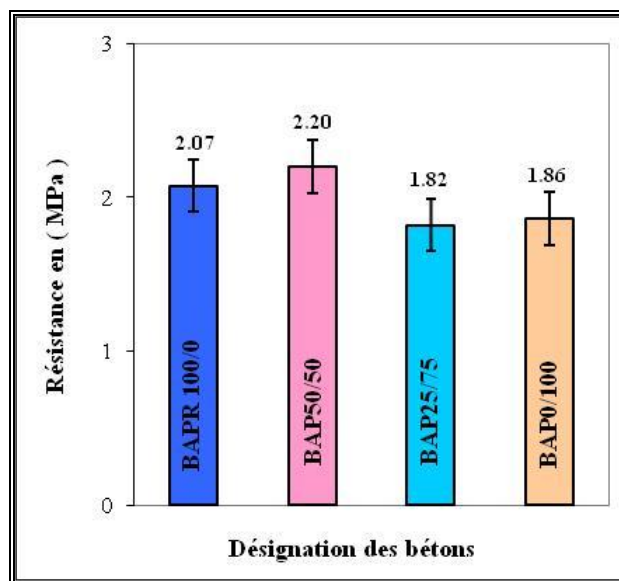


Figure V- 9 : Résistances en traction par fendage du BAP de référence et des BAP à granulats de béton de démolition.

On constate que les différences de résistances en traction par fendage entre les différentes formules de BAP étudiées ne sont pas importantes, elles sont du même ordre de grandeur que celle du BAPR100/0. Toute fois, les résultats du BAP25/75 et du BAP0/100 sont pratiquement identiques (1,82 MPa et 1,86 MPa), et légèrement inférieurs à ceux du BAPR100/0. Le BAP50/50 a une résistance légèrement supérieure à celle du BAP BAPR 100/0.

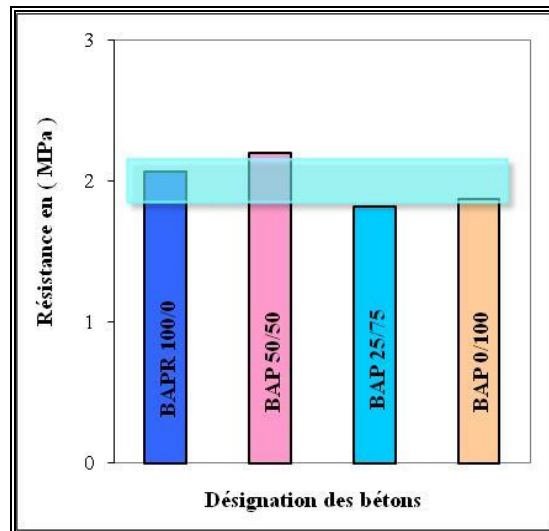


Figure V- 10 : Fuseau de tendance d'évolution de la résistance en traction par fendage des BAP en fonction du pourcentage de substitution des gravillons de béton de démolition.

Le fuseau tel que schématisé sur la figure V-10, nous permet de conclure, que, globalement, les BAP à base de granulats de béton de démolition de taux de substitution en granulats naturels (50%, 25%, et 100%) se caractérisent par les mêmes résistances en traction par fendage que celle de BAP à base de granulats naturels.

V-6 Porosité ouverte des BAP et absorption capillaire des BAP

On a vu au chapitre II que la durabilité du béton s'explique, en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans le réseau poreux des bétons. La cinétique de dégradation du béton dépend de la vitesse de transfert par diffusion ou par perméabilité des substances chimiques, donc du réseau poreux, dimensions des pores et connectivité des pores.

Le béton est un matériau poreux, les dimensions et la tortuosité varient suivant les caractéristiques de composition du béton soit son rapport Eau/Ciment, nature du ciment, présence d'additions minérales, etc. Lorsqu'un liquide se retrouve en contact des pores capillaires (pores ouverts à l'extérieur susceptibles d'absorber les fluides par capillarité), des tensions de surface font remonter ce liquide à l'intérieur du capillaire.

La remontée capillaire de l'eau dans les matériaux provoque des désordres dans la construction. Il est nécessaire de concevoir des matériaux où la remontée des eaux est lente ou bien utiliser des matériaux qui absorbent moins d'eau.

V-6-1 Porosité ouverte

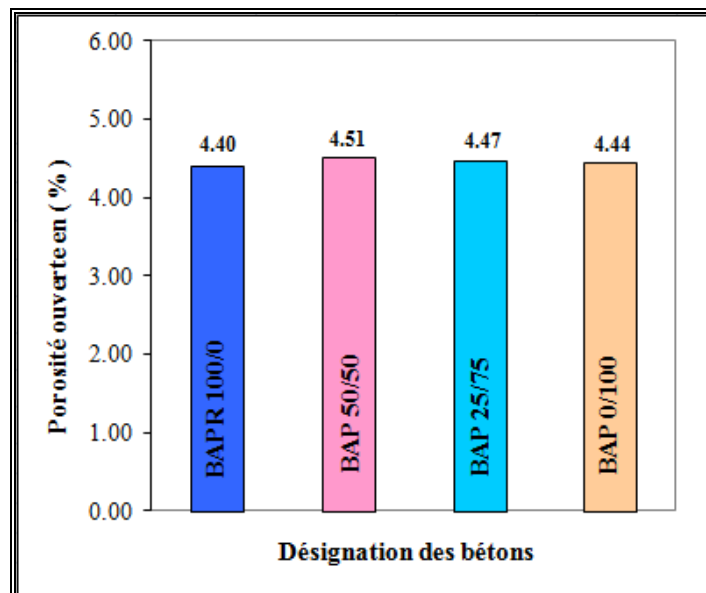
Les résultats de la porosité accessible à l'eau obtenus sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm pour les différentes formules de BAP étudiées sont récapitulés dans le tableau V-7

Tableau V-7: Résultats porosité accessible à l'eau (porosité ouverte) des BAP

	BAPR 100/0	BAP 50/50	BAP 25/75	BAP 0/100
M saturée en (kg)	14.82	14.60	14.58	14.49
M sèche en (kg)	14.20	13.97	13.95	13.88
Porosité en %	4.40	4.51	4.47	4.44

La porosité ouverte (porosité accessible à l'eau) est calculée par la relation V-1. Elle correspond au rapport de la masse absorbée par un échantillon, initialement sec, immergé dans l'eau sur la masse sèche de l'échantillon.

