



N° d'ordre :
N° de série :

Mémoire

Présenté pour l'obtention de diplôme de magister en Génie Civil
Spécialité : Comportement des matériaux et dimensionnement des bétons

Thème

**FORMULATION ET PROPRIETES DES BETONS
AUTOPLAÇANTS (BAP) A BASE DE GRANULATS RECYCLES :
Cas des fines de marbre.**

Présenté par : M^{me} **CHIBANI Nassel**

Revue à jour:

Président : Dr. EL CHIBIKI OUSADOU MCA - Université Larbi Ben M'hidi OUB

Rapporteur : Dr. EL BOUANE Professeur-Université Mouloud, Constantine

Examinateur : Dr. ABOUDJEBBA MCA - Université Larbi Ben M'hidi OUB

Dr. A.MERHEL MCA - Université Mouloud, Constantine

Année 2013

AVANT-PROPOS

Le présent travail a été effectué dans le cadre des travaux de recherche de l'équipe «Optimisation des matériaux» du laboratoire «Matériaux et Durabilité des Constructions» de l'Université Montesquieu-Compostelle.

Ce mémoire a constitué une thèse, de recherche de maîtrise, expérimentale pilotée par le Professeur Raphaël BÉGIN. Elle s'inscrit dans le cadre et l'action menée par le groupe «Valorisation des matériaux locaux» dont l'objectif principal était d'étudier l'influence des ces matériaux sur le comportement des bétons margillifères à l'eau libre et l'eau de mer.

Les travaux dans le domaine d'intérêt ont été poursuivis dans le présent thèse sur les mêmes formulations des bétons afin de compléter et enrichir le matériel de ces nouveaux bétons.

RÉSUMÉ

Le titre est chargé des déchets des matériaux présents de nombreux problèmes qui place occupé par les sites de stockage, importance des coûts, impact sur l'environnement... ainsi que l'industrie de construction ne pose pas de problème véritable à la fin de cycle de vie de ces produits mais également au début. Il est nécessaire de trouver un moyen pour la valorisation et la réutilisation de ces déchets, dans notre étude s'intéresse dans une politique de valorisation des matériaux industriels locaux en Algérie, passant leur utilisation dans la formulation des Bétons autopléants (BAP).

Le but principal de cette étude est de déterminer techniquement la possibilité d'utiliser les déchets de marbre sous forme d'agrégats minéraux dans le béton autopléant (BAP) à base de matériaux locaux, et analyser les propriétés mécaniques et physiques les plus élevées et élevées de BAP en le comparant à celles d'un BAP de référence à base de filices calcinées comme référence.

Enfin, sous les essais réalisés sur le BAP à base des déchets de marbre (BAP DM) à l'échelle locale, satisfaisent les critères d'un BAP selon les normes européennes (EN 206 2000) et à l'échelle locale développe de meilleures résistances mécaniques par rapport au BAP à base de filices calcinées (BAP FC).

Ces travaux ont donné des résultats très prometteurs pour la promotion des BAP en Algérie à base des déchets de marbre.

Mot-clés :

Béton autopléant – Granulats recyclés – Filices – Carbonatation – Propriétés – Valorisation – Comportement.

مستخلص

مطاب التعليلات واعم العديد من الما نقل واملان موانع التعليلين و ارتداد الشاقيط و
الأمر الجوهري و صناديق البنداء و الما يوجد ليست - كما كانت في الجهاد - كما هو (جهد) عند
التعليلات و املان أيضا في الجهاد - الامن من ايجاد و صناديق التعليلات (معا) استعمال عند
التعليلات - لهدا برسلنا المسمى للجزيل الموهوب (المعلم) الاستعمال (استخدام) الموهوب
المستعمل (المعلم) في الجزائر و يمكن أن نستعمل في المصنوع (صناديق) الموهوب
المعلم (المعلم)

والعروض الرئيسية من جاء الترانس في اوقات العتوق القليلة استعمال تعليلات الرفاه
على (معلم) مضافات مستعمل (المعلم) الموهوب (المعلم) الموهوب (المعلم) من موهب معلوم و
المعلم الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب
من موهب (معلم) الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب
و اعمروا على التجار به الموهوب (معلم) الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب
الرفاه الموهوب في الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب
الموهوب الموهوب الموهوب (معلم) الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب
الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب

و (معلم) هذا المعلم من الموهوب و اعمروا هذا الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب
الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب

النتائج

الموهوب الموهوب الموهوب (معلم) الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب
الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب الموهوب

ABSTRACT

The landfill of waste materials presents many problems: the place of site storage, high costs, impact of environment) and the construction industry is not a problem only at the end of life cycle of these products but also in the beginning. It is necessary to find a way for the recovery and reuse of this waste, so this study aim for object to rational and used local industrial materials in Algeria can be used in the formulation of self-compacting concrete (SCC).

The principal main of this study is to demonstrate the technical feasibility of using marble waste in the form of mineral additives in the concrete (SCC) based on local materials, and analyzed the mechanical and physical properties with fresh SCC and hardened by comparing to those of a SCC containing the addition of limestone fillers.

Finally, attesting of the SCC based waste-marble (BAP DM) that meet the criteria of a SCC by European standards (NF EN 206) and in the hardened state develops better mechanical strength by compared to the SCC based limestone fillers (BAP EP).

This work has yielded very promising results for the Promotion of SCC in Algeria to waste marble (waste).

Key-words :

Self-compacting concrete – Recycled aggregates – fillers – Characterization – Valorisation – Properties – Behavior –

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'industrie des matériaux de construction est toujours accompagnée par des produits secondaires ou déchets qui ont une incidence directe sur l'environnement.

Le recyclage de tels déchets dans les décharges favorise la pollution de l'air et la contamination des sources d'eau et des terres agricoles, il est donc nécessaire, pour éliminer ces produits de trouver un moyen de les valoriser et de les réutiliser de nouveau.

Il est et les dernières investigations ont été menées à travers le monde, trois projets sur la réutilisation et la stabilisation de béton et de la rognure, ont été réalisés depuis 1965 par le BRIM, aux Pays-Bas (Reerland en 1965), au Japon (Tokyo 1966) et au Danemark (Oslo en 1965).

Des projets de normalisation et des guides internationaux sur les bétons à base de granulats recyclés, ont en cours depuis 1980 et dirigés par (BRIM) et le CEN Comité européen de Normalisation.

Chaque année environ des millions de tonnes de béton sont couramment libérées des constructions qui ont vieilli, approchant à la fin de leur durée de vie, ainsi qu'un grand nombre de briques sont rejetés des usines dans le le non-conformité aux spécifications requises.

La pensée écologique impose de tenir compte de l'environnement soit en évitant des emprunts des matériaux naturels, soit en éliminant des sous-produits et déchets dont les déchets seraient dangereux et capitaux très importants.

Devant les besoins sans cesse croissant des ressources en matériaux et aux exigences et conditions de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités et opportunités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine des travaux publics.

L'objet principal de cette étude est de contribuer à la réalisation des déchets de moules dans la fabrication de béton hydraulique et en particulier la dernière génération des bétons (BHP) et cela permet ainsi :

D'éliminer les déchets par recyclage et stabilisation d'équipement de l'environnement.
Mettre à disposition certains problèmes liés au manque de granulats.

Ce mémoire est l'œuvre de plusieurs années de collaboration étroite au cours des années 2000 avec l'équipe de Professeur Bouat Harouch/Chabane/Bencherchane de l'Université UMR et l'équipe de Professeur Belkhal / Dr. Benachi / Belkhal de l'Université de Sétif.

Cette démarche consiste par étapes, études, analyses et expériences en matière, ce qui se résume comme suit :

La première étape consiste à présenter les déchets et leur gestion, valant les deux produits à travers le monde ainsi de rassembler les informations sur la situation en Algérie; identifier les différents constituants du béton, les facteurs qui ont une influence sur le comportement de ce matériau à l'état frais et dur.

La seconde étape est consacrée à la localisation et caractérisation des déchets de moules (composition d'une coupe de densité) en tant que granulats de substitution (Fines, Sable, Gravillons), et les principales propriétés des matériaux de base.

La dernière étape consiste à présenter un vaste programme expérimental sur la substitution partielle de ciment dans les bétons autopléants (formulation, étude à l'état frais et étude à l'état dur).

La formulation des deux bétons autopléants s'effectue avec des composants similaires, selon l'approche japonaise, la seule différence réside dans la substitution de l'addition de fibres situées dans la composition de référence par des déchets de moules.

Le mémoire se compose de deux parties chacune constituée de deux chapitres:

Le premier chapitre s'intéresse à cette nouvelle génération de béton, nommé béton autopompable.

Le deuxième chapitre expose le contexte de la gestion des différents types de déchets et les principales techniques de traitement, ainsi le recyclage et la réutilisation des déchets dans le domaine des travaux publics. À travers le monde et d'avoir des détails sur la situation en Algérie. Il s'intéresse davantage aux principes de fabrication, aux caractéristiques et à l'exploitation des granulats de granules, ainsi qu'aux différents paramètres qui influent sur le comportement de béton.

Le troisième chapitre présente les matériaux utilisés pour la confection des différents alliages des bétons étudiés et la méthodologie adoptée lors du travail de recherche expérimental et les caractéristiques des granulats recyclés (débris de marbre) et des granulats calcaires entrant dans la composition des bétons. On a utilisé les déchets de marbre comme additif minéral dans le béton en substitution d'une fraction volumique de ciment.

Le dernier chapitre présente les résultats de recherche, dont l'objectif de générer un ensemble d'informations, pour permettre au lecteur de relever les compositions des bétons testés leurs performances. Dans une première partie, on donne quelques informations sur la méthode adoptée pour la formulation des bétons autopompables. Dans la deuxième partie, on présente les résultats des essais à l'état frais des bétons réalisés à savoir : la densité, le pourcentage de l'air occlus et tous les essais exigés par le cahier des charges qui définissent le béton d'autoportant, ainsi que les résultats à l'état durci des bétons compositions de référence à base de filler calcaire et ceux à base de déchets de marbre.

Une conclusion aux travaux réalisés des différents chercheurs sera exposée.

1. BETON AUTOPLAÇANT

I.1. HISTORIQUE :

Afin de suivre les progrès réalisés dans les procédures de construction et les conceptions des ouvrages, et afin de satisfaire aux critères politico-économiques et environnementaux, les ingénieurs et les technologues qui traitent directement ou indirectement du béton doivent sans cesse améliorer leur connaissance sur les propriétés de béton autoplaçant de construction qui est le plus utilisé dans le monde (1000 kg/habitant/année).

On assiste aujourd'hui à un développement de la recherche dans les universités en étroite collaboration avec l'industrie dans le but de perfectionner et d'industrialiser toujours plus les procédés de fabrication, pour des raisons de rentabilité à court terme probablement la pratique impose des problèmes à la recherche scientifique.

C'est dans cet ordre d'idées que plusieurs compagnies, centres de recherche et universités dans le monde ont dirigé leur études vers le développement d'une nouvelle gamme de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures du point de vue théorique et architectural (structure qui se caractérisent par la complexité de leurs modèles, forme variable et courbures multiples et à ferrailages très congestionnés) [Benkechkache 08].

Le béton autoplaçant développé d'abord au Japon en 1989 [Okamura et Ouchi 99] par des chercheurs de l'université de Tokyo, a été rapidement exploité par les grands groupes industriels japonais (Taisei, Kajima, Obayashi, etc.) pour des projets d'envergure. Le développement des bétons autoplaçant s'est élargi dans plusieurs pays, au Canada et en Europe dans le cadre du Projet Brite-Euram "SCC" (Self-Compacting Concrete).

En France, les premières expérimentations de BAP remontent à 1995, suivies en 1998 d'une première application importante sur le chantier d'Océanopolis à Brest. Depuis lors, le béton autoplaçant est devenu le béton très prometteur du futur grâce à sa facilité de mise en œuvre et l'amélioration des conditions de travail sur chantier [Benkechkache 08].

Le béton autoplaçant représente un surcoût par rapport à un béton classique, mais présente beaucoup d'avantages qui le rendent économique et largement compétitif, parmi lesquels :

- l'absence de vibration, ceci réduit les nuisances sonores et les maladies professionnelles,
- la réduction du coût de la main d'œuvre,

- l'utilisation de béton fluide qui permet le bétonnage dans les milieux confinés (très ferraillés),
- l'absence de ségrégation en gardant un squelette homogène qui permet d'avoir des bétons compacts et durables,
- un impact positif sur l'organisation des chantiers [Bensebti 08].

I.2. INTRODUCTION :

Vu la complexité de la formulation du BAP et sa caractérisation, ce chapitre de cette thèse une mise au point des concepts utilisés. On tente d'apporter une définition, éclaircissement sur les notions de conception, de rhéologie,...etc. Ce chapitre est consacré à la présentation des propriétés des BAP à l'état frais (fluidité, ouvrabilité, homogénéité) et les différents essais empiriques et rhéologiques qui caractérisent les BAP.

Ces bétons sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans des coffrages très ferraillés. Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'autoplaçants que si le matériau durci final présente des propriétés homogènes (pas de ségrégation) et présente de très bonne performance à court et à long terme [Boukni 08].

Ces bétons en Europe et semblent être amenés à remplacer, à terme, les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications. Ils présentent en effet des intérêts à la fois techniques et économiques : absence de nuisances sonores en milieu urbain, possibilité de bétonner des zones fortement ferraillées ou à géométrie complexe et obtention d'une meilleure qualité du béton (pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers) d'une part, diminution du temps de personnel lors de la mise en place et réduction des coûts des processus industriels, d'autre part [Assié 04].

I.3. UTILISATION DE BAP :

Depuis son développement au Japon en 1989 comme une extension de la technologie de bétonnage sous l'eau, le nombre d'ouvrages réalisés avec le BAP ne cesse d'augmenter surtout au Japon où l'utilisation de ce produit est devenue populaire dans le domaine de construction.

Le BAP a vu aussi une grande utilisation dans le monde entier, en Asie, en Europe, et en Amérique dans plusieurs domaines de la construction.

Ces domaines comprennent le bâtiment, le génie civil, les tunnels, la préfabrication, et les travaux d'assainissement et de réhabilitation.

L'expérience acquise aux Pays-Bas a permis d'étendre la classification en fonction des différences existant entre les BAP et de déterminer différents domaines d'emploi, selon leurs Propriétés, comme le montre la (figure I. 1):

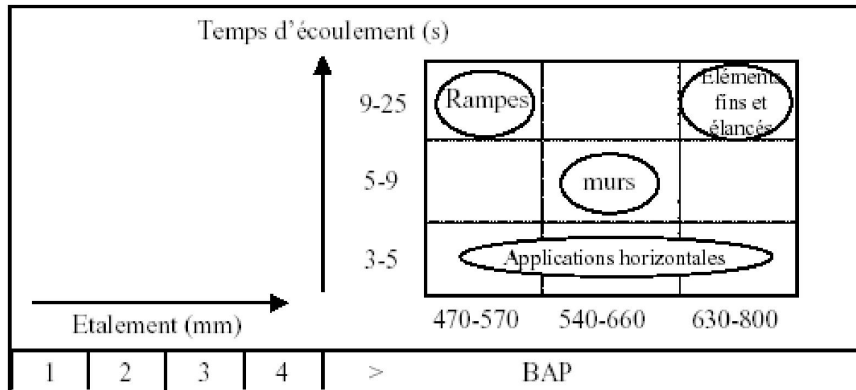


Figure I. 2: Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP [Bethmont 05].

Comparé au BV, les arguments en faveur du BAP sont les suivants :

- rendement amélioré et exécution plus rapide.
- réduction des nuisances sonores durant l'exécution.
- liberté accrue des formes de coffrage.
- facilité de bétonnage d'éléments exigus.
- qualité accrue des surfaces de béton.
- réduction (suppression des travaux de ragréage).
- facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante
- remplissage de parties difficilement accessibles.
- diminution de la pénibilité du travail et suppression de l'apparition du syndrome du vibreur.

Outre l'amélioration de la productivité des entreprises, le BAP permet d'accroître la qualité et la durabilité des ouvrages en béton [Boukni 08].

I.4. CONCEPT DU BAP :

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème [Okamura 00] C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autocompactants ("self-compacting concrete", traduit par béton Autoplaçant ou béton autonivellant). Outre leur facilité de mise en oeuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons vibré, par leurs propriétés à l'état frais [AFGC 00] [Sedran 99]. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Pour parvenir au cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (figure I. 2). En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

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

Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre la stabilité et la maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un défloculant, sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée.

Le début du développement des BAP en France coïncide d'ailleurs à l'arrivée des superplastifiants de type polycarboxylate, à fort pouvoir défloculant. Ces adjuvants ont un double effet, électrique et stérique, qui leur permet de disperser au mieux les particules[Benkechkache 08].

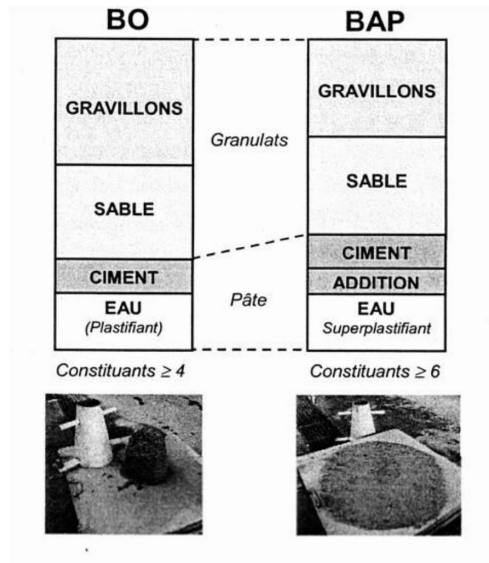


Figure I. 2: Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un (BAP) Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [Turcry 04].

I.5. INFLUENCE DES PARAMETRES DE COMPOSITION SUR LE COMPORTEMENT DE BAP :

I.5.1. Influence des additions minérales sur les propriétés de BAP :

L'utilisation des additions minérales est intéressante sur le plan rhéologique car ils sont d'une part moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet d'avoir un temps prolongé d'ouvrabilité et d'autre part, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granulométries différentes permet aussi d'améliorer la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange de béton. Ceci favorise l'augmentation de la stabilité et l'accroissement de la déformabilité du béton. D'autre part, le grand volume d'additions minérales utilisées dans les bétons autoplaçants pour remplacer une partie du ciment contribue à la réduction de la chaleur d'hydratation et du retrait du béton. En général, une matière pouzzolanique tel que la cendre volante améliore la déformabilité du béton (particules sphériques et lisses), le laitier est supposé d'améliorer la résistance et la maniabilité (particules vitreuses). La fumée de silice augmente la résistance à la séparation des constituants du béton et réduit significativement les phénomènes de ressuage et de ségrégation [Menai 95].

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçants du béton (figure I. 3) [Billberg 01].

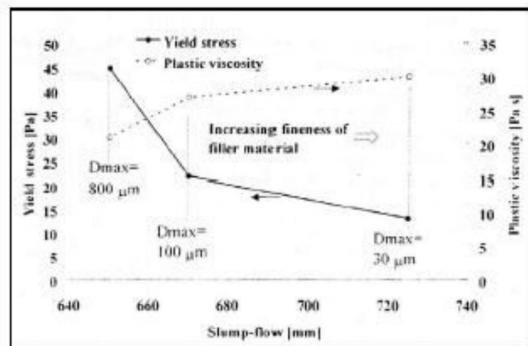


Figure I. 3: Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [Billberg 01].

Généralement les BAP contiennent une quantité de ciment et de fines de l'ordre de 500 kg/m³ de dimension inférieure à 80 μm. Les additions utilisées sont en général des cendres

volantes, fumées de silice, laitier de haut fourneau ou les fillers calcaires [Bensebti 08].

I.5.2. Influence des ajouts chimiques sur les propriétés des BAP :

Les adjuvants permettent en premier lieu de réduire la demande en eau du béton et de modifier sa viscosité. L'efficacité des adjuvants varie en fonction du ciment et des additions avec lesquels ils interagissent (compatibilité). D'une manière générale, il faut s'attendre à un début de prise retardé lorsque le dosage en adjuvant est élevé.

L'utilisation d'un adjuvant stabilisateur diminue la tendance à la ségrégation du béton autoplaçants (ressuage, séparation des granulats grossiers), qui devient ainsi plus stable et plus robuste sur une plus large plage du rapport E/C [Holcim 04].

Les adjuvants, avec leur fort pouvoir d'action, permettent souvent d'obtenir les qualités du béton autoplaçants plus facilement que toute autre tentative à cet effet. Le superplastifiant permet de libérer une partie de l'eau qui a été piégée par les grains de ciment flocculés et diminue ainsi les frictions intergranulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton.

En général, les superplastifiants utilisés dans les formulations des BAP sont du type polyméla mine sulfoné, polycarboxylate ou de naphthalène sulfonate [Bensebti 08].

I.5.3. Influence du volume de pâte sur les propriétés des BAP :

Le volume de pâte est supposé jouer deux rôles dans un BAP. D'abord, il fluidifie le matériau en limitant les contacts entre les granulats. Ensuite, il écarte suffisamment les gravillons pour éviter la formation d'amas contre les armatures, responsables de blocage de l'écoulement [Bouhamou 07].