Les résultats de porosité ouverte accessible à l'eau obtenus pour les différents BAP étudiés sont représentés sur la figure V.11 sous forme d'histogrammes.

**Figure V- 11 :** Porosité ouverte (accessible à l'eau) des BAP.

Selon les résultats obtenus, on constate que les BAP à base de granulats de recyclages, ont des porosités accessibles à l'eau légèrement supérieures à celle du BAP à base de granulats naturels. Cela peut être lié au fait que les granulats de démolition sont des composés de granulats naturels et de pâte de ciment vieilles, pâte qui à priori présente déjà une certaine porosité résiduelle, ce qui se répercute sur la porosité finale du béton formulé par ces granulats.

Toute fois ces résultats peuvent être considéré intéressants, car les porosités obtenues sur les BAP à granulats de démolition ne sont pas trop élevées par rapport à celles obtenues sur les BAP à granulats naturels, ce qui nous permet de conclure que les BAP à granulats de démolition présenteraient une durabilité équivalente à celle des BAP à base de granulats naturels.

V-6-2 Absorption capillaire des BAP

L'absorption d'eau par capillarité a été examinée pour tous les BAP étudiés (BAPR 100/0, BAP 50/50, BAP 25/75, BAP 0/100). Le détail des essais est donné au § V-2-3-4.

Les moyennes des résultats de trois essais d'absorption capillaire, sur une durée de plus de 24 heures, sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm a été calculée et reportée dans le tableau V-8.

Tableau V-8 : résultats des pesées et calcul de l'absorption par capillarité, sur plus de 24 heures, des éprouvettes des différentes formules de BAP.

Temps en heures	BAP R 100/0		BAP 50/50		BAP 25/75		BAP 0/100	
	Poids	Absorption	Poids	Absorption	Poids	Absorption	Poids	Absorption
0	14.197	0.000	13.967	0.000	13.953	0.000	13.875	0.000
1	14.266	0.461	14.038	0.485	14.011	0.435	13.950	0.504
2	14.276	0.532	14.050	0.574	14.028	0.557	13.967	0.623
3	14.285	0.599	14.063	0.662	14.037	0.625	13.980	0.717
4.5	14.295	0.669	14.072	0.728	14.047	0.695	13.990	0.791
6.5	14.305	0.736	14.081	0.795	14.056	0.758	13.999	0.859
24	14.340	0.982	14.121	1.083	14.101	1.081	14.047	1.201
26	14.340	0.986	14.123	1.093	14.101	1.082	14.049	1.218
29	14.343	1.007	14.126	1.117	14.105	1.108	14.053	1.243

Dans le tableau V-8 sont donnés les résultats des pesées et le calcul de l'absorption par capillarité, sur 29 heures, des éprouvettes des différentes formules de BAP. Dans ce cas l'absorption est calculée par la relation V-3. Les résultats d'absorption capillaire obtenus sont représentés sur la figure V-12.

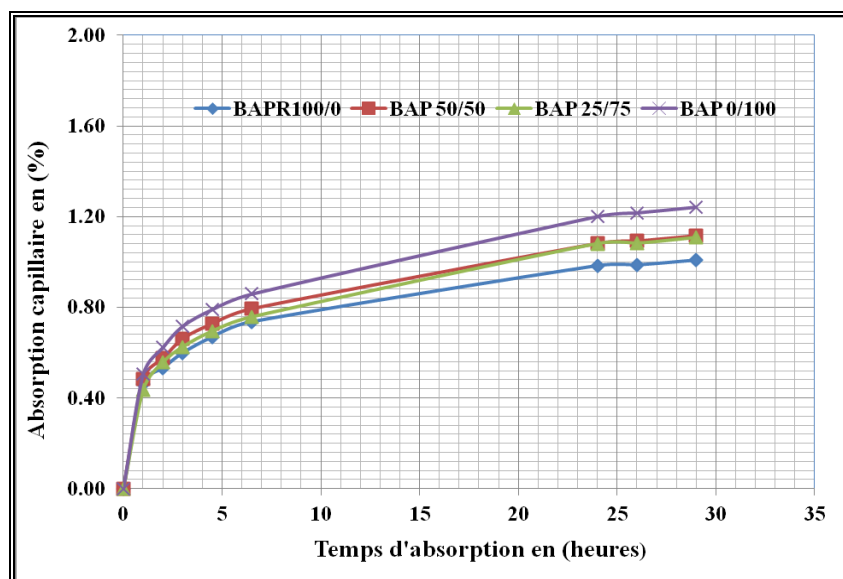


Figure V-12 : Absorption d'eau par capillarité des BAP en fonction du temps (heures).

Notre premier constat porte sur l'évolution dans le temps de l'absorption capillaire des BAP, on remarque que dans l'intervalle du temps 0 à 5 heures d'immersion, la pente des courbes est raide se qui se traduit par une forte cinétique d'absorption. Au delà de 5 heures le taux d'évolution des courbes baisse l'absorption est ralentie et temps vers une valeur asymptotique (constante).

A partir de ces courbes, on constate que les BAP à base de granulats de recyclage de taux de substitution en granulats naturels (25%, 50%, et 100%) ont des absorptions légèrement supérieures par rapport à celle du BAP de référence.

Cette différence peut être liée au fait que les granulats de démolition présentent une absorption deux fois supérieures à celle des granulats naturelles (voir le tableau IV-2).

Toute fois, la différence constatée entre les différents BAP n'est pas très grande, ce qui nous laisse espérer que les BAP à granulats de démolition vont résister, à priori de la même manière, que les BAP de référence aux problèmes de dégradation. Ils vont donc présenter une durabilité semblable.

V-7 Vérification de l'absence de la ségrégation

L'essai de traction par fendage permet également de contrôler la ségrégation statique d'un BAP ; à la rupture, l'éprouvette est éclatée selon son plan diamétral en deux moitiés (Figure V-6). Suivant le sens du coulage, on observe la répartition des granulats sur la hauteur de l'éprouvette (voir figure V-13).

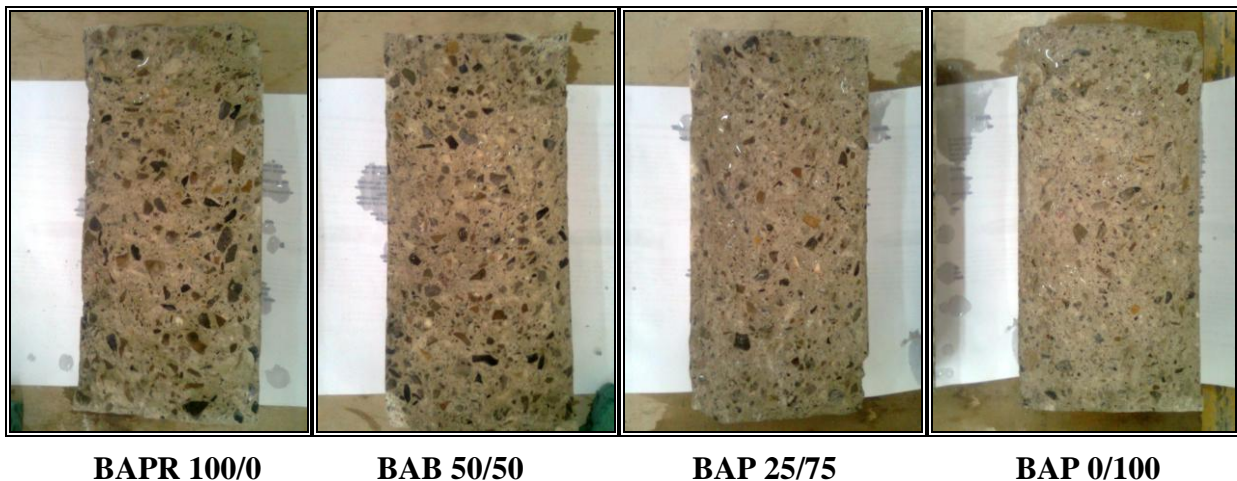


Figure V-13 : Observation de la répartition des granulats de quatre BAP.

La coupe de l'éprouvette nous permet de voir la répartition des granulats sur toute la section de l'éprouvette. Elle nous permet surtout de voir s'il n'y a pas eu de ségrégation statique (tassement de granulats par l'effet de la pesanteur).

Ces photographies illustrent bien le fait que les quatre formulations de béton présentées ici (BAPR 100/0, BAP 50/50 BAP 25/75 et BAP 0/100) ne sont pas sujettes à la ségrégation statique. Les granulats sont en effet régulièrement répartis sur toute la hauteur des échantillons

divisés (coulés verticalement depuis le haut par simple versement). Cette observation a été répétée pour toutes les compositions de BAP étudiées et a conduit à la même conclusion.

V-8 Conclusions

Par les résultats que l'on vient de présenter on peut tirer les conclusions suivantes :

- Avec les matériaux utilisés, qui sont des matériaux locaux nous avons pu formuler un béton auto-plaçant de référence qui présente une assez bonne résistance mécanique à la compression et à 28 jours soit 27 MPa. On rappelle que la formule de référence est composée de granulats naturels, des fines de marbre, d'un ciment 42,5 et a pour rapport $E/C = 0,43$.
- L'introduction du super-plastifiant, mais surtout des fines de marbre recyclés, nous ont permis de formuler des béton à ouvrabilité conforme à celle de BAP, toute en assurant le compromis entre une bonne fluidité par le superplastifiant et une bonne viscosité par les fines de marbre.

Les BAP à granulats de recyclage sont formulés en substituant le volume des gravillons naturels dans le BAP de référence par le même volume en granulats de recyclage. Tous les autres paramètres de formulation sont restés identiques (mêmes quantités en ciment, eau, filler, sables).

- Les BAP à base de gravillons de recyclage (en partie ou en totalité) présentent des résistances à la compression intéressantes, supérieures à 20 MPa, mais inférieure à celle du BAP de référence qui a 27 MPa.
- De la même manière, les BAP à base de gravillons de recyclage présentent des résistances à la traction du même ordre de grandeur que celle du BAP de référence soit en moyenne 2 MPa.
- Les BAP à granulats de recyclage présentent des porosités ouvertes et des absorptions par capillarité à l'eau légèrement supérieures à celles des BAP à granulats naturels. Cette différence est à priori liée au fait que les granulats de béton de démolition présentent une absorption deux fois plus importante que celle des granulats naturels. De plus les granulats de démolition avec la pâte de ciment durcie et vieillie ils présentent déjà une porosité résiduelle.

Au final, on peut dire que les différents résultats obtenus sur les BAP à granulats de démolition à savoir la résistance en compression, la résistance en traction, la porosité ouverte et l'absorption par capillarité d'eau sont satisfaisants. Cela se traduira par la possibilité de production de béton environnemental, performant en termes de résistance et de durabilité. De plus il nous permettra de réduire les problèmes des déchets du secteur du bâtiment.



Conclusions générales

Conclusions générales

L'objectif principal fixé pour cette étude est d'étudier les performances d'un béton autoplaçant formulé à base de granulats de béton de démolition. On s'est particulièrement intéressé aux résistances à la compression et à la traction des BAP, mais aussi à l'aspect de durabilité par l'étude de la porosité ouverte du BAP et de l'absorption capillaire.

La substitution des granulats naturels, partiellement ou en totalité, par des granulats recyclés dans un béton offre des gains économiques et environnementaux. Les granulats de recyclages représentent une nouvelle source d'approvisionnement des chantiers en granulats. Cette substitution permet d'alléger l'exploitation excessive des gisements naturels (carrières et rivières...) donc une économie de matériaux naturels. L'utilisation des granulats recyclés dans la fabrication du béton offre une bonne solution au problème de la gestion des déchets des constructions. Suite à ceux-là, on peut dire que l'utilisation des granulats de recyclage contribue à la préservation de l'environnement.

Les résultats obtenus par l'étude menée nous permettent de conclure ce qui suit :

- L'utilisation des déchets de marbre comme filler a été avantageux pour formuler tous nos bétons autoplaçants. Avec cette addition, nous avons pu avoir des BAP à bonne viscosité (pas de ségrégation) sans ajout d'agent de viscosité.
- Tous les BAP formulés par des granulats de recyclages et les déchets de marbre présentent des résistances en compression supérieures à 20 MPa, et des résistances en traction de l'ordre de 2 MPa. Ces résultats traduisent l'aptitude de ces BAP à être utilisés comme béton prêt à l'emploi dans la construction en générale.
- Par ailleurs, pour les résultats de porosité ouverte, et de l'absorption capillaire, nous avons eu les résultats sur les BAP à granulats de béton de démolition légèrement supérieurs à ceux du béton de référence à base de granulats naturels. Une fois de plus cette différence n'est pas importante. Cela nous laisse croire que les BAP à base de granulats de démolition vont résister de la même manière que les bétons de référence vis-à-vis des attaques chimiques. Les BAP à base de granulats de démolition présenteront alors une durée de vie comparable à celle des BAP à granulats naturels.