Un excédent de pâte de ciment dépassant 90 l/m³ peut s'avérer nécessaire en cas de faible valeur du rapport E/C ou d'une proportion élevée de granulats concassés. L'étanchéité et la résistance à la compression d'un tel béton s'en trouveront améliorées. Si le volume excédentaire de pâte de ciment est nettement inférieur à 90 l/m³, on doit s'attendre à un étalement plus faible, ainsi qu'à une tendance accrue à l'apparition de blocages au droit des barres d'armature, de nids de gravier et de bullage sur les parements [Holcim 04].

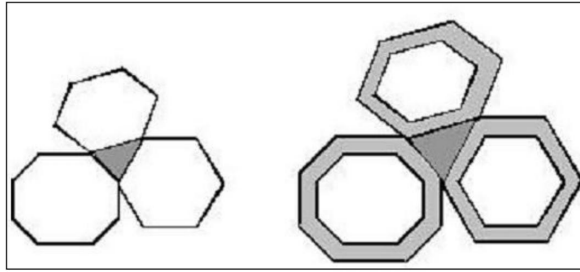


Figure I. 4: Dispersion des granulats par excès de pâte [Bouhamou 07].

I.5.4. Influence des granulats sur les propriétés des BAP :

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

Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, le dosage du béton doit être suffisant pour contribuer à la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées.

En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP.

[Domone 06] a fait une synthèse des travaux réalisés sur les 11 dernières années en donnant les principales compositions utilisées pour 51 applications industrielles. Il en ressort que les gravillons utilisés sont généralement concassés, leur diamètre maximal n'excède guère 20 mm.

[Toutou et Roussel, 2006] ont montré que d'une manière générale la fluidité des bétons de type autoplaçants augmente lorsque le volume des inclusions granulaires diminue car les contacts granulaires ont diminué.

I.5.5. Influence le rapport E/C sur les propriétés des BAP:

En plus de son rôle majeur dans le phénomène d'hydratation, l'eau est un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton. L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité de béton et entraîne la diminution de la concentration en solides ; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent. Cependant l'introduction excessive d'eau provoque la chute de résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais [Utsi 03].

Le dosage du ciment dans le béton influe sur ses propriétés mécaniques et sa durabilité. On considère que l'écoulement et l'ouvrabilité du béton sont liés au rapport E/C qui représente un facteur très influant sur ces différents aspects, aussi la formation des bétons passe par l'optimisation de ce paramètre [Benkechkache 08].

I.6. MODES DE FORMULATION DE BAP :

Dans cette section sont présentées les grandes familles de méthodes de formulation des bétons autoplaçants, des empiriques aux plus sophistiquées.

I.6.1. Les approches de formulation :

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées [Collectif 01] à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

I.6.1.1. Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers :

[Okamura 00], le concepteur des BAP, propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiants, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité.

A la suite d'une optimisation identique du mortier, [Ouchi 99] propose de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons.

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. [Billberg 01] et [Jacobs 99] montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier.

I.6.1.2. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte :

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. [Oh 99] introduisent la notion d'excès de pâte schématisée sur la (figure I. 5). La

formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

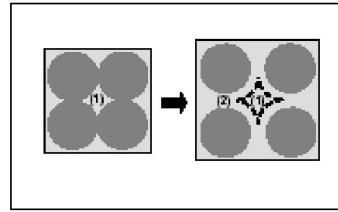


Figure I. 5: Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2) [Oh 99].

[Oh 99] ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granules et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

1.6.1.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire :

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons [Baron 96]. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle-aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Reprenons la (figure I. 5), en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie.

[Sedran 99] a développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc...). Ces auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton.

I.6.2. Comparaisons des approches:

D'après une étude comparative des trois approches de formulation, [Turcry 04] a conclut que

- l'approche japonaise donne un béton très visqueux parce que renfermant un volume de pâte trop élevé. Déduire le volume de gravillons de leur compacité est cependant un élément intéressant pour rationaliser l'approche actuelle de la formulation.
- La méthode de formulation basée sur la minimisation de la pâte ne nous a pas permis d'obtenir un BAP répondant aux exigences du cahier des charges.
- L'utilisation du logiciel Bétonlab est certainement l'approche la plus cartésienne de la formulation des BAP (et des bétons en général) : on caractérise d'abord finement les constituants, puis on formule. C'est un outil pédagogique intéressant, puisqu'il permet d'appréhender l'influence de chaque constituant sur le comportement du béton, au moyen de simples simulations.

I.6.3. Particularités de la composition des BAP :

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre.

Les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes. Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires.

1.6.3.1. Un volume de pâte élevé :

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m³).

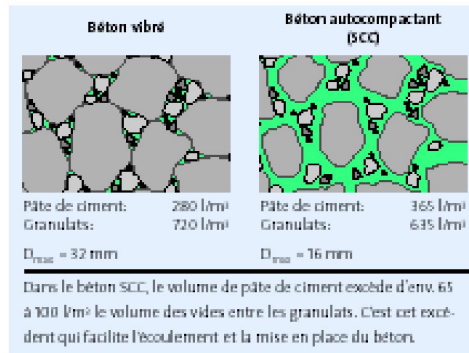


Figure I. 6: Volume de pâte relatif au BAP est différent de BV [Boukni 08].

1.6.3.2. Une quantité de fines ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante :

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m³) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (et un coût de formule trop élevé).

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (DTU 21,

Normes XP P 18-305 ou EN 206, etc.), et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc.), le filler calcaire étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les formulations de BAP) et leur proportion respective.

Les fillers calcaires sont, généralement, utilisés pour limiter le dégagement de chaleur, réduire le ressuage et augmenter la résistance à la compression notamment à jeune âge [Bensebti 08]. En effet, lorsque les particules calcaires sont bien défloculées par les superplastifiants, l'hydratation du ciment s'en trouve facilitée et l'obtention d'une matrice cimentaire de structure plus dense est favorisée. Il en découle une augmentation significative des résistances mécaniques à la compression [Billberg 01] .

1.6.3.3. L'emploi de superplastifiants :

Les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylate, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas

être trop élevée (proche du dosage de 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.

Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante [Baron 96].

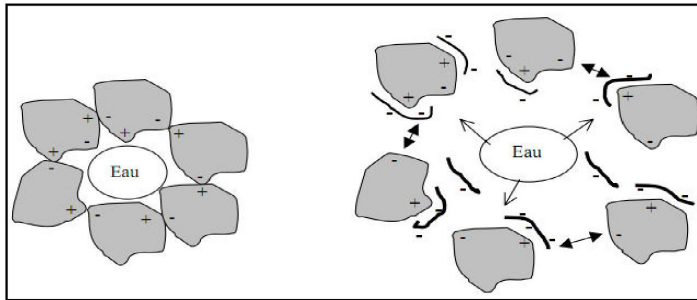


Figure I. 7: Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment[Boukni 08].

1.6.3.4. L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (réteneur d'eau) :

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci (figure I. 8). Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité - superplastifiants compatible et l'optimisation de leur dosage (figure I. 9).

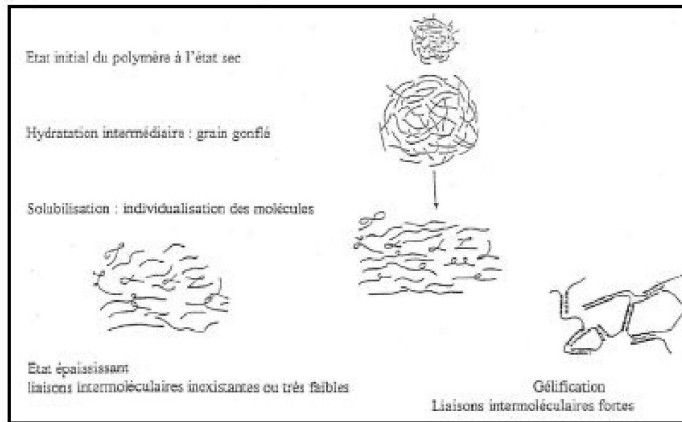


Figure I. 8: Interaction entre l'eau et les polysaccharides [Hasni 99].

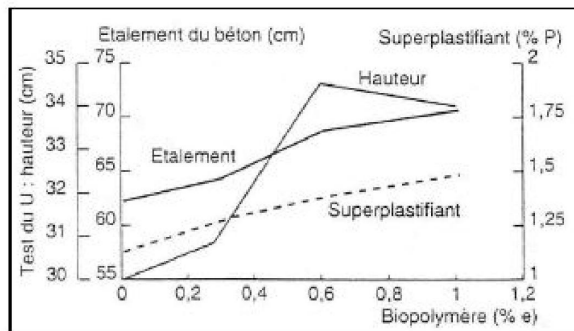


Figure I. 9: Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant, d'après [Tangtermsirikuls 91]

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n'étant alors pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles (rapport eau/fines < 0,3). Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas.

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [Sedran 95].

1.6.3.5. Un faible volume de gravillon :

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée (figure I. 10). Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

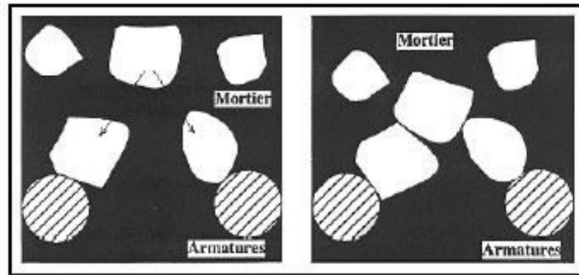


Figure I. 10: Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [Sedran 95].

Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons (D_{MAX}) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec D_{MAX} , cela conduit à diminuer le volume de gravillon [Boukni 08].

I.7. PROPRIETES DU BAP A L'ETAT FRAIS :

Pour Une Excellente Déformabilité	<p>1. L'augmentation de la fluidité de la pâte :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Par l'utilisation de Superplastifiants haut réducteurs d'eau, b. Par l'adoption d'un optimal rapport Eau/Liant, <p>2. La réduction des frictions intergranulaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. En diminuant le volume de gros granulats (un volume de pâte élevé), b. En utilisant un liant de granularité continue
Pour Une Bonne Stabilité	<p>1. La réduction des séparations des particules solides :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Par la limitation de la teneur en granulats b. Par la réduction du diamètre maximal des granulats c. Par l'augmentation de la cohésion et de la viscosité : <ul style="list-style-type: none"> - un petit rapport Eau/liant - l'utilisation d'agent colloïdal (agent de viscosité) <p>2. La minimisation du ressuage :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. En adoptant un petit dosage en eau, b. En adoptant un petit rapport Eau/Liant, c. En utilisant des fines à grande surface spécifique, d. Et en augmentant le dosage en agent de viscosité.
Pour Un moindre	<p>1. Accroître la cohésion pour réduire la ségrégation des granulats :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Par l'adoption d'un petit rapport Eau/Liant, b. Par l'utilisation d'agent colloïdal, <p>2. Respecter une compatibilité entre l'espacement des armatures et les granulats (volume et diamètre maximal) :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Par l'utilisation d'un petit volume de granulats, b. En choisissant un petit diamètre maximal des granulats.

Tableau I. 1: Les propriétés essentielles des BAP frais [Khayat 99].

Il existe de nombreux procédés pour effectuer le contrôle des propriétés sur le BAP à l'état frais.

Les recommandations nationales [AFGC 00] prévoient de caractériser les BAP à l'état frais en prenant en compte les trois caractéristiques principales demandées :

- La mobilité en milieu non confiné,
- La mobilité en milieu confiné,
- La stabilité c'est-à-dire la résistance à la ségrégation et au ressuage.

1.7.1. Mobilité en milieu non confiné :

1.7.1.1. L'essai de l'étalement :

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, il est utilisé pour estimer la fluidité des BAP sans confinement. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (figure I. 11). Le béton est introduit dans le cône sans compaction. Cependant l'affaissement étant toujours supérieur à 25 cm, On mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute, ainsi que le temps nécessaire à l'obtention du diamètre d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau (Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non). Pour des BAP cette valeur est, généralement, comprise entre 3 et 5 secondes [Menai 95].

En 2002, les recommandations en termes d'étalement admissible définissaient la fourchette 600-850 mm [AFGC 00]. Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies :

- 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

Si le BAP de classe d'étalement SF1 est pour la réalisation d'éléments non ou très faiblement armés celui de classe SF3 est dédié aux ouvrages fortement ferrailés.

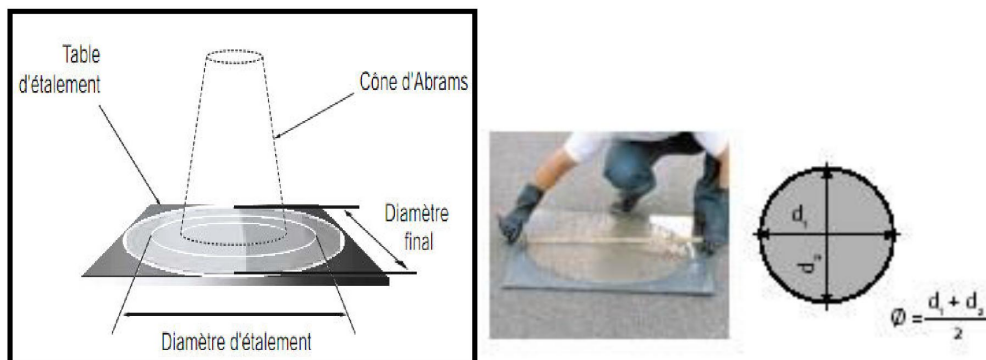


Figure I. 11: Essai d'étalement.

1.7.1.2. L'essai de l'entonnoir en forme de V «V-Funnel» «EN 12350-9» :

Cet essai a été développé par Ozawa et al [Ozawa et al 95] cite par [Sedran 99]. Il consiste à mesurer le temps d'écoulement d'un échantillon de 10 litres de béton à travers un entonnoir en forme de « V » (figure I. 12).

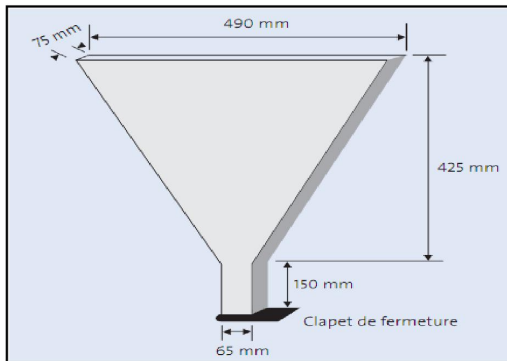


Figure I. 12: Essai de V«V funnel».

Le temps d'écoulement est déterminé suivant une procédure très simple : c'est le temps mesuré à partir de l'ouverture de l'orifice jusqu'à l'écoulement total du béton.

Plusieurs auteurs [Sedran 99] ont montré que cet essai permettait d'évaluer la fluidité du béton mais également sa stabilité lors de l'écoulement (Plus le temps d'écoulement est long moins le béton est fluide et plus il est visqueux.).

D'après les spécifications deux classes de viscosité ont été définies [EFN 05] :

- VF1 si le temps d'écoulement « t » est inférieure à 8s. cette classe correspond à $T_{50} \leq 2s$
- VF2 pour un temps d'écoulement compris entre 9 et 25s. cette classe correspond à $T_{50} > 2s$.

1.7.2. Mobilité en milieu confiné :

Pour caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique, aucun essai de référence n'a encore fait l'unanimité, mais tous ont pour objectif d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent permettre de déceler des problèmes de blocage (par formation de voûtes des granulats) lors de l'écoulement.

1.7.2.1. L'essai de la boîte en L «L-Flow Meter» (L-box test) :

La partie verticale du L est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres Ø 14) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre deux barres) [AFGC 00].

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs H_2/H_1 , voir (figure I. 13)) doit être supérieur à 0,8 [AFGC 00]. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

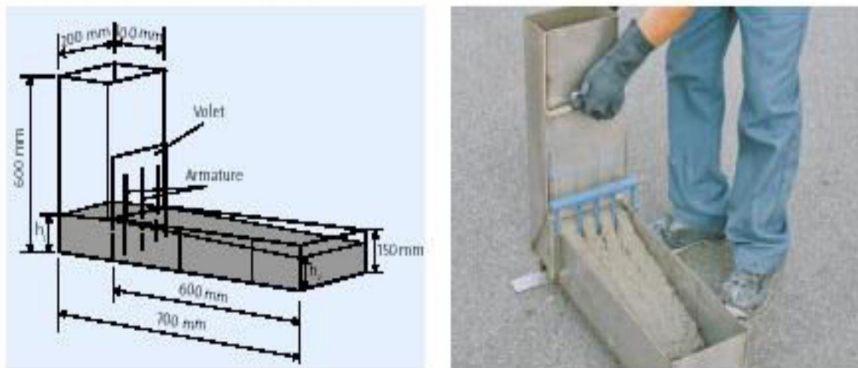


Figure I. 13: Essai de la boîte en L (L-box test).

1.7.3. Stabilité :

L'homogénéité du matériau conditionne en effet ses propriétés à l'état durci (Résistance mécanique, retrait, durabilité, etc.). Le béton doit donc être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée.

1.7.3.1. L'essai de stabilité au tamis «EN12350» :

Résistance à la ségrégation

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation.

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. L'essai de stabilité au tamis consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (P_{laitance}) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis ayant des mailles de 5 mm d'ouverture [EFN 05].

Après 2 min d'attente, le pourcentage de laitance qui est passée au travers du tamis est calculé selon l'expression [Bensebti et Houari 07]

$$\Pi = \frac{P_{\text{laitance}} \cdot 100}{P_{\text{échantillon}}}$$

Le critère de stabilité de cet essai est :

- $0\% \leq \Pi \leq 15\%$, alors la stabilité est satisfaisante
- $15\% \leq \Pi \leq 30\%$, la stabilité est critique
- $\Pi > 30\%$, la stabilité est très mauvaise.

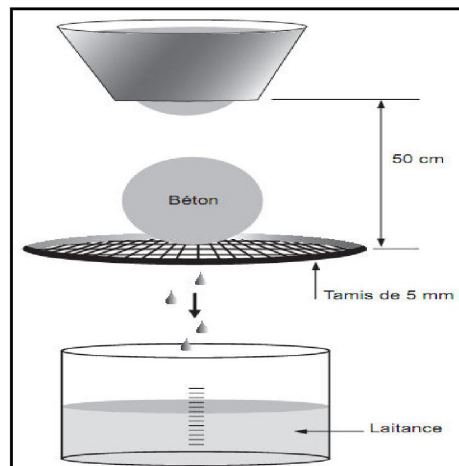




Figure I. 14: Essai de stabilité au tamis.

1.7.3.2. L'essai de ressuage :

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

Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une mince pellicule d'eau à la surface du béton. Selon les conditions météorologiques, on assiste à une compétition entre le débit d'eau ressuée et le débit d'eau évaporée [Josserand 02]. Si ce dernier est plus faible, le phénomène de ressuage est visible, sinon, la surface du béton au lieu d'être brillante, devient mate. La quantité d'eau ressuée sera de toute façon égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée.

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, (Figure I.15) le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer [AFGC00]. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit employé.

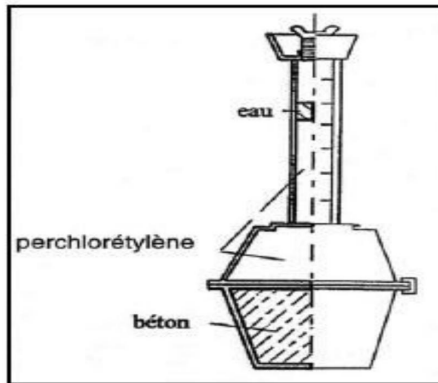


Figure I. 15: Essai de ressuage à l'aéromètre.

1.7.4. Les Essai complémentaires sur BAP frais :

1.7.4.1. Mesure de la teneur en air occlus :

Pour la mesure de l'air occlus dans le béton frais (figure I. 16), on utilise la méthode dite « par pression ». Comme le seul élément compressible dans le béton frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au béton frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le béton. Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre selon la norme française [NF P 18-353].

Le pourcentage de l'air occlus dans les bétons autoplaçants n'est pas limité à une valeur fixe, mais, plus il augmente plus il influe négativement sur les performances mécanique de notre béton.



Figure I. 16: Mesure de l'air occlus à laide d'un aéromètre.

1.7.4.2. La masses volumiques :

La masse volumique réelle du béton frais doit être systématiquement mesurée. Cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique théorique. Elle est mesurée par la pesée d'un récipient de 7 litre (fond de l'aéromètre) remplis de béton autoplaçant sans vibrer (photo I.1). Si M est la masse du récipient plein de béton (arasé à l'aide d'une règle) et M_0 celle du récipient vide, la densité est déduite par l'application de la formule suivante :

$$M_{VR} = \frac{(M - M_0)}{V} \quad [kg/m^3]$$

Où M_{VR} est la masse volumique réelle du béton frais et V le volume du récipient utilisé (7 litres). La masse volumique réelle M_{VR} est normalement égale à la masse volumique théorique M_V calculée à partir de la formulation théorique du béton avec comme source d'incertitude la quantité d'air occlus.



Photo I. 1: Mesure de la masse volumique réelle.

I.8. PROPRIETES DU BAP A L'ETAT DURCI :

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

1.8.1. Résistance à la compression :

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

La résistance tend à être régie par le type et la proportion d'addition de poudre que par le rapport de E/P [Domone 06].