Les résultats obtenus sont prometteurs, les BAP ainsi formulés présentent des performances satisfaisantes en termes de propriétés mécaniques, mais aussi de durabilité. Ces bétons peuvent donc être utilisés dans le secteur du bâtiment et de la construction en générale.

Cette étude constitue une branche de la recherche à mener dans l'avenir pour aller au-delà. Comme une étape avenir il sera intéressant d'étudier d'autres aspects de bétons à granulats de démolition :

- Effectuer des essais de durabilité réels.
- Etude du comportement de ces bétons en présence des armatures.
- Tester de nouveaux produits de récupération
- ...

Les BAP offrent de multiples avantages à leurs utilisateurs ; les BAP à matériaux recyclés offre d'avantage à l'environnement...

Annexe 1

*Différents essais de
laboratoire*

1. Echantillonnage (NF P 18- 553)

1.2 But et principe de l'échantillonnage

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, ceux-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble.

En général le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps:

- Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai.
- Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

Lorsqu'il n'est pas possible de prendre tout le tas et de le réduire, on procède à un prélèvement local.

a. Prélèvement sur tas normaux

- à la main, à l'aide d'une planche ou d'une plaque métallique.
- à la main, sur tas d'éléments grossiers (gravier concassé) par ratissage dans un récipient voir **figure1.1**
- au moyen d'une sonde, ouverture 4 ~ 6 cm, longueur 60 ~ 100 cm, extrémité taillée en sifflet.

Pour que l'échantillon soit représentatif de l'ensemble on prélèvera les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulat.

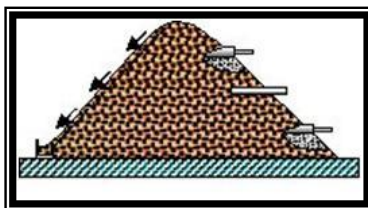


Figure 1.1: le matériau en stock.

b. Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire)

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur. L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105 °C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60 °C dans le cas contraire.

- Quartage

Il s'agit d'une méthode manuelle qui ne demande que peu de matériel (**figure1.2**):

Verser l'échantillon en un cône régulier sur un plateau horizontal ; à l'aide d'une petite pelle, séparer le cône verticalement par son sommet en deux moitiés symétriques et écarter l'une des deux moitiés de quelques centimètres ; scinder ensuite les deux moitiés par un nouveau plan vertical perpendiculaire au premier, puis séparer l'échantillon de sorte que l'on obtienne quatre quarts de cône identiques ;

Prélever et rassembler les quarts 1 et 3 (**figure1.2**) avec lesquels l'opération est répétée jusqu'à l'obtention de la quantité désirée.

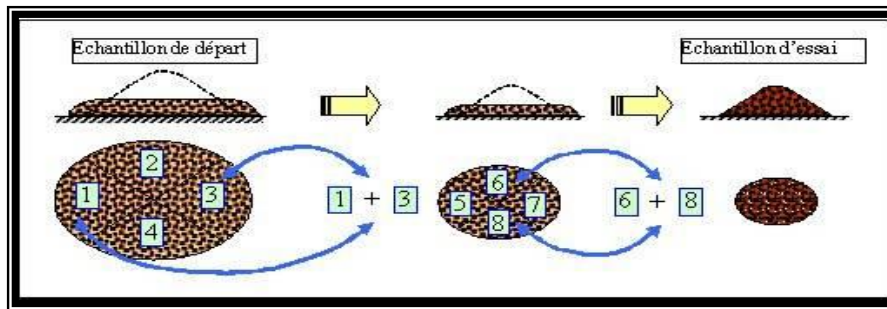


Figure 1.2: Opération de quartage.

- Echantillonneur (quarteur)

Un échantillonneur ou diviseur d'échantillons a comme but de diviser une certaine quantité de matière meuble (exp : un gravier, un sable, ou tout mélange de fragments résultant d'un concassage) en deux portions de poids égaux. L'une des portions peut à son tour être passée dans le quarteur (et ainsi de suite), jusqu'à l'obtention de la quantité réduite désirée, qui sera toujours représentative de l'échantillon de départ.



Figure 1.3 Echantillonneur pour gravier.

Aspects pratiques

Les pièces typiques d'un système de quartage sont (Figure 1.3) :

- Le quarter lui-même, caractérisé par un dispositif de rainures (fentes) parallèles à directions de déversement alternativement opposées engendrant la séparation de l'échantillon. La largeur des rainures varie selon le modèle de quarter.
- Trois bacs de tailles adaptées au quarter permettant de verser l'échantillon (bac 1) et de récolter les deux moitiés de l'échantillon (bacs 2 et 3).

Le procédé peut être résumé par la (figure 1.4) ci-dessous. Celle-ci permet de sélectionner une masse (m) à partir d'un prélèvement de masse $3m$.

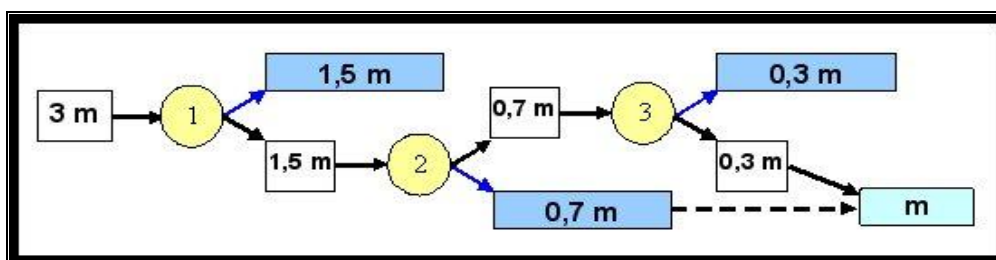


Figure 1. 4: Schéma d'une opération de répartition des matériaux en utilisant de l'échantillonneur.

2. Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)

2.1 But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.

A noter qu'il faut éviter la confusion entre la **granulométrie** qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la **granularité** qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

2.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Avant l'opération de tamisage, l'échantillon est lavé au dessus d'un tamis de 0,063 mm afin d'éliminer les fines et éviter ainsi l'agglomération des grains, ceci pouvant fausser les résultats de l'analyse. L'analyse granulométrique est conduite sur la fraction refusée par le tamis de 0,063 mm.

La dimension nominale des tamis est donnée par **l'ouverture** de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique de raison $\sqrt[10]{10}$ (Voir tableau 1.1), depuis le tamis 0,063 mm jusqu'au tamis 125 mm.

Tableau 1.1 : Dimensions nominales des tamis selon norme EN 933-2.

Tamis (mm)	0	0.063	0.08	0.1	0.125	0.160	0.2	0.25	0.315	0.4	0	0.63
Tamis (mm)	0.8	1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	8	10	12.5
Tamis (mm)	14	16	20	25	31.5	40	50	80	100	125		

2.3 Conduite de l'essai

La prise d'essai est séchée à (110 ± 5) °C jusqu'à masse constante puis pesée (**masse M_1**).

On réalise ensuite un tamisage par lavage afin de séparer les éléments de dimension inférieure à 0,063 mm du reste de l'échantillon. Le lavage est poursuivi jusqu'à ce que l'eau passant au travers du tamis de 0,063 mm soit claire.

L'échantillon ainsi préparé est alors séché à (110 ± 5) °C. Après refroidissement il est pesé jusqu'à masse constante (**masse M_2**). Le tamisage à sec peut alors être réalisé.

- Dimensions des tamis utilisés

En fonction des dimensions d/D des matériaux analysés, on utilisera la série de tamis préconisée par la norme EN 933-2 (**tableau 1.1**)

Note : Pour des raisons du manque de certains tamis dans notre laboratoire, nous avons adapté notre série de tamis de façon à ce qu'elle soit la plus proche possible de celle définie par la norme (EN 933-1 et EN 933-2).

- Préparation de l'échantillon

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires :

- il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif,
- il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants.

Dans la pratique, la masse utilisée sera telle que : $M \geq 0,2D$ avec :

M : masse de l'échantillon en kg ;

D : diamètre du plus gros granulat exprimé en mm.

- Description de l'essai

Le matériau séché, de masse M2, est versé sur une série de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose un tamis de 0,063 mm surmontant un fond étanche afin de récupérer les éléments fins qui n'auraient pas été entraînés par le lavage initial. Un couvercle est également disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage.

On appellera **tamisât** le poids de matériau passant à travers un tamis donné et **refus** le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la **colonne de tamis** et celle-ci est vibrée à l'aide de la **tamiseuse électrique**. Le temps de tamisage varie avec le type de machine utilisé, mais dépend également de la charge de matériau présente sur le tamis et de son ouverture. Un étalonnage de la machine est donc nécessaire.

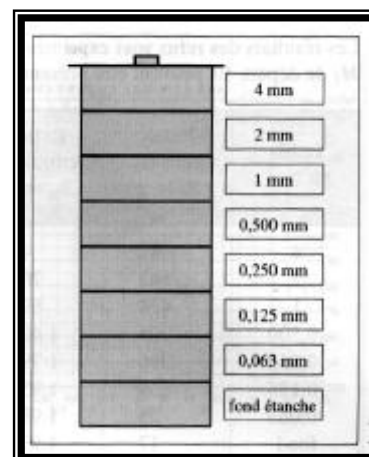


Figure 1.5 : Colonne de tamis.

3. Absorption (NF P 18- 555)

3.1 But de la mesure

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulat provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures.

3.2 Principe de la mesure

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C.

Le coefficient d'absorption (A_b) est défini par la relation :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} 100$$

M_s = masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C. M_a = masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée comme suit.

3.3 Conduit de l'essai

Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface externe des grains sèche. Ce séchage doit être effectué de manière douce afin de ne pas éliminer l'eau qui pourrait être piégée à l'intérieur du granulat. Veiller également à ne pas perdre de grains de sable au cours de l'opération. Les grains sont alors libres de toutes forces d'attraction capillaire.

On peut vérifier que cet état a été atteint en plaçant le matériau dans un moule tronconique, posé sur une surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement. On vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant (figure 1.6)

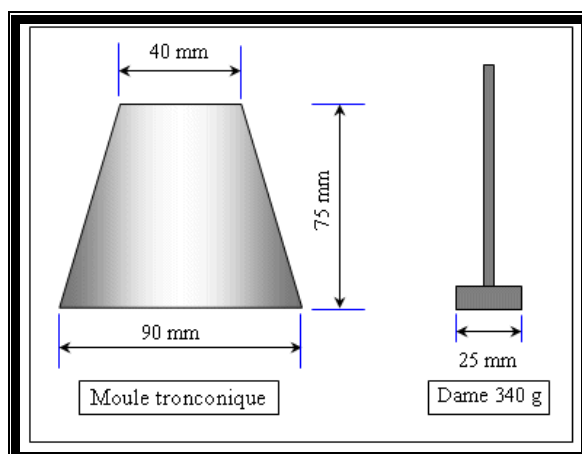


Figure 1. 6: Moule et dame pour coefficient d'absorption des graviers.

3.4 Mesure pour les gravillons (NF P 18.554)

Après imbibition, l'échantillon est soigneusement épongé avec un tissu absorbant, les gros éléments étant essuyés individuellement. Il est ensuite pesé.

Annexe 2

*Résultats des différents
essais de caractérisation*

Résultats de caractérisation expérimentale des granulats

Dans cette annexe sont présentés les résultats bruts de caractérisation des granulats utilisés pour notre étude.