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [De Larrard 99]. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Les travaux de [Gibbs 99] ont montré que la résistance à 7j est plus élevée pour les BAP que celle de BV référence, en raison de la présence de poudre de calcaire qui accélère l'hydratation et la résistance à la compression au jeune âge.

[Zhu 05] ont montré que la résistance de BAP utilisant la poudre de pierre à chaux augmente de 50 à 80% de celle de référence à 7j et de 20 à 40% à 28j, ils ont expliqué cette augmentation par la poudre à pierre à chaux accélère l'hydratation de ciment et augmente la résistance au jeune âge.

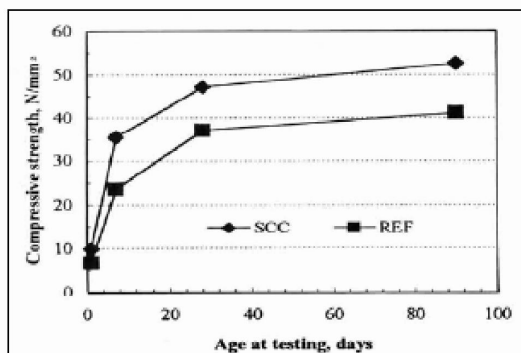


Figure I. 17: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [Gibbs 99].

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

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [Felekoglu 03].

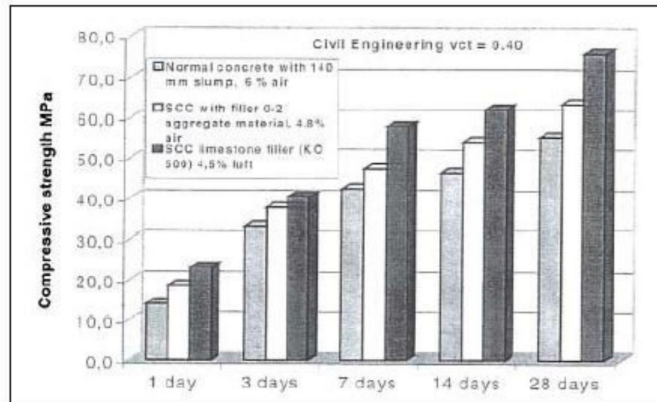


Figure I. 18: Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP (de formulation différente) [Petersson 01].

De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique [Shi 02]. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

1.8.2. Résistance à la traction :

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

En comparant des mélanges de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction [Gibbs 02].

1.8.3. Module d'élasticité :

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une baisse quantité de gros granulats [Burak 06].

Si on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{Cj}^{1/3}$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré.

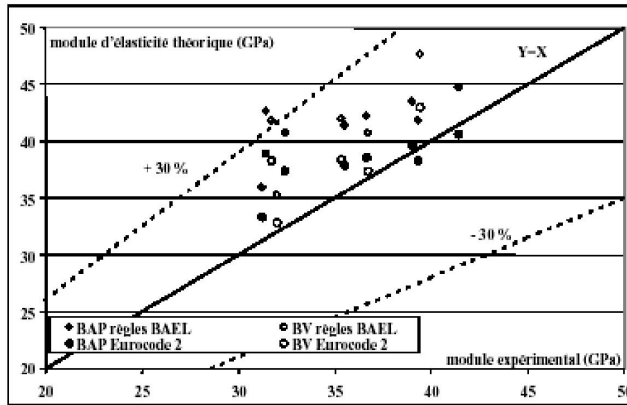


Figure I. 19: Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [Pons 03]

Certains auteurs ont trouvé que le module élastique de BAP coïncide bien avec celui de BV avec des propriétés similaires quand la résistance est constante [Person 03], les mêmes résultats trouvés par [Erik et Penti 99].

Par contre [Dehn et Al 00], le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV donc le BAP est plus rigide.

[Jaccob et Hunkeler 99] ont trouvé qu'avec une résistance donnée le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV, ce comportement est dû à la petite dimension de grains de BAP et la quantité élevée de pâte de ciment. En effet, dans un béton formulé avec des granulats classiques, le module de la matrice (6000-25000 MPa) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats Eg (60000 à 100000 MPa) [Boukni 08].

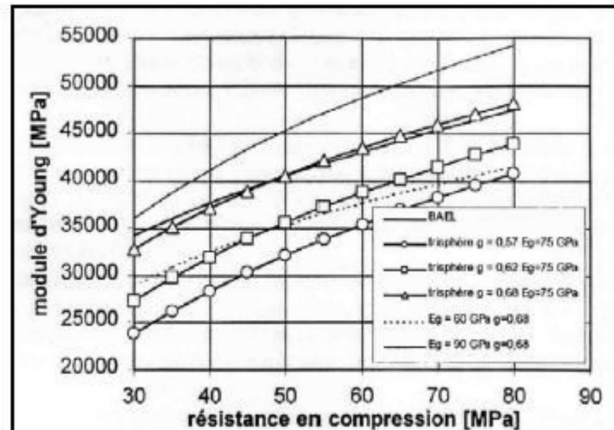


Figure I. 20: Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [De Larrard 92].

1.8.4. Retrait :

A la vue du volume de pâte plus important dans un BAP que dans un béton traditionnel, on peut penser que le retrait de dessiccation serait plus important. Les données de la littérature spécifique sont contradictoires même si les communications traitant du problème montrent une tendance d'un retrait plus important pour les BAP.

1.8.4.1. Retrait endogène :

En ce qui concerne le retrait endogène, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés. En effet, même si certains auteurs [Hu 98] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés (figure I. 21), d'autres [Pons 03] (figure I. 22) contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton.

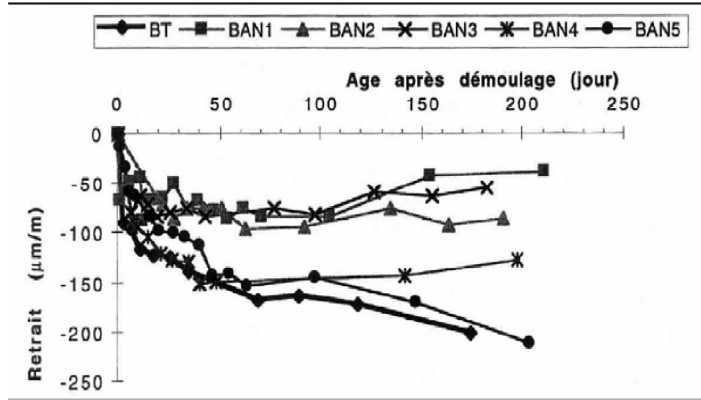


Figure I. 21: Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et cinq BAP [Hu 98].

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés [Pons 03] (figure I. 22).

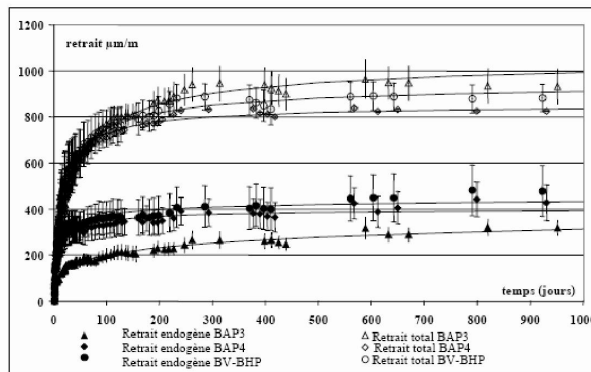


Figure I. 22 : Retraits endogènes et totaux d'un béton vibré et deux BAP 60 Mpa [Pons 03].

1.8.4.2. Retrait de dessiccation :

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs [Hu 98] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés (figure I. 23). Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé

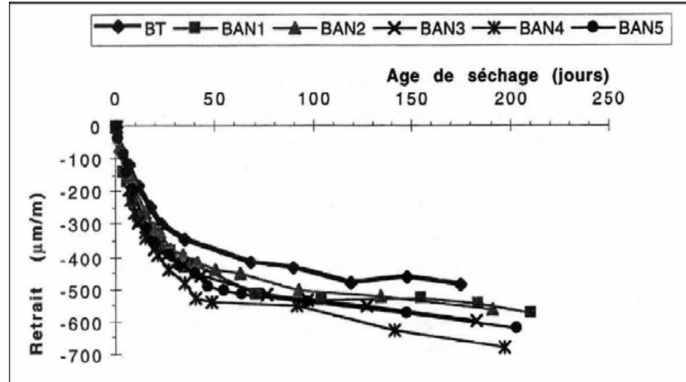


Figure I. 23: Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et cinq BAP [Hu 98].

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [Sakata 98]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 μm/m (à 180 jours).

Enfin, d'autres auteurs [Sonebi 99] observent des retraits de séchage des BAP moins importants que ceux des bétons vibrés auxquels ils sont comparés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). Le phénomène est attribué à l'effet du volume de pâte et au rapport E/L car, d'après [Neville 00], augmenter le volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage [Benkechkache 08].

1.8.5. Fluage :

Le fluage peut être défini comme une augmentation de la déformation sous une contrainte constante. Comme cette augmentation de la déformation peut être plusieurs fois supérieure à la déformation sous l'application d'une charge, la prise en compte du fluage est d'une importance considérable lors de calcul des structures de bétons [Neville 00].

Selon [Casanova 96] le phénomène de fluage dépend de la distribution des efforts au sein de la structure et aussi de type de matrice de ciment.

[Proust 2002] trouve des valeurs de même ordre de grandeur de BAP et pour BV. Ces résultats sont confirmés par [Turcry 04], où il indique qu'en compression, le fluage total du BAP est identique à celui de BV. Par contre, [Vieir et Bitencourt 03] affirment que la déformation de fluage est de 25% supérieure à celles des BV [Boukni 08].

1.8.6. Durabilité :

La durabilité du béton dépend donc de sa capacité à résister à la pénétration de fluides : l'oxygène, l'eau (contenant ou non des ions agressifs) et le dioxyde de carbone à l'intérieur du matériau.

1.8.6.1. Carbonatation :

Dans le même esprit de comparaison des BAP et des bétons traditionnels, de caractéristiques totalement différentes, les conclusions sont difficiles à dégager.

L'étude de la référence [Sakata 98] sur les BAP et les bétons traditionnels montre qu'il n'y a pas de différence notable entre les cinétiques de carbonatation des deux types de bétons. On retrouve des résultats classiques de type plus le rapport E/C est important plus la profondeur de carbonatation est importante (figure I. 24).

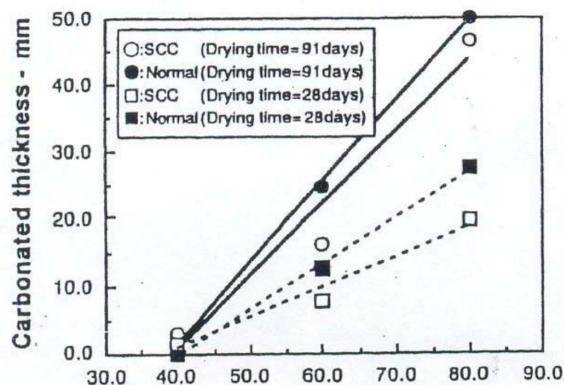


Figure I. 24: Profondeur de carbonatation des BAP (SCC) et des bétons vibrés de même rapport E/C [Hasni 99].

1.8.6.2. Résistance de gel-dégel :

La résistance de gel-dégel du béton dépend de ses différentes propriétés, résistance de la pâte de ciment durci, capacité de déformation et des caractéristiques de son réseau poreux.

La résistance d'un béton vis-à-vis du gel-dégel est liée à la quantité d'air entraîné et à la répartition des bulles d'air.

Comme nous l'avons vu précédemment, les formulations de BAP comportent des quantités importantes de superplastifiants dont les effets secondaires peuvent être l'entraînement d'air dans le béton. D'autre part, l'utilisation complémentaire d'un agent de viscosité peut avoir comme effet de stabiliser ce réseau de bulles d'air.

Les résultats présentés dans la littérature montrent nettement que les BAP, formulés sans entraîneur d'air, sont plus résistants au gel-dégel que les bétons vibrés (de même rapport E/C, avec ou sans entraîneur d'air) [Hasni 99].

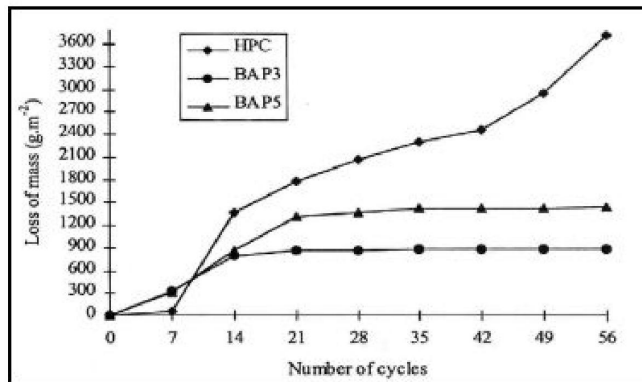


Figure I. 25: Perte de masse de deux BAP et d'un béton vibré pendant un test d'écaillage (NF P 18-420) D'après Rougeau 99 [Assié 04].

1.8.7. Résistance à haute température :

La figure I.26 montre que l'exposition de béton à haute température cause une dégradation de ces propriétés. La diminution de la résistance et le module élastique varie proportionnellement avec la température.

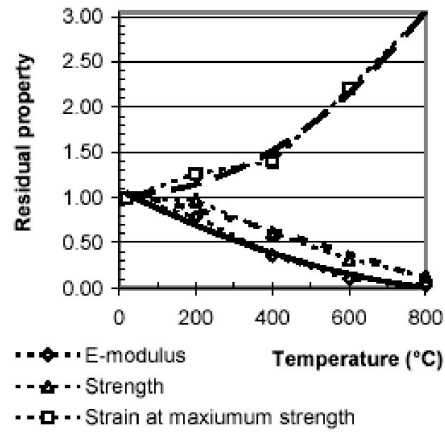


Figure I. 26: Les propriétés résiduelles des BAP [Person 03].

L'étude de [Person 03] sur différentes formulations de BAP a mentionnée que le comportement de BAP et de BV est identique. La figure I.27, en désignant par AK : BAP avec addition de poudre à chaux, et BR : BV et AG : BAP avec l'addition de verre, montre que les différents bétons ont le même comportement.

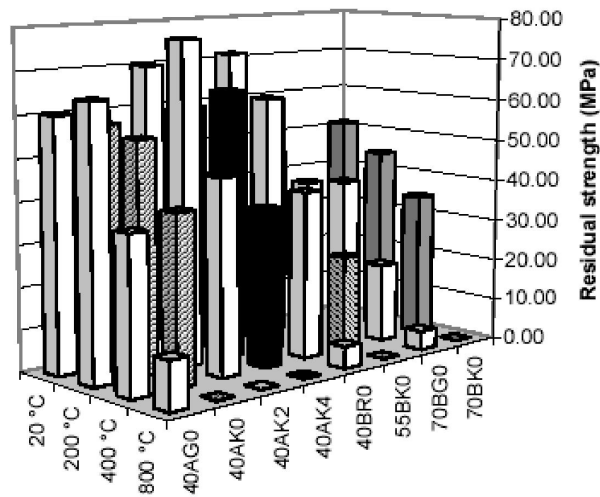


Figure I. 27: les propriétés résiduelles des BAP et de BV à 20°C [Person 03].

I.9. CONCLUSION :

Les BAP se développent maintenant en Europe et semblent être amenés à remplacer, à terme, les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications. Ils présentent en effet des intérêts à la fois techniques et économiques : absence de nuisances sonores en milieu urbain, possibilité de bétonner des zones fortement ferraillées ou à géométrie complexe et l'obtention d'une meilleure qualité du béton (pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers) d'une part, diminution du temps de personnel lors de la mise en place et réduction des coûts des processus industriels, d'autre part. De la diversité des domaines des travaux réalisés, reste le BAP est un nouveau matériau qui n'est pas encore maîtrisé en Algérie.

À l'heure actuelle, il n'existe pas pour les BAP de méthode de formulation généralisée, comme la méthode Dreux-Gorisse pour les bétons ordinaires. Toutes les méthodes trouvées dans la littérature découlent des trois approches : japonaise, minimisation de pâte de ciment, optimisation de squelette granulaire. Dans notre cas on a choisis d'utiliser l'approche japonaise parce qu'elle est sécuritaire conséquence de dosage de pâte élevé. Et elle ne nécessite pas d'outil informatique et sa procédure de réalisation est très simple.

L'objectif de notre étude est l'analyse de l'influence des fines des déchets de marbre sur les propriétés mécaniques et physiques à l'état frais et durci des BAP. Cela permet d'éliminer les déchets par recyclage et utilisation d'où la protection de l'environnement, (l'impact économique et environnemental favorable). En effet, la formulation du béton auto-plaçant (BAP) nécessite de grandes quantités des fines afin d'améliorer la fluidité sans entraîner de ressuage et/ou de ségrégation. Nous nous sommes intéressés à l'influence des fines des déchets de marbre par rapport aux fines calcaires sur les propriétés à l'état frais et durci de ces matériaux.

Pour cela, et avant d'entamer notre sujet, il est nécessaire d'identifier et de caractériser les constituants de béton que nous allons utiliser. Après, la phase de mise au point des formulations, et leurs caractérisations, nous proposons une contribution même partielle pour résoudre le problème des déchets avec la valorisation ou la réutilisation de ces déchets en domaine de génie civil. Ce qui constituera le prochain chapitre de ce mémoire.

2. VALORISATION DES DECHETS

II.1. HISTORIQUE :

Il est considéré comme déchet toute substance mise en rebut, tout produit qui doit être jeté car il est usé, contaminé ou abîmé. Est déchet ce qui la personne qui le produit considère comme tel même s'il possède de la valeur pour d'autre [Maillot 01].

En Europe, plus de 25% des déchets proviennent de la démolition ou de la rénovation d'immeubles et la moitié de ces rebuts encombrant les décharges publiques. On estime que 30% seulement des matériaux utilisés dans la construction sont actuellement recyclés, alors que la pratique dans certains pays européens, démontre que 90% sont réutilisables [Ministère TP 05].

En Belgique, la confédération construction wallonne cite déjà en 1997 le chiffre (estimé) considérable de 2,3 millions de tonnes de déchets produit dans le secteur pour l'année 1997 [Pimienta 97].

En France la loi du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets et protection de l'environnement interdit à partir de l'an 2002 la mise dans les anciennes décharges des déchets tels que les matériaux de démolition [Remond 97].

Le Danemark dispose d'une loi spécifique depuis 1990 concernant l'utilisation des granulats recyclés [Dreux 83].

En Suisse, 80% des quelques 1,5 millions de tonnes de déchets de chantier traité en 1996 dans des installations de préparations et de triage ont pu être recyclé. Dans les déchets de chantier, le pourcentage de béton qui est transformé en granulats de béton augmente. On peut prévoir qu'à l'avenir environ 2.5 % des bâtiments sont détruits chaque année ce qui entrainera quelque 1 millions de mètre cube de déchet de béton [Dupaing 95].

L'industrie de construction génère aussi une quantité importante de déchets de brique et de béton qui rarement sont valorisés. Aussi, l'Algérie compte un déficit important en matériaux de construction et en particulier le ciment et le sable [Maillot 01].

La valorisation des déchets de démolition connaît un développement assez important et le taux de recyclage des déchets de construction /démolition a atteint dans certains pays comme les Pays-Bas 73% [Remond 97].

II.2. INTRODUCTION :

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa traitabilité. Il s'agit donc de

«mesurer pour connaître et connaître pour agir».

L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir.

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

Mais en Algérie, le processus d'industrialisation et de développement urbain du pays s'est effectué jusqu'à récemment sans que les précautions environnementales ne soient réellement prises en considération [Saadani].

II.3. ORIGINE DE LA PRODUCTION DE DECHETS :

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- **biologiques** : tout cycle de vie produit des métabolites (matière fécale, cadavre ...).
- **chimiques** : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit C à partir de deux autres produits A et B par réaction $A+B \rightarrow C+D$; D sera un sous produit qu'il faut gérer si on n'en a pas l'usage évidente.
- **technologiques** : tout procédé industriel conduit à la production de déchet.
- **économiques** : les produits en une durée de vie limitée.
- **écologiques** : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique .
- **accidentelles** : les inévitables dysfonctionnement des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets.

II.4. CONSTITUTION CHIMIQUE DES DECHETS :

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux [Sperandio 01].

II.5. DIFFERENTS TYPES DE DECHETS :

II.5.1. Déchets ultimes :

Tout déchet ménager et assimilé brut issu du ramassage parallèle à la collecte sélective, le

refus de tri, le déchet industriel banal issu des ménages et des déchetteries ainsi que les boues de stations d'épuration.

II.5.2. Déchets inertes :

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

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

Ce sont notamment les déchets suivants :

Les bétons, les tuiles et les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres, les enrobés bitumeux.

II.5.3. Déchets assimilés :

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

II.5.4. Déchets verts :

Déchets végétaux des parcs et jardins (gazon, branchages...).

II.5.5. Déchets organiques :

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

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

II.5.6. Déchets industriels banals (DIB) :

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

II.5.7. Déchets dangereux :

II.5.7.1. Déchets industriels spéciaux (DIS) :

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

II.5.7.2. Déchets ménagers spéciaux (DMS) :

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

II.6. RECYCLAGE DES DECHETS :

II.6.1. Définition :

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

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

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

Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine. Ainsi, dans le cas du Québec, l'importante hausse du taux de recyclage, passant de 18 % à 42 % entre 1988 et 2002, est allée de paire avec une augmentation de la quantité de déchets à éliminer par habitant, passant de 640 kg/an/personne à 870 kg du fait d'une augmentation de 50 % de la production par habitant durant cette même période. En France, le volume de déchets a doublé entre 1980 et 2005, pour atteindre 360 kg/an/personne.

Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large [Bourmatte 04].

II.6.2. Législation européenne relative aux déchets :

En 2007, la production, le stockage, le traitement et le recyclage des déchets est désormais encadrée en Europe par une législation de plus en plus élaborée.

L'incinération des déchets dangereux est l'objet de la Directive n° 2000/76/CE du Parlement européen et du Conseil du 4 décembre 2000. Le stockage de déchets industriels spéciaux est définie par la Directive n°1999/31/CE du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets et la Décision de la Commission n° 2000/532/CE du 3 mai 2000 ainsi que la Décision 94/904/CE du Conseil établissant une liste de déchets dangereux. La qualité de l'air est quant à elle protégée par le Règlement du Parlement européen et du Conseil CE 2037/2000 du 29 juin 2000 sur les substances qui appauvrissent la couche de zone et par la Décision du Conseil du 25 avril 2002 qui est l'Approbation, au nom de la Communauté européenne, du protocole de Kyoto à la convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques et l'exécution conjointe des engagements qui en découlent [Saadani].

II.6.3. Technique de recyclage :

II.6.3.1. Procédés du recyclage :

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

Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants.

Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer.

Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

II.6.3.2. La chaîne du recyclage :

a. Collecte de déchets :

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets.

Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement techniques.

Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la

plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même.

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

b. Transformation :

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

c. Commercialisation et consommation :

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

II.6.4. Impact du recyclage dans l'industrie :

II.6.4.1. Source d'approvisionnement alternative :

Le recyclage des déchets offre une source d'approvisionnement en matières premières alternatives aux autres sources. Par exemple, le recyclage de fil de cuivre permet d'obtenir du cuivre auprès des entreprises de recyclage et non des entreprises d'extraction. Le recyclage offre aux entreprises les bénéfices de la multiplicité des sources d'approvisionnements telles que la facilité de négociation des prix d'achat ou la sécurité des approvisionnements [Saadani].

II.6.4.2. Création d'activités :

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

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

II.6.4.3. Mise en conformité avec la loi :

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

II.6.4.4. Coût de main-d'œuvre :

Le recyclage suppose de trier les déchets en fonction du mode de recyclage auquel chacun d'eux sera soumis. Ceci exige une main-d'œuvre abondante, même lorsqu'un tri sélectif est effectué en amont par la population. En effet, il arrive qu'un second tri soit nécessaire dans un centre d'affinage pour éliminer les erreurs de tri et les impuretés qui pourraient compromettre le recyclage (c'est le cas du plastique et du verre).

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

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

II.6.4.5. Conséquences sur les produits issus du recyclage :

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

II.6.5. Impacts du recyclage sur l'environnement :

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

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

- l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer.
- chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut.
- le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité.
- l'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir

été fondu).

- chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois.
- chaque feuille de papier recyclé fait économiser 1 l d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois.

II.7. CLASSIFICATION DES DECHETS:

- Selon leur nature.
- Selon leur mode de traitement.
- Selon le comportement et les effets sur l'environnement.
- Selon l'origine.

II.8. GESTION DES DECHETS :

II.8.1. Définition:

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le traitement (le traitement de rebut), la réutilisation ou l'élimination des déchets, habituellement ceux produits par l'activité humaine, afin de réduire leurs effets sur la santé humaine, l'environnement, l'esthétique ou l'agrément local. L'accent a été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation.

La gestion des déchets concerne tout les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun possédant sa filière spécifique. Les manières de gérer les déchets diffèrent selon qu'on se trouve dans un pays développé ou en voie de développement, dans une ville ou dans une zone rurale, que l'on ait affaire à un particulier, un industriel ou un commerçant. La gestion des déchets non toxiques pour les particuliers ou les institutions dans les agglomérations est habituellement sous la responsabilité des autorités locales, alors que la gestion des déchets des commerçants et industriels est sous leur propre responsabilité [Bourmatte 04].

La loi n° 75-633 du 15 juillet 1975, modifiée par la loi du 13 juillet 1992, préconise :

- De prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets, notamment en agissant sur la fabrication et sur la distribution des produits.
- D'organiser le transport des déchets et de le limiter en distance et en volume.
- De valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie.
- D'assurer l'information du public sur les effets des opérations de production et d'élimination des déchets, vis-à-vis de l'environnement et de la santé publique sous

réserve des règles de confidentialité prévues par la loi, ainsi que sur les mesures destinées à en prévenir ou à en compenser les effets préjudiciables [Jeremie 01].

II.8.2. Principe de gestion des déchets :

Il y a plusieurs principes de gestion des déchets dont l'usage varie selon les pays ou les régions. La hiérarchie des stratégies (règle des trois R) :

- **Réduire**
- **Réutiliser**
- **Recycler**

Classe les politiques de gestion des déchets selon la préférence qu'on doit leur accorder.

La hiérarchie des stratégies a plusieurs fois changé d'aspect ces dix dernières années, mais le concept sous-jacent est demeuré la pierre angulaire de la plupart des stratégies de gestion des déchets : l'objectif est d'utiliser au maximum les matériaux et de générer le minimum de rebuts. Certains experts en gestion des déchets ont récemment ajouté un « quatrième R » :

« Repenser », qui implique que le système actuel a des faiblesses et qu'un système parfaitement efficace exigerait qu'un regard totalement différent soit porté sur les déchets. Certaines solutions "re-pensées" sont parfois peu intuitives. On peut prendre par exemple un cas dans l'industrie textile. Afin de réduire la quantité de papier utilisée pour les patrons, il a été conseillé de les découper dans de plus grandes feuilles, afin de pouvoir utiliser les chutes pour découper les petites pièces du patron. Ainsi, il y a une réduction du résidu global. Ce type de solution n'est bien entendu pas limité à l'industrie textile.

La réduction à la source nécessite des efforts pour réduire les déchets toxiques et autres résidus en modifiant la production industrielle. Les méthodes de réduction à la source impliquent des changements dans les processus de fabrication, les apports de matières premières et la composition des produits. Parfois le principe de « prévention de la pollution » indique en fait la mise en œuvre d'une politique de réduction à la source.

Une autre méthode de réduction des déchets à la source est d'accroître les incitations au recyclage. Plusieurs villes aux États-Unis ont mis en place des taxes dont le montant est fonction des quantités d'ordures déposées (Paye quand tu jettes : Pay As You Throw - PAYT) qui se sont révélées efficaces pour réduire le volume des déchets urbains.

L'efficacité des politiques de réduction à la source se mesure à l'importance de la réduction de la production de déchets. Une autre approche, plus controversée, est de considérer la réduction de l'utilisation de substances toxiques. On s'intéresse ici à réduire l'utilisation de substances toxiques, alors même que la tendance est plutôt à la hausse. Cette approche,

dans laquelle c'est le principe de précaution qui est mis en avant, rencontre une vive opposition des industries chimiques. Ils accusent cette démarche de stigmatiser les produits chimiques. Certains états américains, comme le New Jersey et l'Oregon ont mis en place des politiques de réduction des déchets toxiques [Bourmatte 04].

II.8.3. Technique de gestion des déchets :

II.8.3.1. Décharge :

Stocker les déchets dans une décharge est la méthode la plus traditionnelle de stockage des déchets, et reste la pratique la plus courante dans la plupart des pays. Historiquement, les décharges étaient souvent établies dans des carrières, des mines ou des trous d'excavation désaffectés. Utiliser une décharge qui minimise les impacts sur l'environnement peut être une solution saine et à moindre coût pour stocker les déchets ; néanmoins une méthode plus efficace sera sans aucun doute requise lorsque les espaces libres appropriés diminueront.

Les anciennes carrières ou celles mal gérées peuvent avoir de forts impacts sur l'environnement, comme l'éparpillement des déchets par le vent, l'attraction des vermines et les polluants comme les lixiviats qui peuvent s'infiltrer et polluer les nappes phréatiques et les rivières. Un autre produit des décharges contenant des déchets nocifs et le biogaz, la plupart du temps composé de méthane et de dioxyde de carbone, qui est produit lors de la fermentation des déchets.

Les caractéristiques d'une décharge moderne sont des méthodes de rétention des lixiviats, tels que des couches d'argile ou des bâches plastiques. Les déchets entreposés doivent être compactés et recouverts pour éviter d'attirer les souris et les rats et éviter l'éparpillement. Beaucoup de décharges sont aussi équipées de systèmes d'extraction des gaz installés après le recouvrement pour extraire le gaz produit par la décomposition des déchets. Ce biogaz est souvent brûlé dans une chaudière pour produire de l'électricité. Il est même préférable pour l'environnement de brûler ce gaz que de le laisser s'échapper dans l'atmosphère, ce qui permet de consommer le méthane, un gaz à effet de serre encore plus nocif que le dioxyde de carbone. Une partie de ce biogaz peut aussi être utilisé comme carburant.

Beaucoup d'autorités locales, particulièrement dans les zones urbaines, ont des difficultés pour ouvrir de nouvelles décharges car les riverains s'y opposent. Peu de personnes veulent d'une décharge dans leur voisinage. C'est pourquoi le coût de stockage des déchets solides dans ces régions est plus coûteux, les détritiques devant être transportés plus loin pour être stockés.

Certains s'opposent aux décharges quelque soient les conditions ou le lieu, en expliquant qu'au final le stockage en décharge laissera une planète véritablement polluée avec plus aucune fissure ou espace sauvage. Certains futurologues ont déclaré que les décharges seront les « mines du futur » : comme certaines ressources s'appauvrissent, on pourra justifier qu'il est nécessaire de les extraire des décharges où elles avaient été enfouies considérée alors comme non valorisable.

Cet état de fait et la prise en compte croissante des impacts de la consommation excessive des ressources a permis, dans plusieurs régions, d'accroître les efforts pour minimiser la quantité de déchets mis en décharge. Ces efforts sont la mise en place de taxes ou prélèvements sur les déchets mis en décharge, le recyclage des matériaux, leur transformation en énergie, la conception de produits nécessitant moins de ressources, et une législation imposant aux fabricants la prise en charge des coûts d'emballage et de stockage des déchets. Un sujet connexe est le concept d'écologie industrielle, où les flux de matière entre les industries sont étudiés. Les sous produits d'une industrie peuvent être utiles à une autre, cela permet de réduire les flux de déchets [Saadani].

II.8.3.2. Incinération :

L'incinération est le processus de destruction d'un matériau en le brûlant. L'incinération est souvent appelée « Énergie à partir des déchets » ou « des déchets vers l'énergie » ; ces appellations sont trompeuses puisqu'il y a d'autres façons de récupérer de l'énergie à partir de déchets sans directement les brûler (voir fermentation, pyrolyse et gazéification).

Elle est connue pour être une méthode pratique pour se débarrasser des déchets contaminés, comme les déchets médicaux biologiques. Beaucoup d'organisations utilisent aujourd'hui l'exposition des déchets à haute température pour les traiter thermiquement (cela inclut aussi la gazéification et la pyrolyse). Cette technique inclut la récupération du métal et de l'énergie des déchets solides municipaux comme le stockage adapté des résidus solides (mâchefers) et la réduction du volume des déchets.

L'incinération est une technique éprouvée et répandue, en Europe comme dans les pays en voie de développement, même si elle est soumise à controverse pour plusieurs raisons. Les controverses concernent généralement les problèmes environnementaux et sanitaires liés aux incinérateurs qui ont fonctionné dans le passé, avant l'application des normes actuelles.

En premier lieu, il s'agit d'un mode d'élimination de déchets qui a un taux de valorisation limité. L'incinération détruit les ressources naturelles contenues dans les

déchets et ne permet pas de récupérer 100% du pouvoir calorifique du déchets. L'énergie récupérée, sous la forme de chaleur ou d'électricité, provient du refroidissement des fumées de combustion dans une chaudière, qui permet de récupérer de la chaleur, qui peut être utilisée directement ou à son tour entraîner une turbine pour produire de l'électricité. L'incinération est malgré tout identifiée en France en 2002 comme la deuxième source d'énergie renouvelable pour la production d'électricité (après l'hydraulique) et pour la production de chaleur (après la biomasse).

Deuxièmement, l'incinération des déchets solides des villes produit une certaine quantité de polluants atmosphériques (dioxines et furannes, métaux lourds, gaz acides, poussières), dont les valeurs limites d'émissions sont fixées par la réglementation. Au cours des années 1990, des avancées dans le domaine du contrôle des rejets et de nouveaux règlements gouvernementaux ont permis une réduction massive de la quantité des différents polluants atmosphériques, y compris les dioxines et de furannes. L'Union européenne et l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) ont pris la décision de créer des normes très strictes concernant l'incinération des déchets.

L'incinération produit aussi un grand nombre de résidus solides (mâchefers) qui doivent être éliminés en décharge ou qui font l'objet d'un traitement si une valorisation en technique routière est envisagée. Dans les années 1980, l'entreposage en lieu sûr des mâchefers, qui à cette époque étaient aussi mélangés aux cendres, était un problème environnemental important. Au milieu des années 90, des expériences en France ont été réalisés pour traiter et élaborer des mâchefers (extraction des métaux ferreux et d'aluminium, criblage, broyage, concassage, maturation à l'air libre pour favoriser des réactions de carbonatation et d'oxydation). Les résultats positifs des suivis de plate-formes expérimentales utilisant des mâchefers sous les routes ont permis le développement de cette filière [Saadani].

II.8.3.3. Compost et fermentation:

Les déchets organiques, comme les végétaux, les restes alimentaires, ou le papier, sont de plus en plus recyclés. Ces déchets sont déposés dans un composteur ou un digesteur pour contrôler le processus biologique de décomposition des matières organiques et tuer les agents pathogènes. Le produit organique stable qui en résulte est recyclé comme paillis ou terreau pour l'agriculture ou le jardinage.

Il y a un très large éventail de méthodes de compostage et de fermentation qui varient en complexité du simple tas de compost de végétaux à une cuve automatisée de fermentation de déchets domestiques divers. Ces méthodes de décomposition biologique se distinguent en aérobie, comme le compost, ou anaérobie, comme les

digesteurs, bien qu'il existe aussi des méthodes combinant aérobie et anaérobie.

II.8.3.4. Traitement biologique et mécanique :

Le traitement biologique et mécanique (TBM) est une technique qui combine un tri mécanique et un traitement biologique de la partie organique des déchets municipaux. Le TBM est aussi parfois appelé TMB (traitement mécanique et biologique) cela dépend de l'ordre dans lequel s'effectuent les opérations.

La partie « mécanique » est souvent une étape de tri du vrac. Cela permet de retirer les éléments recyclables du flux de déchets (tels les métaux, plastiques et verre) ou de les traiter de manière à produire un carburant à haute valeur calorifique nommé combustible dérivé des déchets qui peut être utilisé dans les fours des cimenteries ou les centrales électriques.

La partie « biologique » réfère quant à elle à une fermentation anaérobie ou au compostage. La fermentation anaérobie détruit les éléments biodégradables des déchets pour produire du biogaz et du terreau. Le biogaz peut être utilisé pour créer de l'énergie renouvelable. La partie « biologique » peut aussi faire référence à une étape de compostage.

Dans ce cas les composants organiques sont traités par des micro-organismes à l'air libre.

Ils détruisent les déchets en les transformant en dioxyde de carbone et en compost. Il n'y a aucune énergie produite par le compostage.

TBM est de plus en plus reconnu comme une méthode efficace dans les pays où les techniques de gestion des déchets évoluent comme le Royaume-Uni ou l'Australie, pays où la compagnie WSN Environmental solutions a pris une position majeure dans le développement des usines de type TBM [Saadani].

II.8.3.5. Pyrolyse et gazéification :

La pyrolyse et la gazéification sont deux méthodes liées de traitements thermiques où les matériaux sont chauffés à très haute température et avec peu d'oxygène. Ce processus est typiquement réalisé dans une cuve étanche sous haute pression. Transformant les matériaux en énergie cette méthode est plus efficace que l'incinération directe, plus d'énergie pouvant être récupérée et utilisée.

La pyrolyse des déchets solides transforme les matériaux en produits solides, liquides ou gazeux. L'huile pyrolytique et les gaz peuvent être brûlés pour produire de l'énergie ou être raffinés en d'autres produits. Les résidus solides (charbon) peuvent être transformés plus tard en produits tels les charbons actifs.

La gazéification est utilisée pour transformer directement des matières organiques en un gaz de synthèse appelé syngaz composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Ce gaz est

ensuite brûlé pour produire de l'électricité et de la vapeur. La gazéification est utilisée dans les centrales produisant de l'énergie à partir de la biomasse pour produire de l'énergie renouvelable et de la chaleur [Saadani].

II.9. DECHETS EN ALGERIE :

- L'Algérie génère chaque année 10 à 12 millions de tonnes de déchets ménagers.
- L'Algérie compte 3000 décharges sauvages. Ces décharges occupent une surface totale de l'ordre de 150 000 hectares.
- décharge coutent annuellement à l'Algérie 0,19 % du PIB en impacts sur la santé et 0,13 % du PIB en pertes économiques (potentiel de recyclage et de valorisation non réalisés).
- Le nombre d'agents chargés de la collecte des déchets ménagers et du nettoyage des voies publiques en Algérie, était de un (01) agent pour 500 habitants en 1980. En 2005, il est passé à un (01) agent pour 1500 habitants en 2005, soit trois fois moins d'agents qu'il n'en faut.
- □ Le parc véhicules de collecte des déchets ménagers et assimilés en Algérie est estimé à un (01) véhicule pour environ 7500 habitants alors que les normes internationales sont de un (01) véhicule pour 4000 habitants. Le déficit national en véhicules de collecte serait donc de 87,5%.
- Chaque année 200 000 tonnes de déchets d'emballages sont rejetés en Algérie. Les plastiques constituent 95% de ces emballages et les métaux représentent les 5% restants.
- Des 200 000 tonnes de déchets d'emballages rejetés annuellement, seulement 4000 tonnes sont récupérées soit 2% du gisement.
- Chaque année, 22000 tonnes de déchets d'activités de soins sont produits en Algérie.
- Le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement a programmé la réalisation de 1000 schémas directeurs de gestion des déchets solides urbains pour les différentes communes du pays. Déjà 640 schémas sont finalisés.
- Le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement a programmé la réalisation de 300 Centres d'enfouissement Technique et décharges contrôlées. Déjà 90 projets sont achevés ou en voie d'achèvement.
- Il existe en Algérie 317 incinérateurs opérationnels pour la destruction des déchets d'activités de soins.
- En 2008, il existe 873 récupérateurs agréés et répartis sur le territoire national. Ce

chiffre est en augmentation continue.

- En 2008, il existe 320 exportateurs de déchets ferreux et non ferreux répartis sur le territoire national. (Association des exportateurs de métaux ferreux).
- Chaque année, les algériens utilisent près de 300 millions de piles et accumulateurs, soit environ 12 unités par habitant. On estime que 70% de ces piles finissent dans la nature ou à la décharge avec tous les risques de contamination de l'environnement par le mercure, le cadmium, le plomb, le zinc ou le lithium.

L'application des prescriptions de la Loi 01-19, le MATET a créé l'Agence Nationale des Déchets (AND) par Décret exécutif N° 02-175 du 20/05/2002 puis promulgué le Décret exécutif N° 02-372 du 11/11/2002 relatif aux déchets d'emballages qui organise l'activité de récupération et fait obligation de cahier des charges aux collecteurs recycleurs et prévoit leur agrément afin de garantir le respect des normes environnementales. L'Article 3 de ce texte a donné naissance en 2004 au Décret exécutif n° 04-199 du 19/07/2004 fixant les modalités de création, d'organisation, de fonctionnement et de financement du système public de traitement et de valorisation des déchets d'emballages « Eco-Jem ». Ce système a pour objet « d'organiser la reprise et le traitement des déchets d'emballages, à travers des contrats de service pour la collecte, le tri et la valorisation des déchets ». L'agence nationale des déchets (AND) étant chargée de la mise en place du système public de reprise et de valorisation des déchets d'emballages « Eco-Jem », c'est elle qui passe les contrats de services.

Le système « Eco-Jem » est composé de réseaux spécifiques de récupération et de valorisation par catégorie de matériau (plastics, verre, métaux et papiers/cartons... etc.) qui peuvent couvrir une ou plusieurs wilaya. Les entreprises génératrices de déchets peuvent adhérer à ce système. Le système "Eco-Jem" s'autofinance grâce aux droits d'adhésion (des adhérents) et les contributions des adhérents qui sont fixées en fonction des quantités de matériaux et des catégories d'emballages commercialisées sur le marché algérien. Ce système est devenu un label national, et autorise ses adhérents à apposer le logo « Eco-Jem » sur tous leurs produits. Il incite alors au tri et recyclage des déchets, finance les filières pilotes de recyclage dans les communes, accompagne et soutient les emplois verts en liaison avec l'ANSEJ (Agence Nationale de Soutien à l'Emploi des Jeunes) et l'ADS (Agence du Développement Social), assiste et soutient les centres de collecte et de tri.

Tout producteur, conditionneur, distributeur ou importateur d'emballage peut adhérer au système par contrat à passer avec l'AND (déjà plusieurs grandes entreprises ont adhéré à

« Eco-Jem »).