1. Analyse granulométrique

<i>Matériau : sable 00/03</i>				
Nature	Gravier semi concassé 00/03			
Provenance	Carrière de Tizi ousou			
Date d'analyse	04/03/2012			
Caractérisation faite selon EN 933-1				
Analyse granulométrique				
Procédé utilisé: Lavage par tamisage				
Masse sèche totale			M₁=	1230,0
Masse sèche après lavage			M₂=	1200,0
Masse sèche des fines retirées par lavage			M₁-M₂ =	30,0
Passant au 0,063			P =	23,5
Tamis en (mm)	Refus en (gr)	Refus C en (gr)	Refus C en (%)	Tamisât C en (%)
6,3	6,5	6,5	0,54	99,46
5	40	46,5	3,88	96,13
4	52	98,5	8,21	91,79
2,5	180	278,5	23,21	76,79
1	429	707,5	58,96	41,04
0,5	208,5	916	76,33	23,67
0,315	107,5	1023,5	85,29	14,71
0,2	96,5	1120	93,33	6,67
0,125	52,5	1172,5	97,71	2,29
Fond	23,5	1196	99,67	0,33
C: Cumulé				
% du tamisât des fines < 0,063		$\frac{(M_1 - M_2) + p}{M_1} \times 100$		4,35

Matériau : Gravier 03/08				
Nature	Gravier semi concassé 03/08			
Provenance	Carrière de Tizi ouzou			
Date d'analyse	04/03/2012			
Caractérisation faite selon EN 933-1				
Analyse granulométrique				
Procédé utilisé: Lavage par tamisage				
Masse sèche totale	M₁=		1880,0	
Masse sèche après lavage	M₂=		1870,0	
Masse sèche des fines retirées par lavage	M₁-M₂ =		10,0	
Passant au 0,063	P =		30,5	
Tamis en (mm)	Refus en (gr)	Refus C en (gr)	Refus C en (%)	Tamisât C en (%)
16	0	0	0,00	100,00
12,5	0	0	0,00	100,00
10	0	0	0,00	100,00
8	33	33	1,76	98,24
6,3	286	319	17,06	82,94
5	379	698	37,33	62,67
4	352,5	1050,5	56,18	43,82
2,5	610,5	1661	88,82	11,18
1	173	1834	98,07	1,93
Fond	30,5	1864,5	99,71	0,29
C: Cumulé				
% du tamisât des fines < 0,063		$((M_1 - M_2) + p) * 100 / M_1$		2,15

Matériau : Gravier 08/15				
Nature	Gravier semi concassé 08/15			
Provenance	Carrière de Tizi ouzou			
Date d'analyse	04/03/2012			
Caractérisation faite selon EN 933-1				
Analyse granulométrique				
Procédé utilisé: Lavage par tamisage				
Masse sèche totale	M₁=	1900,0		
Masse sèche après lavage	M₂=	1900,0		
Masse sèche des fines retirées par lavage	M₁-M₂ =	0,0		
Passant au 0,063	P =	18		
Tamis en (mm)	Refus en (gr)	Refus C en (gr)	Refus C en (%)	Tamisât C en (%)
16	27,5	27,5	1,45	98,55
12,5	325	352,5	18,55	81,45
10	445,5	798	42,00	58,00
8	448	1246	65,58	34,42
6,3	421	1667	87,74	12,26
5	130	1797	94,58	5,42
4	39	1836	96,63	3,37
2,5	24	1860	97,89	2,11
1	20,5	1880,5	98,97	1,03
Fond	18	1898,5	99,92	0,08
C: Cumulé				
% du tamisât des fines < 0,063		$((M_1 - M_2) + p) * 100 / M_1$	0,95	

Matériau : granulats de béton de démolition 08/15				
Nature	Granulats de recyclage 08/15			
Provenance	Eprouvettes usagées			
Date d'analyse	28/03/2012			
Caractérisation faite selon EN 933-1				
Analyse granulométrique				
Procédé utilisé: Lavage par tamisage				
Masse sèche totale			M₁=	2006,0
Masse sèche après lavage			M₂=	2000,0
Masse sèche des fines retirées par lavage			M₁-M₂ =	6,0
Passant au 0,063			P =	9,5
Tamis en (mm)	Refus en (gr)	Refus C en (gr)	Refus C en (%)	Tamisât C en (%)
16	0	0	0,00	100,00
12,5	17,5	17,5	0,88	99,13
10	775	792,5	39,63	60,38
8	472,5	1265	63,25	36,75
6,3	330	1595	79,75	20,25
5	170	1765	88,25	11,75
4	67,5	1832,5	91,63	8,38
2,5	19,5	1852	92,60	7,40
1	4,5	1856,5	92,83	7,18
Fond	9,5	1866	93,30	6,70
C: Cumulé				
% du tamisât des fines < 0,063		$((M_1 - M_2) + p) * 100 / M_1$	0,77	

2. Résultats des Essai d'absorption

Gravier 00/03	
M ₁ (masse après séchage)	1,239
M ₂ (masse de récipient+ eau+gravier)	5,029
M ₃ (masse d'eau + récipient)	4,2585
M ₄ (masse après passage à l'étuve)	1,214
Mv absolue	2,74
Mv réelle	2,59
Mv saturée à surface sèches	2,64
Absorption	2,06

Gravier 03/08	
M ₁ (masse après séchage)	2,019
M ₂ (masse de récipient+ eau+gravier)	5,52
M ₃ (masse d'eau + récipient)	4,2585
M ₄ (masse après passage à l'étuve)	1,9915
Mv absolue	2,73
Mv réelle	2,63
Mv saturée à surface sèches	2,67
Absorption	1,38

Gravier 08/15	
M ₁ (masse après séchage)	2,11
M ₂ (masse de récipient+ eau+gravier)	5,5745
M ₃ (masse d'eau + récipient)	4,2585
M ₄ (masse après passage à l'étuve)	2,086
Mv absolue	2,71
Mv réelle	2,63
Mv saturée à surface sèches	2,66
Absorption	1,15

Béton concassés 08/15	
M ₁ (masse après séchage)	2,047
M ₂ (masse de récipient+ eau+gravier)	5,498
M ₃ (masse d'eau + récipient)	4,2585
M ₄ (masse après passage à l'étuve)	1,978
Mv absolue	2,68
Mv réelle	2,45
Mv saturée à surface sèches	2,53
Absorption	3,49

Sachant que :

- Masse volumique absolue :
$$\rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

- Masse volumique réelle déterminée par séchage à l'étuve :
$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

- Masse volumique saturée à surface sèche :
$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

- Coefficient d'absorption :
$$\omega_{ssd} = \frac{100 (M_1 - M_4)}{M_4}$$

Annexe 3

*Mode opératoire des essais
concernant les BAP à l'état
frais*

1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow)

1.1 Le but de l'essai : caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné.

1.2 Matériel nécessaire

- Plateau équipé d'une plaque métallique plane de forme carrée au moins 90 cm de coté.
- Cône d'Abrams dispose d'un empattement pour être maintenu contre le plateau avec les pieds de l'opérateur.
- Mètre.

1.3 Mode opératoire

- Mettre le plateau sur un support stable et horizontal ;
- Humidifier la surface de la plaque ;
- Placer le cône au centre du plateau ;
- Prélever un échantillon représentatif du béton ;
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir ;
- Remplir le cône en déversant le béton de manière continue jusqu'à l'arase supérieure du cône ;
- Retirer l'entonnoir et araser si nécessaire avec une truelle et nettoyer la plaque avec un chiffon humide ;
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées ;
- Une fois le béton étalé ; mesurer (au centimètre le plus proche) le diamètre de la galette formée (deux mesures diamétralement opposées). Si les deux valeurs sont différentes de plus de 5 cm, l'essai est invalide et reconduit ;
- Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenues en arrondissant au centimètre supérieur.

2 Essai de stabilité au tamis

2.1 Le but de l'essai : vérification les BAP vis-à-vis du risque de ségrégation.

2.2 Matériel nécessaire

- Seau de 10 litres et couvercle ;
- Tamis 5mm diamètre et fond de tamis ;
- Balance de portée minimale 20 kg.

2.3 Mode opératoire

- Echantillonnage : verser directement 10 litres de béton dans le seau ;
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation ;
- Attendre 15 minutes ;
- Poser le tamis et le fond sur la bascule ;
- Verser au centre du tamis un poids de béton égal à $4,8 \text{ kg} \pm 0,2 \text{ kg}$, hauteur de chute du béton $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$;

- Attendre 2 minutes ;
- Faire la tare ;
- Peser le poids de la laitance : $P_{\text{laitance}} = P_{\text{fond+laitance}} - P_{\text{fond}}$;
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon

$$\text{Stabilité (\%)} = (P_{\text{laitance}} \times 100) / P_{\text{échantillon}}$$

3 Essai de la boîte en L (Capacité de remplissage)

3.1 Le but de l'essai : permet de vérifier que la bonne mise en place du béton, sans blocage au voisinage des armatures.

3.2 Matériel nécessaire

La boîte en L.

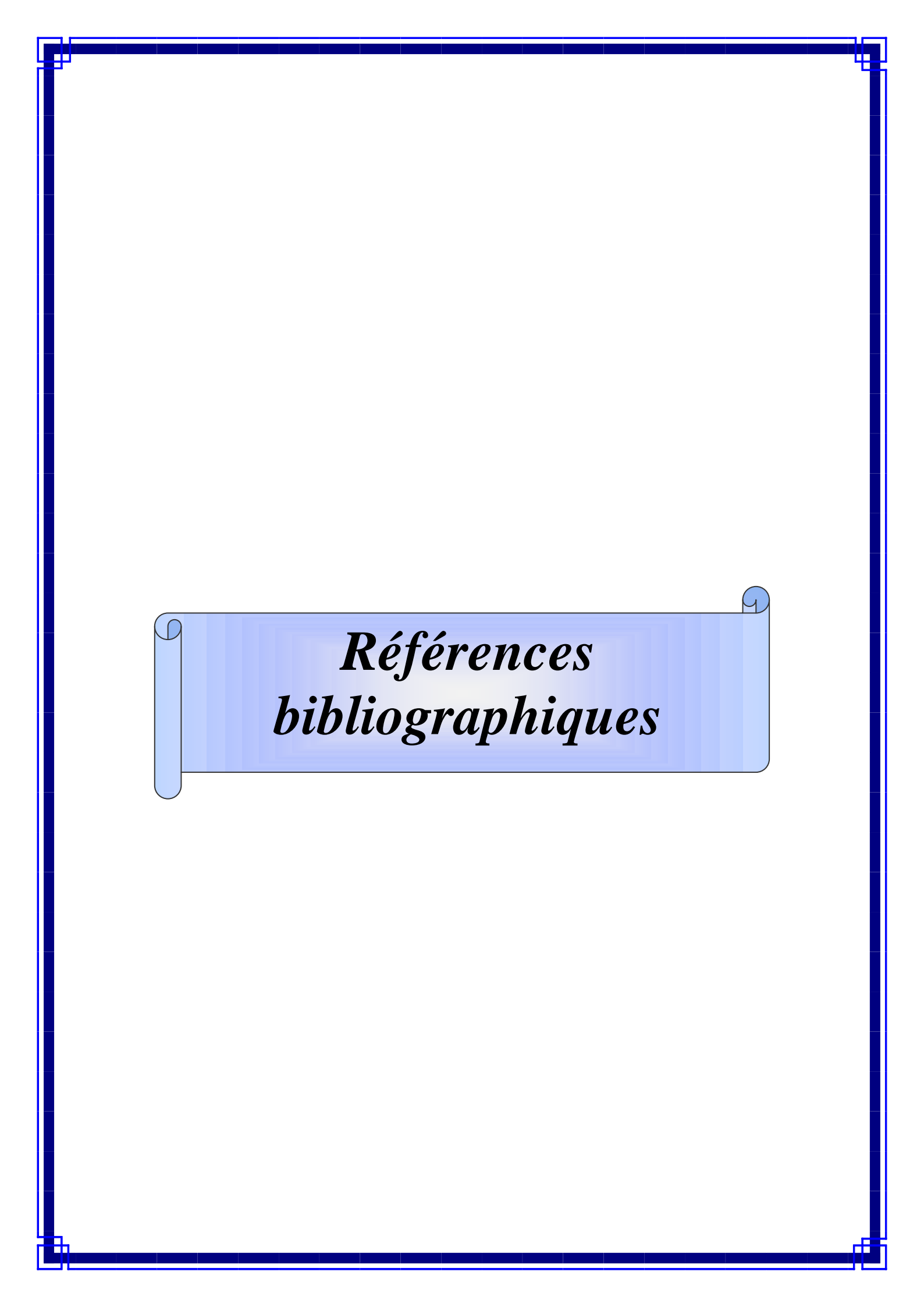
Mètre

3.3 Mode opératoire

- Vérifier que la boîte est sur un plan horizontal ;
- Remplir de béton la partie verticale de la boîte en L ;
- Araser et laisser le béton reposer pendant 1 minute ;
- Enlever la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39 mm ;
- Quant le béton se stabilise, on mesure la dénivelée soit les hauteurs H_1 et H_2 . On exprime le rapport H_2/H_1 . Ce rapport doit être supérieur à 0.8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe de blocage ou de ségrégation.