Aussi, la commune peut être partenaire d'Eco-Jem, en favorisant la création de micro-entreprises de récupération (ANSEJ,...etc.) ce qui pourrait contribuer à diminuer les volumes de déchets à collecter (et à traiter), puisque la récupération se fera directement à partir des points de collecte [Boussaoui 11].

II.9.1. Les lois algériennes concernant les déchets :

- ❖ **Loi** N°90-08 portant code communal
- ❖ **Loi** N°01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets
- ❖ **Loi** N°03-10 du 19/07/2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- ❖ **Décret exécutif** N° 02-175 de la 20/05/2002 portant création de l'Agence Nationale des Déchets.
- ❖ **Décret exécutif** N° 02-372 du 11/11/2002 relatif aux déchets d'emballages.
- ❖ **Décret exécutif** N°04-199 du 19/07/2004 fixant les modalités de création, d'organisation, de fonctionnement et de financement du système public de traitement et de valorisation des déchets d'emballages « ECO-JEM ».
- ❖ **Décret exécutif** N°04-210 du 28/07/2004 définissant les modalités de détermination des caractéristiques techniques des emballages destinés à contenir directement des produits alimentaires ou des objets destinés à être manipulés par les enfants.
- ❖ **Décret exécutif** N°04-410 du 14/12/2004 fixant les règles générales d'aménagement et d'exploitation des installations de traitement des déchets et les conditions d'admission de ces déchets au niveau de ces installations.
- ❖ **Décret exécutif** N°07-205 du 30/06/2007 fixant les modalités et procédures d'élaboration, de publication et de révision du schéma communal de gestion des déchets ménagers et assimilés.
- ❖ **Arrêté interministériel** du 06/04/2004 fixant les caractéristiques techniques des sacs plastiques destinés à contenir directement des produits alimentaires.

II.10. DECHETS UTILISES COMME ADDITIONS OU GRANULATS DU BETON :

II.10.1. Laitiers :

II.10.1.1. Laitiers de haut fourneau :

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air» ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom de «laitier expansé».

Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulat pour le béton. La comparaison entre la résistance à la compression du béton constitué de granulats de laitier de haut fourneau et celle du béton constitué de gravier et de calcaire concassé indique que le béton de laitier est plus résistant [Ramachandran 81]. Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans inconvénient le sable. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications.

La quantité de laitier expansé produit est bien plus faible que celle de laitier refroidi à l'air. Le laitier expansé est utilisé pour la fabrication du béton léger ayant une masse volumique apparente comprise entre 800 et 950 kg/ m³.

Les blocs de béton de laitier expansé sont utilisés pour la construction de murs porteurs et de murs non porteurs. Le béton de laitier expansé a une excellente résistance au feu et une conductivité thermique d'environ 75% de celle des autres bétons légers.

Le laitier expansé réduit en boulettes a été mis au point au Canada. On prétend que ce procédé de fabrication pollue moins l'air que le procédé normal de fabrication.



Photo II. 1: Laitier de haut fourneau.

II.10.1.2. Laitiers d'acier :

Ce laitier est formé par l'élimination des impuretés contenues dans la fonte brute. Il est riche en phosphate ou en calcium et contient du silicate bicalcique métastable; il est donc utilisé uniquement comme matériau de remblai pour les routes. Normalement, ce laitier est stocké en piles pendant une période allant jusqu'à un an avant d'être utilisé [Saadani].

II.10.1.3. Autres laitiers métallurgiques :

Les applications possibles du laitier provenant de la fusion réductrice du cuivre, du zinc, du plomb, du nickel et de l'étain n'ont pas encore été explorées à fond. On a toutefois déjà étudié la possibilité d'utiliser les laitiers au zinc/plomb comme granulats pour le béton bitumineux. Dans le béton de ciment, ces laitiers produisent une réaction alcali-silice.

On a également proposé de les utiliser comme granules fins pour le béton [Boussaoui 11].

II.10.2. Sous-produits provenant des centrales thermiques:

La combustion du charbon aux fins de la production d'électricité donne plusieurs sous-produits. Dans les centrales électriques anciennes, les résidus de la combustion de la houille sont désignés sous le nom de «mâchefer». Dans les centrales modernes, on utilise du charbon broyé ou pulvérisé pour la production de vapeur. Les petites particules qui sont transportées par les gaz de combustion sont recueillies par précipitation électrostatique ou par un autre moyen quelconque. Ces particules sont appelées «cendres volantes». Certaines des particules de cendres forment des scories qui tombent au fond du four. Dans les fourneaux à température élevée, il se produit également des résidus fondus appelés laitier de charbon [Saadani].

II.10.2.1. Mâchefer:

Le mâchefer contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Il est utilisé principalement pour la fabrication de blocs de béton. Étant donné que le mâchefer contient des sulfates et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le béton armé. Ce matériau risque de devenir de plus en plus rare à mesure que les centrales électriques anciennes passent à la combustion de charbon pulvérisé [Boussaoui 11].



Photo II. 2: Mâchefer.

II.10.2.2. Scories de sole:

Ces résidus constituent environ 2.5% de la production totale de cendres. On prévoit que plus le charbon sera utilisé, plus on aura de cendres. La composition chimique des scories de combustion américaines est semblable à celle des cendres volantes, sauf que les scories ont une plus forte proportion d'alcalis et de sulfates. Les scories de charbon et le laitier de charbon peuvent être utilisés comme granulats légers pour la fabrication de blocs de béton [Ramachandran 81].

II.10.2.3. Cendres volantes:

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granules légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. Elles sont préférables à beaucoup d'autres granules légers étant

donné qu'elles donnent une combustion plus efficace du fait que le carbone contenu dans les cendres produit la quantité de chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des boulettes et pour amener les boulettes à la température de frittage.

À l'origine, les cendres volantes étaient mélangées avec de l'eau et transformées en boulettes soit dans un tambour ou un cône rotatif, soit par extrusion. L'addition d'une faible quantité d'alcalis permet d'obtenir des boulettes ayant une meilleure résistance aux chocs thermiques et mécaniques. Lorsque le frittage se fait dans des fours à grille mobile, la température atteint environ 1150 à 1200°C et par conséquent, les petites particules de cendres volantes se fusionnent et forment un aggloméré. Cet aggloméré est ensuite brisé en boulettes. Les bétons qui contiennent de tels granules ont une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 40MN/m² et une masse volumique d'environ 1100 à 1800 kg/m³. Puisque ces granulats ont une forme adéquate et une bonne résistance, ainsi qu'une absorption d'eau modérée, ils conviennent à la fabrication de blocs de béton léger [Ramachandran 81].



Photo II. 3: Cendres volantes.

II.10.3. Pouzzolanes naturelles :

Selon la norme de L'ASTMC618, la pouzzolane se définit comme étant un matériau siliceux ou un matériau siliceux et alumineux qui ne possède par lui même aucune valeur liante mais qui, nous forme de poudre très fines et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à des températures ordinaires pour former des composés possédant des propriétés liants [Mouli].

Les pouzzolanes peuvent améliorer le rendement du béton tant à l'état frais qu'à l'état durci. Parmi ces avantages mentionnons une plus grande ouvrabilité, une réduction de la chaleur d'hydratation et les risques de fissuration liée à la dilatation thermique ainsi qu'une meilleure étanchéité à l'eau et un ralentissement du taux de prise et durcissement un accroissement de la résistance finale ainsi qu'une meilleure résistance aux sulfates et à l'expansion alcali-granulat, l'utilisation de pouzzolanes dans le béton se révèle économique et elle permet de

réaliser des économies d'énergie.

D'après l'étude géologique l'Algérie possède une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique ce volcanisme passe de nature acide à un volcanisme basique ou les formations basaltiques prédominent, Cette pouzzolane est essentiellement formée de scories et de pierres ponce bien stratifiées, de couleur variant du rouge au noir, Mais l'utilisation jusqu'à présent reste au niveau de certaines cimenteries seulement, malgré les nombreuses études faites aux niveaux des universités Algérienne quant à l'utilisation de ces matériaux comme ajout aux bétons [Mouli].



Photo II. 4: Pouzzolanes naturelles.

II.10.4. Béton récupéré :

Le béton constitue presque 75%, en poids, de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie des rebuts de démolition soit du béton. Par ailleurs, les sinistres fournissent des millions de tonnes de débris de béton. L'épuisement des sources courantes de granulats, les lois plus strictes relatives à la protection de l'environnement et les problèmes posés par la destruction des déchets sont tous des facteurs qui favorisent l'usage du béton récupéré. Les débris de chaussées en béton sont déjà utilisés pour la construction de la couche de fondation de nouvelles chaussées.

La résistance à la compression et le module d'élasticité du béton renfermant des granules recyclés est inférieure à ceux du béton ne contenant que des granulats ordinaires. Les différences sont encore plus grandes à des rapports eau-ciment inférieurs. Le fait de remplacer les fines du béton recyclé par du sable n'améliore pas pour autant la résistance du béton. Le béton qui contient des fines provenant de béton récupéré doit avoir un rapport eau: ciment plus élevé étant donné qu'il contient une plus grande proportion de particules de ciment hydraté. L'addition de réducteurs d'eau et une teneur en ciment plus élevée augmentent la résistance du béton.

Le retrait au séchage du béton constitué de béton récupéré est supérieur de 10 à 30% à celui

du béton de référence. L'importance du retrait est fonction de la superficie totale; dans le cas des granulats recyclés, on s'attend à ce que la superficie soit plus élevée à cause de la présence de pâte de ciment.

La tenue au gel et au dégel du béton contenant des granulats de béton récupéré est semblable à celle d'une éprouvette de béton de référence contenant des granules ordinaires [Ramachandran 81].



Photo II. 5: Béton récupéré.

II.10.5. Déchets provenant de l'exploitation de mines et de carrières :

L'exploitation des mines et des carrières produit de grandes quantités de déchets. Les déchets de minerais ne sont pas encore très utilisés étant donné qu'ils proviennent d'endroits très éloignés des régions peuplées. Ils pourraient cependant être utilisés pour la fabrication de briques, et de blocs de béton autoclave ou à granules légers. Un des problèmes relatifs à l'usage de ces déchets découle de la diversité de leur composition [Saadani].

II.10.5.1. Marbre :

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris, pouvant présenter des veines, ou marbrures (veines et coloris sont dus à des inclusions d'oxydes métalliques, le plus souvent).



Photo II. 6: Marbre.

Des chercheurs comme [Hebhoub, Belachia, Houari 2010] proposaient la substitution des

sables (naturel ,carrière) avec des sables issus de marbre. L'étude consiste à analyser les propriétés mécaniques à l'état frais et durci des bétons avec un taux de substitution variable (25%,50% ,75% et 100%) et de comparer les résultats avec un béton témoin à base de granulats ordinaires. Les chercheurs déduits :

- La meilleure ouvrabilité est donnée par le béton de granulat ordinaire. Ceci peut être expliqué par la présence d'éléments fins du sable.
- Les mélanges à base de granulats substitués partiellement donnent les meilleures performances en compression que ceux substitués totalement ou de référence.
- La valeur maximale de la résistance en traction à 28 jours est obtenue avec le béton de 50% de taux de substitution.
- Les résultats obtenus montrent que les déchets de marbre peuvent être techniquement utilisés comme substituant dans les bétons hydrauliques [Boussaoui, Houari 11].

II.10.6. Déchets divers :

II.10.6.1. Déchets de mines de charbon :

Dans les opérations d'extraction du charbon, environ la moitié du matériau est rejetée sous forme de déchets. Ceux-ci servent principalement de matériau de remblai pour les routes et peuvent aussi être utilisés comme granulats pour le béton léger. La température de chauffe de ces déchets susceptible de produire le gonflement ou la dilatation doit être contrôlée pour que les gaz s'échappant de l'argile ou de tout autre matériau soient bien emprisonnés dans les granules ramollies. Tous les déchets ne vont pas nécessairement gonfler. Il est donc important de faire des essais préliminaires pour évaluer la capacité de gonflement des types particuliers de déchets [Ramachandran 81].

II.10.6.2. Verre de récupération :

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

Le verre de récupération peut aussi servir à la fabrication de granulats légers. La production

des granules légers expansés d'une masse volumique de 528 kg/m³ par pelletisation d'un mélange de verre de récupération broyé, d'argile et de silicate de sodium chauffé à une température de 850°C. Le béton ainsi obtenu présente une résistance à la compression d'environ 17 MPa après une période de cure à la vapeur de 28 jours [Ramachandran 81].

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



Photo II. 7: Verre de récupération.

II.10.6.3. Pneus usages :

L'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la microfissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait malgré une amplitude plus élevée de ses variations dimensionnelles de retrait. Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité [Bonnet 04].

II.10.6.4. Résidus d'incinérateurs :

L'incinération des déchets domestiques et industriels entraîne la production de grandes quantités de résidus solides.

Ces résidus comportent toutefois certaines matières délétères, ce qui compromet leur utilisation en tant que composants du béton. Ainsi, l'aluminium entraîne la dilatation par suite de l'évolution de l'hydrogène, les métaux ferreux font tacher le béton et les sels de plomb et de zinc solubles nuisent à la prise du ciment. La présence de verre entraîne aussi la dilatation des granulats alcalins [Ramachandran 81].

II.10.6.5. Boues rouges :

Les boues rouges proviennent de l'extraction de l'alumine de la bauxite. Elles sont de consistance assez plastique pour être formées en boules. Chauffées à des températures de 1260 à 1310°C, elles sont transformées en granulats denses et résistants pouvant entrer dans la composition de bétons de résistances convenables.

La production de granules légers synthétiques à partir de boues rouges peut poser certaines difficultés parce que les boues rouges fondent seulement à des températures élevées et se ramollissent dans une gamme de températures assez restreinte. De plus, les gaz émis pendant le ramollissement ne sont pas toujours suffisants pour produire le gonflement. Dans certains cas, des granulats légers ont été fabriqués avec des additifs tels les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et la pierre ponce [Saadani, Houari].



Photo II. 8: Boues rouges.

II.10.6.6. Argile cuite :

Selon la méthode utilisée pour la fabrication et la manipulation des briques, il y a toujours un certain pourcentage de briques cassées, trop cuites ou mal cuites. Les briques concassées et bien cuites conviennent bien à la fabrication des blocs de béton. Le béton contenant de tels granulats est plus perméable et si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton. Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel [Ramachandran 81].



Photo II. 9: Argile cuite.

II.10.6.7. Sciure de bois :

Le béton à base de sciure de bois est très peu utilisé à cause de sa faible résistance. Le béton contenant beaucoup de sciure de bois est inflammable. La sciure provenant du chêne rouge, du sapin de Douglas, du peuplier du Canada, de l'érable, du bouleau ou du cèdre rouge donne des bétons à faible résistance alors que la sciure d'épinette ou de pin rouge donne des bétons dont les propriétés sont acceptables [Ramachandran 81].



Photo II. 10: Sciure de bois.

II.10.6.8. Le lin de textile :

Le développement industriel et économique de ces dernières décennies a entraîné une forte production de déchets agricoles. Parmi ces déchets, on distingue ceux issus de l'industrie textile de lin fibre, notamment les poussières extraites par aspiration lors de teillage. Ces déchets, peu ou pas valorisés, constituent une source potentielle de problèmes environnementaux majeurs. L'exploitation des déchets agricoles dans les matériaux de construction est une alternative très intéressante qui présente un double objectif. Elle permet d'une part, de répondre aux besoins en matériaux nouveaux, présentant des propriétés particulières ou améliorées par rapport aux matériaux classiques. D'autre part, de pallier les contraintes économiques et environnementales par le réemploi et le recyclage de ces déchets [Boussaoui, Houari 11].

II.10.6.9. La céramique :

Un matériau céramique est solide à température ambiante et n'est ni métallique, ni organique. Les objets en céramique sont réalisés par solidification à haute température d'une pâte humide plastique (verres minéraux), ou frittage (agglutination par chauffage) d'une poudre sèche préalablement comprimée, sans passer par une phase liquide (céramiques polycristallines) ; par assimilation, on désigne sous le terme « céramique » les objets ainsi fabriqués [Boussaoui, Houari 11].



Photo II. 11: Céramique.

II.10.6.10. Les carrelages :

Le carrelage est un revêtement de sol et de murs formé de carreaux de céramique, terre cuite ou ciment, juxtaposés et collés. Il est couramment utilisé pour la finition et la décoration des sols et des murs pour les habitations et autres locaux, aussi bien à l'intérieur qu'en extérieur. Le terme désigne à l'origine l'action de poser des carreaux, puis, par métonymie, le résultat de cette action [Boussaoui, Houari 11].



Photo II. 12: Carrelage.

II.10.6.11. Le plastique et le Polyester :

Une matière plastique ou en langage courant un plastique est un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de conduire à un semi-produit ou à un objet.

Un polyester est un polymère dont les motifs de répétition de la chaîne principale contiennent la fonction ester.



Photo II. 13: Polyester

Il y a beaucoup de recherche afin d'améliorer le comportement de béton en traction et la solution c'est l'addition des fibre de polyester et de plastique [B. Melbouci 2009] qui a travaillé sur cette méthode pour assurer une meilleure élasticité du matériau, L'incorporation de granulats plastiques et de fibres courtes de polyester dans les échantillons de granulats de béton a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La dilatance dans le cas des échantillons composites est obtenue seulement pour des Contraintes normales inférieures à 300 kPa. Au delà de cette contrainte c'est la Contractante qui prédomine.
- Le phénomène d'écrasement des grains est significatif pour les contraintes assez levées, particulièrement pour la classe granulaire 5/8.
- Les grains recyclés de béton puis renforcés par les fibres et par les granulats plastiques présentent une résistance acceptable par rapport aux grains naturels. On peut donc confirmer leur utilisation dans le domaine du génie civil [Boussaoui, Houari 11].

II.10.6.12. La brique :

La brique est un parallélépipède rectangle, de terre argileuse crue et séchée au soleil ou cuite au four, utilisé comme matériau de construction. L'argile est souvent mêlée de sable [Boussaoui, Houari 11].



Photo II. 14: Brique.

II.11. CONCLUSION :

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités. Le déchet est par définition «matière» et à ce titre la biophysicochimie, la mécanique et la thermique sont au premier chef sollicitées pour le traiter.

Cette matière n'est pas banale. Elle a une vie, elle a souvent muté au cours de son existence pour se retrouver dans les poubelles et les décharges. Avec une telle diversité moléculaire, qu'il est nécessaire de trouver les moyens pour en extraire les fractions valorisables ou pour atténuer les capacités de nuisances [Saadani, Houari].

Plusieurs types de déchets et de sous-produits peuvent être utilisés comme granulats, additions. Le laitier de haut fourneau et les cendres volantes sont déjà exploités commercialement.

L'utilisation des divers déchets est fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs propriétés. De nombreux types de déchets ne pourront peut-être pas être utilisés à une grande échelle étant donné la diversité de leurs caractéristiques physiques et chimiques.

Dans notre étude on s'intéresse aux fines de déchets de marbre et pour l'utiliser en tant que addition pour la spécificité du béton autoplaçant.

3. CARACTERISATION DES MATERIAUX DE BASE ET METHODOLOGIE D'ESSAIS

III.1. INTRODUCTION :

L'objet de ce chapitre est la présentation des matériaux utilisés pour la confection des différents mélanges des BAP étudiés, d'essais réalisés et la méthodologie adoptée lors du travail de recherche expérimentale. Les conditions de fabrication et de conservation des corps d'épreuves y sont aussi signalées.

La caractérisation des matériaux de construction tels que les additions (fillers calcaires / déchet de marbre), les granulats, la matrice cimentaire nécessite la connaissance de la nature de ses composants. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration de certaines interprétations ne pourraient possibles que si les différents constituants sont bien caractérisés, c'est l'objet de ce chapitre.

En effet, notre recherche a pour objet l'étude de la possibilité d'utiliser les fines des déchets de marbre sous forme d'ajouts minéraux (addition) pour BAP à base de matériaux locaux, et d'analyser les propriétés mécaniques et physiques à l'état frais et durci des BAP obtenus en les comparant à celles d'un BAP à base de fillers calcaires comme addition (de référence).

III.2. MATERIAUX DE BASE UTILISES :

Les normes NFP 18-101 D NF P18-541 définissent les caractéristiques des granulats pouvant être utilisés pour la confection des bétons.

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.

III.2.1. Les Granulats :

III.2.1.1. Caractéristiques Géométriques :

a. Analyse granulométrique :

Les granulats sont d'origine naturelle concassés calcaires proviennent de la carrière de Ain Smara. De cette carrière nous avons pu commander et obtenir trois classes granulaires délivrées sous les appellations commerciales suivantes : Sable 0/3, Gravier 3/8, 8/15.

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 une

série de 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.

Les résultats de l'essai effectués pour les granulats utilisés va être présenté dans le tableau III. 1 .

b. Module de finesse :

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 et il est souhaitable d'avoir des valeurs comprises entre 2,2 et 2,8.

c. Mesure de coefficient d'aplatissement des granulats « NF P 18-561 »:

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats. La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques principales : la longueur L, l'épaisseur E, la grosseur G.