Annexe 4

*Fiche technique du
super plastifiant*



*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- AFGC 00 : Association Française du Génie Civil « Bétons autoplaçants : Recommandations provisoires », ABTP juin 2000.
- AFN 196 : NF EN 196-1, « Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques », AFNOR Avril 2006.
- AIT 92 : P.C. AÏTCIN « l'emploi des fluidifiants dans les BHP, les bétons à ultra hautes performances » presse de l'ENPC, 1992.
- AIT 01 : P. C. AITCIN, S. Jiang, B. Kim, P. Nkinamubanzi, N. Pétrov, « l'interaction ciment /superplastifiant cas des polysulfonates », B.L.P.Ch n°233 juillet - août 2001 pp 87-89. B.L.P.Ch n°202 pp 61-69.
- ARL07 : G.ARLIGUIE et H.HORNAIN « GranDuBé » presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 2007
- ARQ 90 : G. ARQUIE, C. TOURENQ, « Granulats », édition Ponts et chaussées, 1990
- ASS 04 : S. ASSIE, « Durabilité des bétons autoplaçants », thèse de doctorat, France, 2004
- BAR 92 : J. BARON et J. P. OLIVIER « La durabilité des bétons », presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1992
- BAR 97 : J. BARON, J.-P. OLLIVIER, « Les bétons - bases et données pour leur formulation », Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles, Paris, 1997
- BAR 99 : J. BARON, J.-P. OLLIVIER, « Les bétons - bases et données pour leur formulation », Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles, Paris, 1999
- BEN 08 : S. E. BENSEBTI, 2008 « Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux », 2008.
- BEN 09 : M. BENHOUNA, B. NEZERGUI, S. BOUDRAA, « Valorisation des granulats recyclés dans la formulation d'un béton autoplaçant », 2009.
- CTB 01 : « Les nouveaux bétons », les cahiers techniques du bâtiment n°218, septembre 2001.
- DEL 87 : F. De LARRARD, M. BUIL. « Granularité et compacité dans les matériaux de génie civil », Materials and structures, vol 20, 117-126, 1987.

- DEL 98 : F. De LARRARD, C. FERRARIS. « Béton frais remanié I et II et III », BLPC. n° 213 pp 73-89, Jav-fév 1998.
- DEL 00 : F. De LARRARD « Structures granulaires et formulation des bétons », LCPC, 2000.
- DEL 02 : F. DE LARRARD, « Construire en béton », édition Ponts et chaussées, 2002
- DRE 98 : G. DREUX, J. FESTA, « Nouveau guide du béton et de ses constituants » 8° édition Eyrolles 1998.
- DUP 04 : R. DUPAIN, R. LANCHON, J. C. SAINT ARROMAN, « Granulats, sols, ciments et bétons », édition Casteilla, 2004
- HES 02 : J. C. HESLING, C. VINCENSINI, C. VINCENT, C. LALLEMENT, « Béton et constituants du béton » 5ème Edition AFNOR, Tome 1, 2002
- TUR 08 : P. TURCRY, « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants, influence de la formulation », 2004.
- HAD 07 : O.HADDAD, « Contribution au développement d'outils d'aide à la formulation des BAP relatifs à la rhéologie à l'état frais et à la résistance au jeune âge », thèse de doctorat, France, 2007.
- HAL 03 : H. HALLSHOW, D. LEVACHER, 2003 « Recyclage de béton de démolition dans la fabrication des nouveaux bétons », 2003.
- JOL 98: C. JOLICOEUR, M. A. SIMARD, « Chemical Admixture-Cement Interactions: Phenomenology and Physico-chemical Concepts », CCC Vol 20, pp 87-101, 1998.
- KAN 80 : D.L. KANTRO, « Influence des superplastifiants réducteurs d'eau sur les propriétés de la pâte de ciment – unslump test miniature », cement and concrete aggregate Vol 2, pp 95-102, 1980.
- KAR 02 : A.R. KARA, « Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires », ThD, U Cergy Pontoise, déc 2002.
- KEL 02 : A.KHELIDJ, V.BROGHEL-BOUNY, G.BASTIAN, J.GODIN, G.VILLAIN « Transfert dans les bétons et durabilité des ouvrages », Laboratoire Centrale des ponts et chaussées.
- NAN 01: NAN SU, KUNG-CHUNG HSU, HIS-WEN CHAI, « A simple mix design method for self-compacting concrete », CCR 31, 1799–1807, 2001.
- NEV 00 : A.M. NEVILLE, « Propriétés des bétons », Edition Eyrolles 2000.

Références bibliographiques

- OKA 03: H. OKAMURA, M. OUCHI, « Self compacting concrete », Journal of advanced concrete technology, Vol1, N°1, 5-15 April 2003.
- PAI 82 : A.M. PAILLERE, « Les adjuvants », Le béton hydraulique' Presse de ENPC 1982.
- RAM 98 : V.S. RAMACHANDRAN, V.M. MALHOTRA, C. JOLICOEUR, AND N. SPIRATOS, « Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete'', CANMET Publication MTL 97-14 (CANMET, Ottawa, 1998).
- REG 82 : M. REGOURD. « L'hydratation du ciment portland'', Le béton hydraulique' P.E.N.P.Ch 1982
- SCH 05: G. DE SCHUTTER « Guidelines for testing fresh self compacting concrete », European Research Project, 2005.
- SKA 99 : A.SKARENDAHL AND O. PETERSSON, « Self compacting concrete », state of the art report of RILEM Technical committee 174-SSC. Report 23, 1999.
- SON 02: M. SONEBI, P.J.M. BARTOS, « Filling ability and plastic settlement of self compacting concrete », Materials and Structures, Vol.35, pp 462-469, Sept-Oct 2002.
- TEG 05: « The European Guidelines for Self-Compacting Concrete », BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO; Mai 2005
- YEN 99: T.YEN, C.W.TANG, C.S.CHANG, K.H. CHEN « Flow behaviour of high strength high-performance concrete », Cement and concrete composites, vol 21, pp 413-424, 1999.