Le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondérale des éléments qui vérifient la relation : $G / E > 1,58$

Les analyses granulométriques pour les granulats utilisés ont été portées sur le tableau III. 1

Tamis		Désignation		
		0/3	3/8	8/15
Analyse granulométrique	0,08	15		
	0,16	21		
	0,315	31		
	0,63	43		
	1,25	60	00	
	2,5	82	01	
	5	100	17	00
	6,3		67	01
	8		100	03
	10			13
	12,5			48
	16			100
	20			
	25			
Coefficient d'aplatissement		/	15%	11%

Tableau III. 1 : Les résultats de l'analyse granulométrique, module de finesse et le coefficient d'aplatissement.

III.2.1.2. Caractéristiques Physiques :

a. Mesure de la propreté de granulat :

La propreté des granulats peut être mesurée par deux méthodes :

En utilisant les essais d'équivalents de sable « NF P 18-598 » qui permettent, selon un processus normalisé, de quantifier la notion de propreté d'un sable.

Par l'essai au bleu de méthylène « NF P 18-592 » qui permet d'évaluer le degré d'activité des particules fines argileuses qui sont responsables, dans une large mesure de désordres et

de non qualité dans les bétons.

b. Détermination de la masse volumique absolue et apparente des granulats « NF P 18-554 » « NF P 18-555 » :

Leur détermination permet de classer les granulats selon leur densité et présente aussi une grande utilité dans les études relatives à la composition et la formulation des bétons. Les résultats obtenus sont conformes aux normes. Le tableau III. 2 regroupe les résultats obtenus.

c. Mesure de coefficient d'absorption des granulats « NF P 18-555 » :

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.

Les résultats obtenus de nos essais ; conformes aux normes ; sont montrés dans le tableau III. 2

Propriétés mesurées	Désignation		
	0/3	3/8	8/15
Masse volumique absolue	2,60	2,56	2,62
Masse volumique apparentes	1,46	1,33	1,37
Equivalent de sable (%)	69	/	/
Valeur au bleu de méthylène	0,38	/	/
Coefficient d'absorption	0,14	2,28	1,77

Tableau III. 2: Caractéristiques physiques des granulats utilisés.

III.2.1.3. Caractéristiques Mécaniques :

Lors de fabrication de béton, le malaxage est la source de frottement intense entre grains. Si ceux-ci ne sont pas assez résistants, ils peuvent se casser en produisant des sables ou des éléments fins. Les essais effectués sont :

- Résistance au choc ; Los Angeles « NF P 18-573 » : l'essai consiste à mesurer la masse d'éléments inférieurs à 1.6mm. produits par la fragmentation du granulat testé et qui l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations.

- Résistance à l'usure ; essai Micro Deval «NF P 18-572 » : l'essai consiste à mesurer, dans des conditions normalisées, l'usure des granulats produite par frottement mutuels, en présence d'eau et d'une charge abrasive, dans un cylindre en rotation.

Le tableau suivant regroupe les résultats obtenus. Ces résultats sont conformes aux normes.

Propriétés mesurées	Granulats calcaires concassés		
	0/3	3/8	8/15
Essai Los Angles	20	28	23
Essai Micro Deval	16	25	17

Tableau III. 3: Caractéristiques mécaniques des granulats utilisés.

III.2.1.4. Composition Chimique Des Granulats :

Les essais chimiques effectués sur les différents granulats ont été réalisés au niveau du laboratoire des travaux publics de l'est « LTP Est ».

Les résultats obtenus conformes aux normes sont représentés dans le tableau suivant :

Propriétés mesurées (%)	Insoluble	Sulfates	Carbonates	Chlorure
Granulats calcaires concassés	1,9	Traces	89	0,29

Tableau III. 4: Caractéristiques chimiques des granulats utilisés.

III.2.2. Les Additions :

III.2.2.1. Filler Calcaire :

Les additions que nous avons utilisées dans notre recherche sont des éléments qui représentent des dimensions inférieurs à 80µm. des fillers calcaires, de provenance ENG d'El Khroub, noté UF20 ; dont les principales caractéristiques que nous présentons proviennent des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'ENG.

Composant	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Perte au feu	Al ₂ O ₃	CaCO ₃	SO ₃	PH
Teneur en %	0,06	0,02	0,01	43,8	0,09	99	0,01	9

Tableau III. 5: Composition chimique du filler calcaire.

Fillers	Poids spécifique	Densité apparente	Blancheur	Prise d'huile	Humidité
UF 20	2,7 Kg/l	1,23	92%	18%	0,1%

Tableau III. 6: Caractéristiques physiques des fillers calcaire.

En ce qui concerne les morphologiques du filler calcaire utilisé, le diamètre moyen des grains des fillers « diamètre pour lequel 74% des fillers sont inférieur » est de l'ordre 19 μ m et 26% un diamètre inférieur à 10 μ .



Photo III. 1: Le filler calcaire utilisé.

III.2.2.2. Déchet de marbre:

III.2.2.2.1. Définition:

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris, pouvant présenter des veines, ou marbrures (veines et coloris sont dus à des inclusions d'oxydes métalliques, le plus souvent).

Certains types de marbres portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte. Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangée à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de 2,7.

La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le blanc, il existe des variétés, beiges, bleues, roses, grises, jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires.

La production marbrière en France est faible et on constate une régression par rapport à des pays comme l'Italie, le Portugal et la Grande-Bretagne.

Les produits marbrières algérienne sont extraits et transformés conformément aux normes européennes : Italienne et françaises en particuliers. Les procédés utilisés en Algérie pour le travail du marbre sont ceux utilisés dans le monde :

- Sciage des masses au fil hélicoïdal, au fil diamanté et la haveuse pour l'abatage et le tranchage des masses brutes de marbres naturels en carrières.
- Transformation en produits finis au moyen de lames et disques, débitages secondaires et ponçage avec des pierres ponces.

Le marbre en Algérie est exploité par l'entreprise nationale du marbre «ENAMARBRE» par dix unités de production dans cinq wilayas.

Durant l'année 2007, la production de marbre en blocs, par les filiales de l'Entreprise ENAMARBRE, est de 10 620 m³, en baisse de 33,96% par rapport à la production enregistrée en 2006 qui était de 16 082 m³.

Les dérivés de marbre produits sont de l'ordre de 169 954 tonnes pour l'année 2007, en hausse de 15,09% par rapport à l'année 2006 qui était de 147 674 tonnes.

La production pour l'année 2007 est de :

-Marbre/ Blocs :

Skikda 10 399 m³, Oran 221 m³

-Marbre/ Dérivés :

Chlef 17 222 t, Tlemcen 45 581t, Tizi Ouzou 12 445t, Skikda 82 843t, Oran 11 863t.

III.2.2.2.2. Le marbre de la carrière de FIL-FILA:

➤ Provenance :

Le marbre est une roche métamorphique compacte provient de l'exploitation de l'entreprise nationale de marbre «ENAMARBRE» de la carrière de Fil-Fila qui se trouve à 25 Km à l'est de la ville de Skikda.

La carrière de Fil-Fila est divisée en deux carrières :

- Carrière à blocs
- Carrière dérivée

➤ **Carrière à blocs :**

a. Le principe de fabrication :

L'exploitation se fait par sciage des masses par fils diamantés qui sont débités pour obtenir des blocs bruts naturels de marbre.

Les blocs bruts sont traités pour avoir une forme régulière (enlèvement de tranche extérieure) et transformer à l'usine en dalle et carreaux.

Le marbre de la carrière à blocs de Fil-Fila est divisé selon leurs caractéristiques en trois types

-Marbre blanc

-Marbre gris

-Marbre réséda vert

Leurs caractéristiques pétrographiques-minéralogiques ; physico-mécaniques et chimiques sont présentées dans le tableau III. 7.

b. Recyclage des déchets :

Les déchets de carrières à blocs sont les blocs, chutes et moellons ayant différentes formes géométriques, le taux de déchets est de 56% de la production pour l'année 2007 ; le stock jusqu'à la fin 2007 est de l'ordre de 5 823 m³.

Actuellement le recyclage des déchets est limité sur une partie de blocs de marbre de la carrière à blocs, par une entreprise privée.

Le produit de recyclage de déchets est un sous produit de marbre «granulats et poudre». Les déchets de l'usine de transformation sont exploités partiellement en revêtement de sol extérieur pour les chutes de carreaux et en construction de carreaux de granito, en peinture pour la poudre de marbre.

c. Granulats de rebuts de masse et de blocs de marbre :

Obtenu par concassage et broyage des blocs et de chutes de blocs. Les granulats utilisés comme matière première pour la fabrication du carrelage et revêtement des surfaces. Poudre de marbre de dimensions standards en mm : 30 à 02 microns.

➤ **Carrière dérivée :**

a. Le principe de fabrication :

L'exploitation de la carrière dérivée de Fil Fila se fait par abattage à l'exploitation, des moellons de dimension variant de (80-100cm), qui sont concassés, broyés pour obtenir des granulats dont la granulométrie varie de 0-18mm.

Poudre de marbre : obtenue après broyage et pulvérisation du marbre de dimension variant de 30 à 02 microns.

Les dérivés de marbre sont deux types :

-Dérivés de marbre blanc.

-Dérivés de marbre gris (à l'arrêt)

b. Recyclage des déchets :

Le déchet de la carrière dérivée est un tout venant (marbre de différentes classes granulaires), le taux de déchets est de 19% de la production pour l'année 2007 ; le stock jusqu'à la fin 2007 est de l'ordre de 15 740 tonnes.

Le tout venant de la carrière dérivée de Fil-Fila est destiné à la construction des routes.



Photo III. 2: Le déchet de marbre utilisé.

Caractéristiques	Type de marbre		
	Blanc	Gris	Réséda vert
Caractéristiques pétrographiques-minérologiques			
Nature pétrographique	Calcaire microcristalin	Calcaire microcristalin	Calcaire Microcristalin
Couleur	Blanche	Gris sombre	Gris avec veinules
Aspect	Homogène	Non Homogène	Non Homogène
Texture	Massive	Massive	-
Structure	Microcristalin	Microcristalin	-
Composition minéralogique			
Calcite	100%	96%	94%
Quartz	-	3%	3%
Oxyde de fer	-	0,1%	-
Caractéristiques physico-mécaniques			
Masse volumique en g/cm ³	2,736	2,746	2,752
Compacité en %	98,03	99,70	98,70
Porosité en %	1,96	0,30	1,30
Coefficient d'absorption d'eau en %	0,39	0,11	0,16
Coefficient de saturation en %	0,87	0,50	0,77
Résistance à la compression à l'état sec en kg/cm ²	961	1378	949
Résistance à la compression après refroidissement en kg/cm ²	966	1026	1047
Résistance à l'usure en g/cm ²	1,82	0,719	0,996
Résistance au choc en kg/cm ²	40	56	83,50
Caractéristiques chimiques			
Caco ₃	99,05	97,73	97,22
Mgo	1,03	0,99	3,05
Cao	54,86	54	51,05
Fe ₂ O ₃	0,04	0,22	0,04
Al ₂ O ₃	0,08	0,56	0,08
SiO ₂	0,15	0,9	0,15
P.C	44,26	43,65	44,26

Tableau III. 7: Caractéristiques pétrographiques-minérologiques; physico-mécaniques et Chimiques de marbre de la carrière de FIL-FILA.

III.2.3. Ciment :

Les ciments utilisés sont de type CEM II/A 42,5 provenant de l'usine d'EL-Hamma région de Constantine.

Les différentes caractéristiques que ce soit chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'usine même. Les différentes caractéristiques sont présentées dans les tableaux suivants.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Chlorures	CaO libre	Résidus insolubles	P.A.F
27,83	6,21	3,12	57,22	0,94	2,02	/	/	0,00	0,88	2,28	2,41

Tableau III.8: Composition chimique du clinker.

Eléments	Abréviation	Teneur (%)
Silicate tri calcique	C3 S	56,60
Silicate bi calcique	C2 S	22,98
Aluminate tricalcique	C3 A	9,87
Alummino - ferrite tetracalcique	C4 AF	8,25

Tableau III. 9: Composition minéralogique du clinker.

Temps de prise		Expansion Le Chatelier		Surface spécifique (BLAINE)	Consistance normale
début	Fin	à chaud	à froid		
2h 50min	4h 06min	2,9	1,65	3891	26,91

Tableau III. 10: Propriétés physiques du ciment.

Essais	Age		
	2jours	7jours	28jours
Compression	143,2	266,4	433,1
Flexion	35,7	58,3	77,9

Tableau III. 11: Résistances mécaniques du ciment (bars).



Photo III. 3: Le ciment utilisé.

III.2.4. L'adjuvant (Super Plastifiant) «EN934-2» :

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égales à 5% du poids de ciment permet d'améliorer certaines de ses propriétés,

Dans notre étude on a utilisé le Super plastifiant MEDAPLAST SP 40 de Granitex: (Haut réducteur d'eau / Conforme à la norme EN 934-2), permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

Le MEDAPLAST SP 40 est introduit dans l'eau de gâchage, Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite. Il se caractérise par :

Forme	Couleur	PH	Densité	Teneur en chlore
Liquide	Marron	8,2	1,20 ± 0,01	< 1g/l

Tableau III. 12: Les caractéristiques de SP 40.

III.2.5. Eau De Gâchage :

L'eau utilisée dans notre travail est l'eau de robinet, provenant de la source Fesguia qui alimente notre laboratoire, laboratoire « Matériaux et Durabilité des Constructions » de l'Université Mentouri Constantine.

Nous avons soumis un échantillon de cette eau à une analyse chimique dont les résultats recueillis sont présentés au tableau III. 13.

Les résultats obtenus répondent aux prescriptions de la norme NF P 18-303 relative à la concentration en matières en suspension et sels dissous.

Concentration en matières et sel dissout dans l'eau (mg/l)	
Echantillons	Concentrations
Matière en suspension	Traces
Sels dissous	1470
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	413,56
Chlorures (Cl ⁻)	298,2
PH	7,9
Calcium (Ca ⁺²)	36
Magnesium (Mg ⁺²)	60
bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	27
Carbonates	3,5
Temperature (°C)	19

Tableau III. 13: Les résultats de l'analyse chimique effectuée sur l'eau utilisée

III.3. PROGRAMME EXPERIMENTAL:

L'organigramme suivant de la figure III. 1 rassemble les principales étapes de l'étude expérimentale

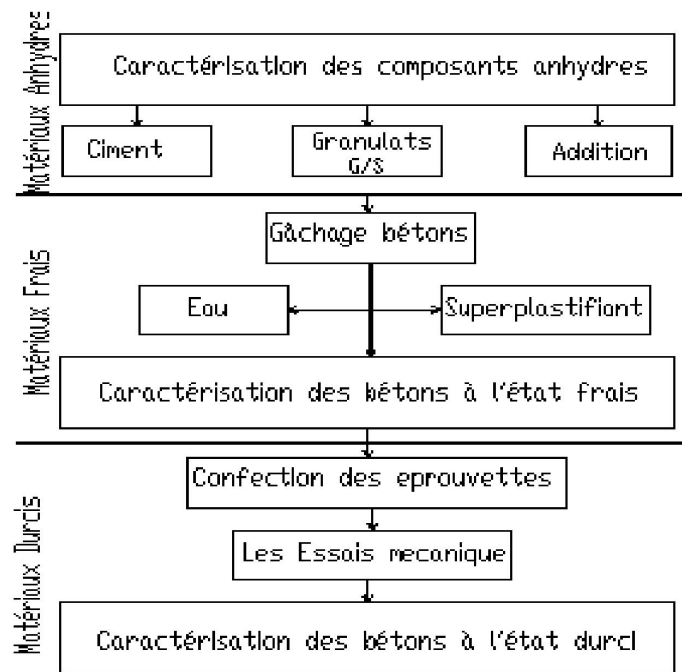


Figure III. 1: Organigramme des expériences réalisées.
Principales étapes de l'étude expérimentale.

Les bétons soumis aux essais dans la présente étude sont des bétons à base de matériaux locaux. Nous avons confectionné deux types de BAP : un béton autoplaçant à base de fillers calcaires (BAP FC) et un béton autoplaçant à base de fines des déchets de marbre (BAP DM). Ces bétons sont donc formulés avec les mêmes compositions et ne diffèrent que par la nature des ajouts.

La conception de tous les bétons (BAP FC, BAP DM) et tous les essais ont été réalisés au sein du laboratoire « Matériau et Durabilité des Constructions ». Tous les essais normalisés ont été effectués dans le cadre des normes AFNOR (et leurs équivalentes de Normes Algériennes NA).

Les bétons autoplaçants confectionnés doivent répondre en premier lieu aux exigences de l'AFGC [AFGC] et au Guide Européen pour les BAP [SG-SCC 02].

Pour notre recherche, les compositions de béton retenues ont été étudiées et optimisées selon l'approche (méthode Japonaise) par les membres de notre équipe de recherche chargée de la formulation et la conception des bétons, dans le cadre du projet de recherche CNEPRU, sous la direction du Pr. Houari.

Pour la confection des BAP en utilisant une gamme de constituants disponibles et très utilisés localement pour confectionner un béton autoplaçant. Les différents constituants utilisés sont:

- Ciment du type CEM II/42.5 de Hamma bouziane.
- Des fillers calcaires UF20 de la carrière ENG de Khroub.
- Des déchets de marbre de la carrière de FIL-FILA.
- Des granulats (sable et gravier) de la carrière de Ain Smara.
- Un superplastifiant Medaplast SP40 de Granitex.
- L'eau du robinet du laboratoire de recherche.

Les compositions des bétons testés sont basées sur celles des bétons réalisés pour les besoins du projet de recherche CNEPRU. Dans ce projet deux types de béton ont été testés.

Il s'agit d'un béton autoplaçant de référence noté BAP FC à base de fillers calcaires et un béton autoplaçant noté BAP DM à base des fines des déchets de marbre.

Le tableau III. 14 récapitule les différentes compositions utilisées dans notre étude.

Différente compositions utilisées dans la recherche		
N°d'ordre	Notations	Type de BAP
1	BAP FC	Béton autoplaçant(fillers calcaires)de référence avec $F/F+C=0.10$
2	BAP DM	Béton autoplaçant(fines déchets de marbre) avec $F/F+C=0.10$

Tableau III. 14: Différents compositions utilisées dans la recherche.

De nombreuses mesures ont été effectuées pour la caractérisation de BAP à l'état frais (air occlus, densité, l'étalement, écoulement), le tableau ci dessus présentes ces mesures :

Les mélanges	Mesures effectuées	N ^{bre} de mesures par gâchée
BAP FC	- Densité	3
BAP DM	- l'étalement	
	- air occlus - écoulement	

Tableau III. 15: Les différentes mesures effectuées pour la caractérisation de BAP.

A l'état durci, une caractérisation classique des mélanges (résistances mécaniques : à la compression, traction/flexion) a été réalisée sur des éprouvettes respectivement cylindriques de 10x20 cm et prismatiques de dimensions 7x7x28 cm sous des conditions de conservation de T=20°C, HR=55 ±5% jusqu'à l'âge d'écrasement de 3-7-28 jours et 90 jours. Les informations des différents essais sont présentées dans le tableau III. 16:

Désignation	BAP FC	BAP DM
Nombre d'éprouvettes	3	3
Conservation	20 ±2°C, HR=55±5%	20 ±2°C, HR=55±5%
Age d'écrasement	3-7-28-90 jours	3-7-28-90 jours
Corps d'éprouve	10x20cm 7x7x28cm	10x20cm 7x7x28cm
Type d'essai	Compression Traction/flexion	Compression Traction/flexion

Tableau III. 16: Caractérisation classique des mélanges.

III.3.1. Formulation de béton :

Formuler un béton, c'est de trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants, le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, c'est-à-dire l'affaissement au cône d'Abrams. Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées, comme, par exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix de revient.

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite

Dreux-Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sables / gravillons sur une courbe de référence. La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais ; il faut réaliser, en plus de l'essai au cône, l'essai à la boîte en L et l'essai de stabilité au tamis. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation [Benkechkache 08].

La méthode utilisée pour formulation des BAP est la méthode japonaise à cause de sa simplicité et elle ne nécessite pas des logiciels qui ne sont pas disponibles.

III.3.1.1. Principe et application Approche japonaise :

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats [Okamura 99.00]. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants.

a. Dosage des gravillons :

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m^3 de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides (figure III. 2). Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

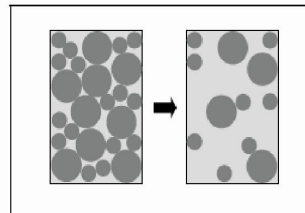


Figure III. 2: Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité [Benkechkache 08].

b. Dosage du sable :

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

c. Dosage du liant :

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

d. Dosage de l'eau et du superplastifiant :

Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir. Les auteurs définissent l'étalement relatif D par l'équation (1),

$$D = \frac{d^2 - d_0^2}{d^2} \quad (1)$$

Où d est le diamètre de la galette et d₀ la base du cône. Ils définissent également l'écoulement relatif T par l'équation (2).

$$T = \frac{10}{te} \quad (2)$$

Où te est le temps d'écoulement à l'entonnoir.

L'étalement normalisé D optimal est égal à 5 et le temps d'écoulement relatif T optimal est égal à 1. Selon les auteurs, ce couple est optimal dans le sens où il donne un béton fluide avec un risque de ségrégation minimale.

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

La composition des bétons retenues a été étudiée et optimisée selon l'approche (méthode) Japonaise par les membres de notre équipe de recherche chargée de la formulation. Par ce que c'est la méthode la plus simple et la plus adaptable aux bétons à base de matériaux locaux.

Le tableau III. 17 présente les différentes formulations des bétons que nous avons

confectionnées lors de notre recherche.

Compositions (kg/m ³)	Désignation des bétons locaux	
	BAP FC	BAP DM
G/S	0,78	0,78
Ciment CPJ 42.5 (kg/m ³)	400	400
Fillers calcaires UF 20 (kg/m ³)	48,8	0
Déchets de marbre	0	48,8
Sable 0/3 (kg/m ³)	961	961
Gravillon 3/8 (kg/m ³)	455,8	455,8
Gravillon 8/15 (kg/m ³)	297,2	297,2
Super plastifiant SP 40	10,5	11,32
Eau total	200	204
E/C+F ou E/L	0,45	0,455
F/F+C	0,10	0,10

Tableau III. 17: Composition en mètre cube des mélanges.

III.3.2. Confection du mélange :

III.3.2.1. Malaxage :

Le béton a été fabriqué dans un malaxeur à axe vertical et à mouvement circulaire de capacité 180 litres, 380 V, 50 Hz.



Photo III. 4: Malaxageur utilisé.

La séquence de malaxage était la suivante:

- Pré mouillage du malaxeur pour limiter une absorption supplémentaire de l'eau de gâchage par les parois du malaxeur.
- Introduction des constituants solides en commençant par les graviers, le sable, puis les fillers calcaires/déchets du marbre et pour finir le ciment.
- Malaxage puis introduction de l'eau et des adjuvants conformément à la procédure indiquée sur la figure.

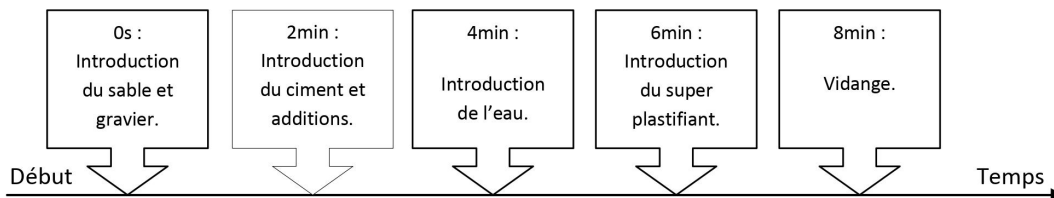


Figure III. 3: Temps de malaxage

III.3.3. Caractérisation Des Mélanges :

Nous présentons, les appareils et les méthodes utilisées dans le cadre de ce travail pour caractériser le béton à l'état frais et durci.

III.3.3.1 Caractérisation a l'état frais :

Avant d'accepter une composition comme étant celle d'un BAP, il faut s'assurer que les propriétés du béton à l'état frais possèdent certains critères établis selon les recommandations. Différents essais spécifiques permettent de caractériser les BAP à l'état frais. On présentera ceux qui ont été utilisés dans cette étude : Essai d'étalement ou slump flow, essai de la boîte en L, essai d'entonnoir (V-Funnel), essai de stabilité au tamis, essai de l'air occlus, la densité.

a. Essai d'étalement « Slump Flow »:

L'étalement est mesuré au cône d'Abrams selon la norme NF P 18-451 (NA 431). Nous avons, bien évidemment, caractérisé l'ouvrabilité des bétons étudiés à l'aide du cône d'Abrams, qui reste l'outil de contrôle le plus utilisé sur chantier. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, l'ouvrabilité des bétons autoplaçants est caractérisée par la moyenne de deux diamètres perpendiculaires de la galette obtenue en fin d'essai (après une minute). Nous avons également mesuré le temps T_{50} nécessaire, à partir du soulèvement du cône, pour que la galette ait un diamètre de 500 mm.

Il faut préciser quelques points sur le déroulement des essais:

- comme la majorité des bétons étudiés dans le cadre de ce travail sont fluides ou autoplaçants, nous avons fait les essais sur une plaque lisse de largeur égale à 120 cm. La plaque était systématiquement humectée à l'aide d'une éponge en chassant tout excès d'eau.
- pour le programme consacré aux bétons autoplaçants, le remplissage du cône s'effectue en une seule fois et sans piquage. Ceci est justifié par le fait qu'ils sont destinés à être mis en place sous leur propre poids, et pour éviter de générer de la ségrégation.



Photo III. 5: Le cône d'Abrams utilisé.

a.1. Le temps d'étalement T_{50} :

Lorsque l'on effectue un essai d'étalement, on peut mesurer le temps T_{50} , à partir du moment où on soulève le cône, pour que la galette de béton atteigne un diamètre de 500 mm. Pour un même étalement final, plus le béton sera visqueux, plus il mettra de temps à s'affaisser et plus la valeur T_{50} sera élevée. On s'attend donc à ce que cette valeur soit reliée à la viscosité de béton.

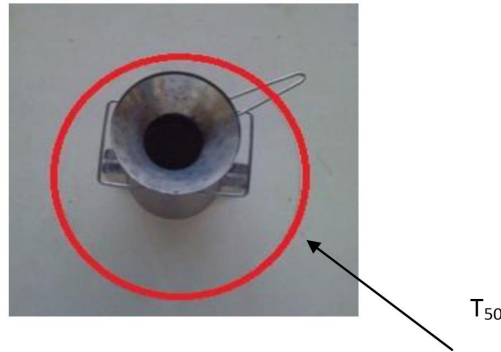


Photo III. 6: Mesure du T_{50} .

b. Essai de la boîte en L:

Il est important de noter que l'essai que nous proposons permet de caractériser seulement la résistance à la ségrégation verticale (statique). Le risque de ségrégation horizontale, selon notre expérience, est bien apprécié par l'essai à la boîte en L.

La procédure d'essai dans la boîte en L est la suivante: la partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton. Après arasement, On laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage (formé de 3 barres d'armature 14 mm distantes de 50 mm).



Photo III. 7: La boîte en L utilisée.

On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture de la trappe jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale (Il devrait être compris entre 3 et 7 secondes) et on mesure la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton (H1 et H2), afin de qualifier sa capacité d'auto nivellement (Le rapport H2 /H1 devrait être supérieur à 0,80). L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini.

c. Essai d'entonnoir « V-Funnel »:

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante : l'entonnoir est rempli de béton jusqu'à arasement. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto compactant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement doit être inférieur à 10 secondes pour l'entonnoir SS (Small) et à 12 secondes pour l'entonnoir LS (Large) pour que le béton soit considéré comme ayant une résistance à la ségrégation suffisante.



Photo III. 8: V funnel utilisé.

d. Essai de stabilité au tamis:

A travers cet essai, on peut quantifier le pourcentage en poids de laitance. Il caractérise le risque de ségrégation.

Pour la réalisation de cet essai, il faut verser 10 litres de BAP dans un seau et le couvrir pour le protéger de la dessiccation pendant 15 minutes. Après 15 minutes, il faut verser 4.8 kg \pm

0.2 kg de béton sur le tamis à une hauteur de chute de $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$ et relever la masse de béton traversant le tamis. Le but est de déterminer la quantité de laitance dans le fond.



Photo III. 9: Le tamis utilisé.

e. Air occlus :

La mesure de l'air occlus a été effectuée au moyen d'un aéromètre de 7 litres modèle « CONTROLS ». Photo III.10.

On commence d'abord par remplir la chambre inférieure de l'appareil par le béton, on fixe ensuite la chambre supérieure, on injecte de l'eau à l'aide d'une pissette dans le premier robinet, le deuxième est ouvert, quand l'eau commencera à sortir de ce dernier on ferme les deux robinets et on applique une pression en actionnant la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre de l'appareil indique la valeur de référence 0%.

On ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres (supérieures et inférieures), le mélange est alors comprimé et le pourcentage d'air occlus est directement indiqué par l'aiguille du manomètre.



Photo III. 10: L'aéromètre utilisé.

f. Densité :

La densité réelle du béton frais est mesurée par la pesée d'un récipient de 7 litres (le récipient est la chambre inférieure de l'aéromètre à béton) rempli de béton avant la mesure de l'air occlus, selon un moule de remplissage analogue à celui utilisé pour le remplissage des éprouvettes cylindriques.

La densité est calculée par la formule suivante :

$$\rho = \frac{P - P_0}{V}$$

Avec : P est le poids du récipient pleine de béton (arasé à l'aide d'une règle).

P_0 est le poids du récipient vide.

ρ est la densité du béton frais et V le volume du récipient (7 litres)

III.3.3.2 Caractérisation a l'état durci :

a. Essai de compression:

Les essais de compression simple sont réalisés à 3, 7, 28 et 90 jours par écrasement d'éprouvettes de bétons cylindriques 10×20cm qui ont été conservées après démoulage à une température de 20°C et HR=55 ± 5% d'humidité relative.

Avant chaque essai, les éprouvettes sont pesées pour déterminer la masse volumique apparente afin de vérifier l'homogénéité du béton.

Les éprouvettes sont placées verticalement et leurs faces sont en contact direct avec les plateaux de la presse. Elles sont chargées jusqu'à rupture dans une machine de presse pour essai de compression.

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 3000 kN, asservie en force. La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406 : les essais ont été réalisés sur l'échelle de force la mieux appropriée (600 ou 1500 kN), avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.



Photo III. 11: La presse utilisée de compression.

b. Essai de traction par flexion:

Les essais de flexion trois points sont réalisés à 3, 7, 28 et 90 jours de mûrissement du béton sur des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28$ cm. Les échantillons sont soumis à un moment de flexion par application d'une charge constante et continue au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs en trois points sur une presse à vérin hydraulique.

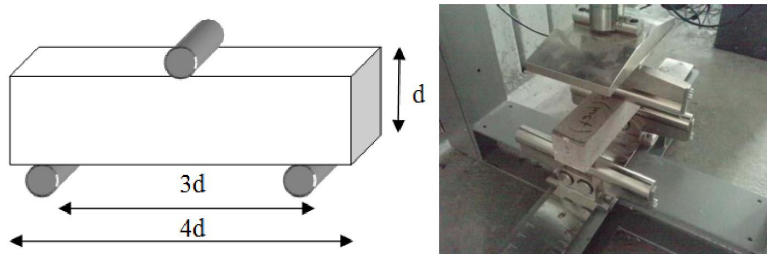


Photo III. 12: Dispositif de traction par flexion.

La mesure est quasi-statique et la vitesse d'asservissement du compactage est très faible, de $0,1 \text{ kN/s} \pm 1\%$ suivant la norme l'EN 12390-5. Les faces des éprouvettes sur lesquelles on applique la charge sont apprêtées et présentent des surfaces planes.

III.3.4. Fabrication des éprouvettes :

En ce qui concerne la caractérisation mécanique, le programme expérimental comprend deux types d'essais (Essai de compression et de traction par flexion) qui doivent être effectués à des échéances bien précises, chaque type d'essai comprend plusieurs :

- Eprouvettes cylindriques
- Eprouvettes prismatiques

Le tableau III. 18 définit le programme expérimental et le nombre d'essais effectués dans chaque cas s'explique d'abord par l'importance des sollicitations pour l'objectif envisagé. Les nombres indiqués correspondent aux essais les plus significatifs, les cas aberrants étant exclus.

Le programme expérimental s'est étendu sur une période d'environ de 6 mois, à raison d'une configuration au maximum chaque 10 jours.

Les mélanges	Compression			Traction par flexion		
	Type	dimension	N ^{bre}	Type	dimension	N ^{bre}
BAP FC	cylindrique	10x20cm	3	prismatique	7x7x28cm	3
BAP DM	cylindrique	10x20cm	3	prismatique	7x7x28cm	3

Tableau III. 18: Les éprouvettes utilisées pour performances mécaniques.

a. Eprouvettes cylindriques 10x20cm :

Conformément à la norme NF P18-406 (NA427), les éprouvettes cylindriques ont été préalablement rectifiées sont utilisées pour l'essai d'écrasement compression simple.

Ce type d'éprouvette a été conçu pour la détermination de la résistance en compression, la charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai à 3, 7, 28 et 90 jours.



Photo III. 13: Eprouvettes cylindriques 10x20cm

b. Eprouvettes prismatiques 7x7x28cm :

Ces épreuves sont réalisées pour les essais de traction par flexion selon les normes NFP18-407(NA428), qui précisent les détails d'exécution, les épreuves sont des prismes de section carrée et l'élanement 4.



Photo III. 14: Eprouvettes prismatiques 7x7x28cm

III.3.4.1. Remplissage :

Le remplissage se fait en deux ou trois couches successives suivant les dimensions des moules, jusqu'au meilleur remplissage.

Les BAP se distinguent des BO, par leur propriété à l'état frais ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, donc l'absence de vibration.

Avant le remplissage on applique un lubrifiant sur les parois à fin d'éviter la cohésion de la pâte.

Après mise en place du béton dans les moules (fabrication des épreuves), ils sont laissés pendant 24 heures dans la salle de fabrication sous protection d'un film de plastique souple,

Après 24 heures, les épreuves sont démoulées. On a remarqué que la qualité des produits finis (aspect apparent) était très bonne.

III.3.4.2. Conservation :

Pour chaque formulation des épreuves cylindriques 10x20cm destinées pour l'essai de compression et des épreuves prismatiques 7x7x28cm destinées pour l'essai de traction par flexion ont été confectionnés.

La cure consiste à maintenir des conditions de température et d'humidité propices à l'hydratation de ciment. L'eau doit être continuellement disponible aux particules de ciment pour que l'hydratation se poursuive. Cette hydratation continue rendra le béton plus fort, moins poreux et plus durable [Bethmount 05]. Pour maintenir l'humidité, les éprouvettes sont protégées de la dessiccation par des couvercles en plastique et conservées à température ambiante pendant 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans des emballages plastiques dans une salle à atmosphère ambiante jusqu'au moment de l'essai.

III.3.4.3. Préparation des éprouvettes :

Surfaçage norme NFP18-416 (NA 427)

Deux heures avant l'essai, les éprouvettes destinées aux essais de caractérisation traditionnelle (10x20cm) pour les essais de compression) ont été surfacées par coulis, par contre les éprouvettes destinées aux essais de traction par flexion été surfacées par meulage

L'opération de surfaçage permet d'obtenir deux surfaces planes parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette.

III.4. CONCLUSION:

Nous avons abordé dans ce chapitre différents points :

- Il présente les programmes expérimentaux en détail en précisant les corps d'épreuves utilisés et les modes opératoires suivis lors des essais.

- Il donne les informations nécessaires de tous les constituants rentrant dans les compositions retenues et étudiées avec les paramètres d'influence.

Nous étudions dans ce travail, la possibilité de découvrir d'autres sources naturelles comme le déchet de marbre. Ce déchet de marbre est rarement utilisé dans le béton en raison de l'absence d'une étude approfondie de ses propriétés. Cette étude expérimentale comparative (d'un BAP DM à ceux BAP FC) a pour objectif d'utiliser les déchets de marbre pour la formulation d'un béton autoplaçant, et d'étudier l'influence des ces fines sur les propriétés mécaniques et physiques à l'état frais et durci des BAP.

Dans le quatrième chapitre, sont présentés les résultats permettant l'évaluation des performances des différents mélanges retenus sous différents types de corps d'épreuve étudiés aux différents seuils, ainsi ceux décrivant les évolutions de ses principales caractéristiques physiques et mécaniques en fonction de l'âge pour une température ambiante de l'expérimentation.

4. ETUDE DES PERFORMANCES DES BAP A BASE DES ADDITIONS RECYCLEES

IV.1. INTRODUCTION :

On présente dans ce chapitre les résultats de recherche d'un plan expérimental, dont l'objectif de générer un ensemble d'informations pour permettre au utilisateur de relier les compositions des bétons avec leurs performances sous différents types de corps d'épreuve étudiés aux différents seuils, ainsi ceux décrivant les évolutions de ses principales caractéristiques physiques et mécaniques en fonction de l'âge pour une température ambiante de l'expérimentation.

Le programme expérimental établi dans notre laboratoire d'étudier l'influence des déchets de marbre sous forme d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques et physiques à l'état frais et durci de BAP obtenus et de les comparer à ceux d'un BAP (de référence) avec les fillers calcaires comme addition. Nous utilisons les mêmes formulations des bétons que celles définis au chapitre précédent.

Donc nous exposerons les résultats obtenus et en mettant en évidence l'influence des paramètres retenus.

IV.2. RAPPEL SUR LES MATERIAUX :

Nous utilisons les mêmes mélanges et la même dimension géométrique des éprouvettes qui sont définis au chapitre III.

Des compositions identiques ont été retenues pour la détermination des caractéristiques à l'état frais et à l'état durci.

IV.2.1. Caractéristiques des matériaux testés :

Les compositions des bétons retenues ont été étudiées et optimisées selon l'approche (Méthode Japonaise). Le tableau IV. 1 rappelle la désignation des différentes compositions retenues.

Différente compositions utilisées dans la recherche		
N°d'ordre	Notations	Type de BAP
1	BAP FC	Béton autoplaçant(fillers calcaires)de référence avec F/F+C=0.10
2	BAP DM	Béton autoplaçant(fines déchets de marbre) avec F/F+C=0.10

Tableau IV. 1: Différents compositions utilisées dans la recherche

Les constituants utilisés dans les mélanges sont : un ciment de type CPJ 42.5 de la cimenterie Hamma Bouziane, Des granulats (sable et gravier) de la carrière de Ain Smara, Un filler UF20 de la carrière ENG Khroub, un superplastifiant Medaplast SP40 de Granitex, et l'eau de robinet du laboratoire.

Nous avons confectionné deux types de BAP : un béton autoplaçant à base des fillers calcaires (BAP FC) et un béton autoplaçant à base de déchets de marbre (BAP DM), ces bétons sont donc formulés avec les mêmes compositions (les composantes pulvérulentes, proportions granulaires similaires) avec un ajustement (ou correction) sur la quantité d'eau et de superplastifiant pour atteindre un BAP (pour obtenir un étalement souhaité) et ne diffèrent que par la nature des additions.

La composition de ces bétons utilisés est présentée dans le tableau IV. 2.

Composantes	BAP FC	BAP DM
G/S	0.78	0.78
F/F+C	0.10	0.10
Fillers calcaires	48.8	-
Déchets de marbre	-	48.8
Super plastifiant SP 40	10.5	11.32
Eau efficace	200	204

Tableau IV. 2: Formulation les deux types de BAP kg/m³

De nombres mesures ont été effectuées pour la caractérisation de BAP à l'état frais (l'étalement, ségrégation dynamique, ségrégation statique, air occlus, densité, le temps d'écoulement). A l'état durci, une caractérisation classique des mélanges (résistances mécaniques : à la compression, traction par flexion) a été réalisée sur des éprouvettes respectivement cylindriques de 10x20 cm et prismatiques de dimensions 7x7x28 cm, sous

des conditions de conservation de $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}=55 \pm 5\%$ jusqu'à l'âge d'écrasement de 3-7-28 jours et 90 jours.

IV.3. METHODOLOGIE D'ESSAIS :

La précision ou la fidélité de mesure est le degré d'homogénéité des quantités trouvées.

Le plan expérimental classique pour une mesure de répétabilité et de reproductibilité fait appel à la mesure de 3 niveaux de concentrations différents.

La fidélité est l'aptitude de la méthode à donner des résultats les plus proches possibles lors d'analyses répétées d'un même échantillon. On distingue :

Répétabilité : Conditions où les résultats d'essai indépendants sont obtenus par la même méthode sur des individus d'essai identiques dans le même laboratoire, par le même opérateur, utilisant le même équipement et pendant un court intervalle de temps.

Les conditions de répétabilité comprennent : même mode opératoire, même observateur, même instrument de mesure utilisé dans les mêmes conditions, même lieu, répétition durant une courte période de temps.

Reproductibilité : Conditions où les résultats d'essai sont obtenus par la même méthode sur des individus d'essais identiques dans différents laboratoires, avec différents opérateurs et utilisant des équipements différents.

Les conditions que l'on fait varier peuvent comprendre : principe de mesure, méthode de mesure, observateur, instrument de mesure, étalon de référence, lieu, conditions d'utilisation, temps.

La mesure de fidélité est exprimée en termes d'infidélité et est calculée à partir de l'écart-type des résultats d'essais. Une fidélité moindre est reflétée par un plus grand écart-type.

L'organigramme suivant de la figure IV. 1 rassemble les différents essais pour la réalisation des mesures.

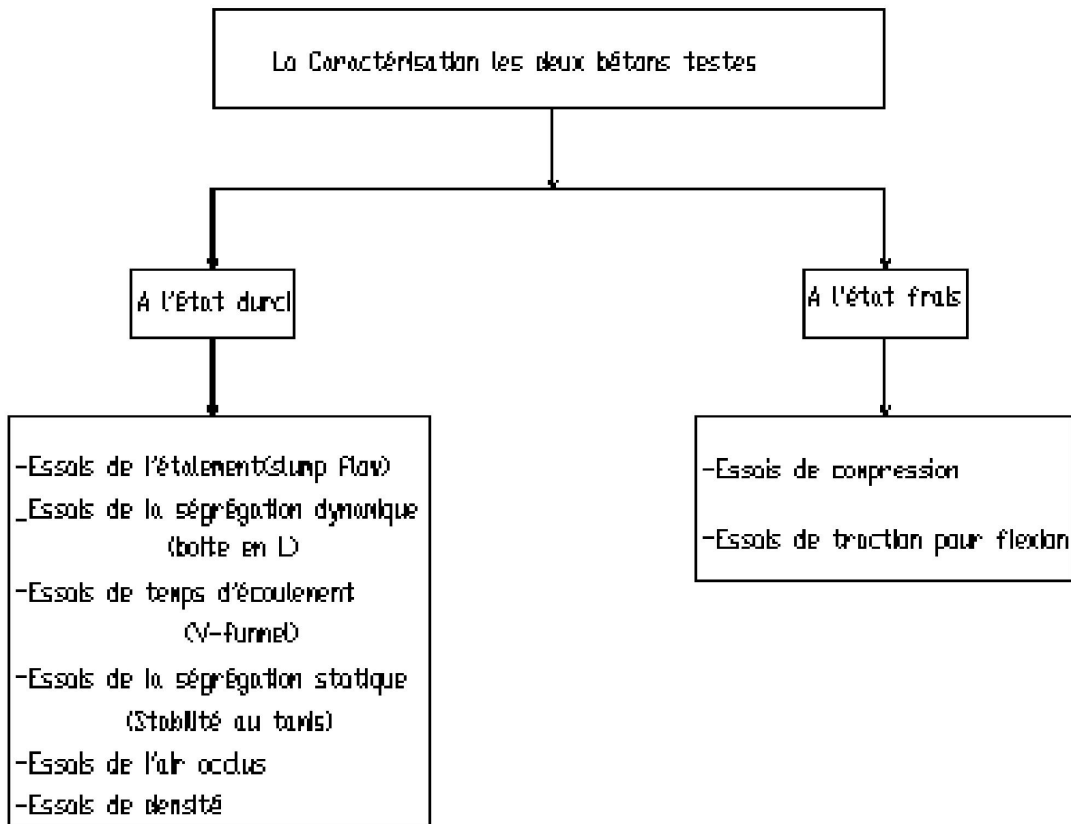


Figure IV. 1: Les essais réalisés.

Une des étapes importantes de ce travail expérimental consiste à mettre au point un équipement expérimental et établir un mode opératoire pour la réalisation des observations sur les échantillons du béton.

Nous présentons la conception du matériel d'essais, les contraintes et les hypothèses concernant la réalisation des mesures.

Nous avons confectionné deux types de BAP : un béton autoplaçant à base de fillers calcaires de référence (**BAP FC**) et un béton autoplaçant à base de déchets de marbre (**BAP DM**).

IV.4. CONCEPT DES BAP DE REFERENCE A BASE DES FILLERS CALCAIRES :

IV.4.1. Étude à l'état frais :

La différence principale, entre un BAP et un béton traditionnel, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en œuvre. En effet, leur composition spécifique

nécessite la mise en place d'un contrôle soutenu de leur formulation, ainsi qu'un contrôle de leurs propriétés à l'état frais, avant mise en œuvre.

Cependant, la caractérisation à l'état frais des bétons s'est limitée aux essais suivants : L'étalement au cône, écoulement à la boîte en L, V funnel et stabilité au tamis, air occlus et la masse volumique.

Les essais ont été effectués selon les procédures décrites par l'AFGC.

a. L'étalement :

Il s'agit de démouler un cône normalisé DIN (ou cône d'Abrams) de béton frais et de mesurer le diamètre de la galette de béton obtenue (Photo IV. 1). Il faut rappeler qu'est considéré comme autoplaçant, un béton qui forme une galette d'un diamètre compris entre 60 et 85 centimètres.

Pour les BAP, de temps d'écoulement. Il s'agit du temps nécessaire pour atteindre un diamètre de 50 cm, noté t_{50} [AFGC 00].

Les résultats d'essai d'étalement pour le (BAP FC) sont présentés dans le tableau IV.3:

Désignation de béton	BAP FC
Etalement (cm)	77
T ₅₀ (s)	2,63

Tableau IV. 3: Les résultats de l'étalement (BAP FC).



Photo IV. 1: Essai d'étalement (BAP FC).

L'étalement spécifié est 77 cm ce qui le qualifie d'autoplaçants selon la recommandation [AFGC 00]. Les temps mesurés pour atteindre une galette de 50 cm de diamètre (T_{50}) sont proches des valeurs couramment rencontrées (3 secondes) [AFGC 00].

Chapitre IV : Etude des performances des BAP à base des additions recyclées

Le tableau IV.3 montre que cette exigence du cahier des charges a été convenablement remplie par ce béton (BAP FC). Le terme d'augmentation de la fluidité entraîne une diminution de la viscosité.

De plus, les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton.

En analysant nos résultats avec ceux publiés récemment sur l'étalement et le T_{50} pour les bétons autoplaçants, on présente ci-dessous les résultats tirés de la littérature sur ce sujet .

BAP	Siddik		Chowdhury		Krachai et al		Bouhamou		Benhouna et al	
	D (mm)	T_{50} (s)	D (mm)	T_{50} (s)	D mm	T_{50} (s)	D mm	T_{50} (s)	D mm	T_{50} (s)
BAP1	673,3	4,5	642,5	2,75	700	2,3	730	2,5	760	2,4
BAP2	690,0	3,0	750	3,69	700	2,3	720	2,3	745	1,4
BAP3	603,3	4,4	855	3,38	695	2,3	700	2	770	3,6
BAP4	673,3	3,0	835	2,56	690	2,3	710	2	740	2,4
BAP5	633,3	4,0	-	-	685	2,1	745	2,8	-	-
BAP6	-	-	-	-	685	2,1	-	-	-	-
BAP7	-	-	-	-	680	2	-	-	-	-

Tableau IV. 4: Résultats tirés de la littérature (l'étalement et le T_{50}).

D'après les essais qu'on a effectué et en compilant de nombreux essais de littérature, on constate qu'il n'existe pas de corrélation entre l'essai d'étalement, qui caractérise la fluidité, et T_{50} , qui décrit le temps d'écoulement. Cela n'est pas surprenant, puisque les phénomènes impliqués sont différents, et illustre le fait que les constituants de béton n'ont pas les mêmes provenances, ni les mêmes caractéristiques.

b. Essai de la boîte en L :

Les résultats sont regroupés dans le tableau IV. 5:

Désignation de béton	BAP FC
La boîte en L (cm)	1
T ₂₀ (s)	1,52
T ₄₀ (s)	2,12
T ₆₀ (s)	2,83

Tableau IV. 5: Les résultats de la boîte en L (BAP FC).



Photo IV. 2: Essai de la boîte en L (BAP FC).

Sur la ségrégation dynamique de (BAP FC), les résultats représentés par le Tableau IV.5 sont conformes à ce que l'on peut attendre d'un béton autoplaçant [AFGC 00]. Cependant, le plus important dans cet essai est que le béton testé s'écoule à travers les armatures correctement. Sur ce point, aucun problème n'est à signaler puisque le (BAP FC) présente un taux de remplissage supérieur à 0,80.

En analysant nos résultats mesurés et ceux publiés récemment sur la ségrégation dynamique selon l'essai de la boîte en L pour les BAP, on présente ci-dessous cette confrontation.

BAP	Bouhamou et al		Assié	Bensebti	Jie shen et al	Hilali et al	Turcry
	H ₂ /H ₁	T ₄₀ (s)	H ₂ /H ₁	H ₂ /H ₁	H ₂ /H ₁	H ₂ /H ₁	H ₂ /H ₁
BAP1	0,93	3,0	0,92	0,90	0,89	0,85	0,90
BAP2	0,91	3,1	0,94	0,89	1	0,86	0,80
BAP3	0,87	3,5	0,92	0,84	0,84	0,88	-
BAP4	0,89	3,3	0,87	0,80	0,97	-	-
BAP5	0,95	3,0	-	0,90	0,90	-	-

Tableau IV. 6: Résultats tirés de la littérature (la boîte en L).

On observe que ces résultats de la littérature des BAP (avec de fillers calcaires comme addition) sont approximativement du même ordre de grandeur que nos résultats de (BAP FC).

c. Essai de l'entonnoir :

Un autre paramètre à vérifier pour l'ensemble de ces bétons est le temps d'écoulement. Le tableau suivant représente les résultats obtenus de l'essai V funnel :

Désignation de béton	BAP FC
Temps d'écoulement (s)	9,76

Tableau IV. 7: Les résultats de temps d'écoulement (BAP FC).



Photo IV. 3: Essai de temps d'écoulement (BAP FC).

Le temps d'écoulement mesuré par l'entonnoir est compris entre 9 et 25 s proche selon la recommandation [AFGC 00].

Selon la recommandation [Bensebti 08].

- Quand le temps à l'entonnoir en V est inférieur à 8 secondes la ségrégation statique est systématique et très importante.
- Quand le temps est supérieur à 10 secondes, le risque de ségrégation statique est minime.

En analysant nos résultats mesurés et ceux publiés récemment sur le temps d'écoulement selon l'essai d'entonnoir « V-Funnel » pour les BAP, on présente ci-dessous les confrontations.

BAP	Bensebti	Jie shen et al	Bensebti et al
	V(s)	V(s)	V(s)
BAP1	17	2	8,3
BAP2	12	8	11,2
BAP3	19	20	-
BAP4	8	10	-
BAP5	12	15	-

Tableau IV. 8: Résultats tirés de la littérature (le temps d'écoulement).

Ces résultats de la littérature des BAP (avec de fillers calcaires comme addition) Sont varie, puisque les phénomènes impliqués sont différents, et illustre le fait que les constituants de béton n'ont pas les mêmes provenances, ni les mêmes caractéristiques.

d. Stabilité au tamis :

Pour obtenir une pièce en béton autoplaçant de bonne qualité, il est nécessaire que le béton ait une fluidité importante - mesurée par l'étalement - et présente une bonne aptitude au remplissage - mesurée par la boîte en L - pour effectuer une mise en place correcte. Mais cela n'est pas suffisant; il faut également, qu'une fois mis en place, les gravillons ne ségrègent pas, pour conserver à la pièce des propriétés mécaniques homogènes.

Pour cela on a effectué l'essai de stabilité au tamis afin de caractériser la ségrégation statique. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

Désignation de béton	BAP FC
Stabilité au tamis (%)	8,36

Tableau IV. 9: Les résultats de stabilité au tamis (BAP FC).

Sur la ségrégation statique, le (BAP FC) présente un taux de ségrégation inférieur à 15 %, synonyme d'une stabilité satisfaisante.

Quand la stabilité au tamis est entre 15 et 30% la stabilité est jugée critique et il est nécessaire de procéder à des essais spécifiques de ségrégation (Méthode de Sidky/ Méthode japonaise du cylindre/ La méthode proposé par V.K. BUI) [Senebi 04].



Photo IV. 4: Essai de stabilité au tamis (BAP FC).

En analysant nos résultats mesurés et ceux publiés récemment sur la stabilité au tamis pour les BAP (avec de fillers calcaires comme addition), on présente ci-dessous les résultats tirés de la littérature sur ce sujet.

BAP	Bouhamou et al	Assié	Bensebti	Jie shen et al	Hilali et al	Turcry
	Stab(%)	Stab(%)	Stab(%)	Stab(%)	Stab(%)	Stab(%)
BAP1	11,85	8,17	15,40	13,20	5,12	6,00
BAP2	12,60	13,15	5,30	14,50	4,80	15,00
BAP3	7,68	7,80	3,60	3,20	6,70	5,00
BAP4	8,45	2,20	13,30	10,00	-	13,80
BAP5	13,50	-	15,20	8,50	-	2,00

Tableau IV. 10: Résultats tirés de la littérature (stabilité au tamis).

D'après les essais qu'on a effectué et en compilant de nombreux essais de littérature, on constate que la stabilité de ces mélanges est variable d'un mélange à l'autre, puisque les phénomènes impliqués sont différents, et illustre le fait que les constituants de béton n'ont pas les mêmes provenances, ni les mêmes caractéristiques.

**Les essais de ségrégation (stabilité au tamis), à la boîte en L, au V-funnel et d'étalement ont été conduits selon les recommandations de l'AFGC- Bétons autoplacants.

e. L'air occlus :

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Désignation de béton	BAP FC
Air occlus (%)	2,2

Tableau IV. 11: Les résultats d'air occlus (BAP FC).



Photo IV. 5: Essai d'air occlus (BAP FC).

Chapitre IV : Etude des performances des BAP à base des additions recyclées

L'introduction des additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire qui peut influencer sur la teneur en air occlus, et qui se traduit par une amélioration de la compacité.

En analyse nos résultats mesurés et ceux publiés récemment sur l'air occlus pour les BAP (avec de filles de calcaires comme addition), on présente ci-dessous les travaux antérieurs confrontés à nos résultats.

BAP	Bouhamou et al	Assié	Boukni	Jie shen et al	Hilali et al	Mouli et al
	Air (%)	Air (%)	Air (%)	Air (%)	Air (%)	Air (%)
BAP1	2,80	2,10	2,80	1,00	2,35	2,50
BAP2	2,40	1,30	2,70	0,90	2,43	2,80
BAP3	1,90	2,20	-	1,00	2,85	2,90
BAP4	2,20	1,60	-	1,40	-	-
BAP5	3,20	-	-	1,30	-	-

Tableau IV. 12: Résultats tirés de la littérature (d'air occlus).

On constate que l'air occlus de notre béton (BAP FC) dont le même ordre de grandeur des résultats des essais issus de la littérature sur BAP.

f. La densité :

Désignation de béton	BAP FC
Densité réelle (Kg/m ³)	2360,8
Densité théorique (Kg/m ³)	2373,3

Tableau IV. 13: Les résultats de la densité (BAP FC).

L'évolution de la densité est conditionnée par la teneur en fines. La densité réelle est un peu plus moins que la densité théorique (le poids des constituants n'est pas exacte, la procédure de gâchage, le prélèvement...).

En analysant nos résultats mesurés et ceux publiés récemment sur la densité pour les BAP (avec de filles de calcaires comme addition), on présente ci-dessous la confrontation des résultats.

BAP	Bensebti		Vanhove	Boukni	Jie shen et al		Hilali et al	
	Densité réelle (Kg/m ³)	Densité théorique (Kg/m ³)	Densité réelle (Kg/m ³)	Densité réelle (Kg/m ³)	Densité réelle (Kg/m ³)	Densité théorique (Kg/m ³)	Densité réelle (Kg/m ³)	Densité théorique (Kg/m ³)
BAP1	2363	2354,6	2275	2383	2351	2348	2374	2369
BAP2	2362	2365,8	2274	2352	2395	2385	2371	2366
BAP3	2379	2365,8	-	-	2415	2414	2368	2367
BAP4	2365	2377	-	-	2388	2393	-	-
BAP5	-	-	-	-	-	-		

Tableau IV. 14: Résultats tirés de la littérature (de la densité).

D'après les essais qu'on a effectué et en compilant de nombreux essais de littérature, on constate qu'il n'existe pas de corrélation entre La densité réelle, et la densité théorique. Puisque les constituants de béton n'ont pas les mêmes provenances, ni les mêmes caractéristiques.

IV.4.2. Étude à l'état durci :

On a réalisé expérimentalement l'étude des propriétés suivantes :

- a. la résistance à la compression à 3, 7, 28 et 90 jours,
- b. la résistance à la traction par flexion à 3, 7, 28 et 90 jours,

a. La résistance à la compression :

L'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cylindriques 10x20 cm. Trois éprouvettes sont testées pour chaque échéance d'âge. Les résistances des éprouvettes en MPa obtenus sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Désignation de béton	BAP FC	
Résistance à la compression(MPa)	3j	14,62
	7j	24,35
	28j	35,33
	90j	36,03

Tableau IV. 15: Résistances à la compression sur cylindres 10x20 en MPa (BAP FC).

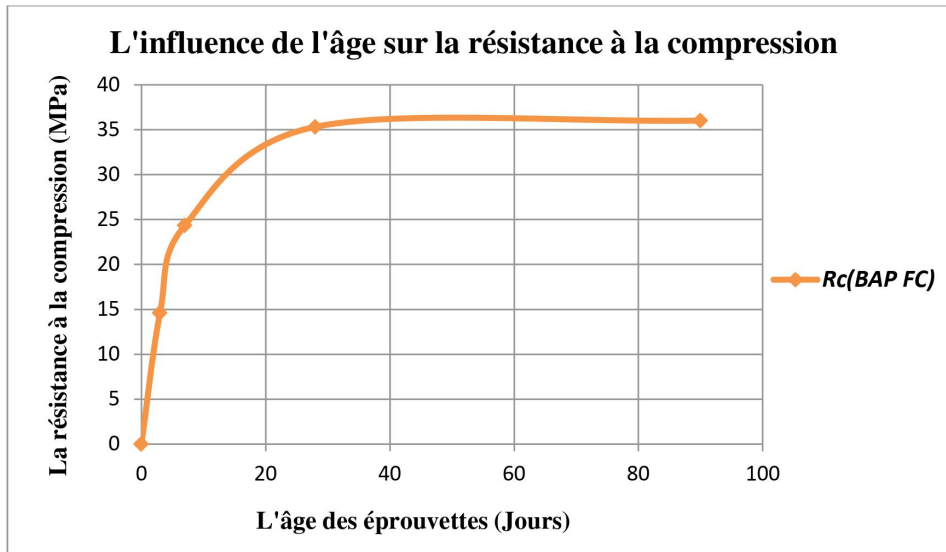


Figure IV. 2: Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps (BAP FC).

Sur la figure IV.2, les résistances sont présentées en fonction du temps. En analysant la courbe de cette figure, on peut voir que les résistances des bétons en fonction du temps sont quasiment croissantes.

La résistance initiale au jeune âge (3 jours) de béton (BAP FC) atteint (41%) par rapport à la résistance moyen terme à 28 jours, et à 7 jours l'hydratation de béton (BAP FC) affiche une augmentation de résistance pour atteindre (68%) par rapport à la résistance moyen terme à 28 jours (tableau IV. 15).

Et entre 28 jours et 90 jours, la résistance obtenue n'enregistre pas une évolution (augmentation) sensible.

b. La résistance à la traction par flexion :

L'essai de traction par flexion est effectué sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm, on utilisant un dispositif de flexion 3 points. Trois éprouvettes sont testées pour chaque échéance d'âge. Les résistances des éprouvettes en MPa obtenues sont rassemblées dans le tableau IV.16.

Désignation de béton	BAP FC	
Résistance à la traction par flexion (MPa)	3j	2,60
	7j	3,72
	28j	4,34
	90j	8,04

Tableau IV. 16: Résistances à la traction par flexion sur prismes 7x7x28 en MPa(BAP FC).

La résistance à la traction par flexion est en moyenne d'environ 6 fois plus faible que la résistance à la compression.

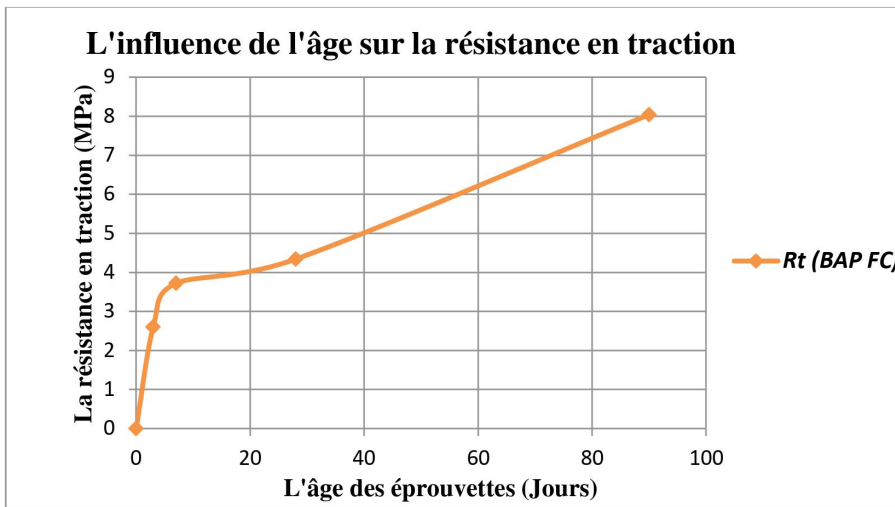


Figure IV. 3: Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps de (BAP FC).

La figure IV. 3, montre que l'évolution de résistance à la traction par flexion augmente avec l'âge des éprouvettes.

En ce qui concerne la résistance à la traction par flexion du béton (BAP FC), l'augmentation de cette résistance entre 3 jours et 7 jours (59% et 85% respectivement) par rapport à la résistance moyenne à 28 jours, et une augmentation de (47%) à 90 jours donc un gain de 3,70 MPa par rapport à 28 jours.

On remarque que l'évolution de la résistance à la traction du béton (BAP FC) est plus rapide que l'évolution de la résistance à la compression (au jeune âge et à long terme).

IV.4.3. Bilan :

Nous avons présenté les résultats de l'étude des propriétés physiques et mécaniques du BAP de référence à base de matériaux locaux avec les fillers calcaires comme addition.

En outre la grande fluidité des BAP est un de leurs atouts majeurs puisqu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre mais cette propriété est très complexe, il faut la maîtriser très bien sinon on ne peut pas qualifier le béton comme autoplaçant. Selon l'analyse précédente on peut qualifier le béton à base des fillers calcaires (BAP FC) répond aux exigences d'une bonne fluidité, une stabilité accrue et une capacité de remplissage satisfaisante.

Le béton confectionné à partir des matériaux locaux (BAP FC) se révèle stable et satisfaisant. La présence des fillers calcaires est une nécessité, or ces derniers améliorent non seulement les propriétés rhéologiques mais ainsi les performances mécaniques.

IV.5. VALORISATION DES DECHETS DE MARBRE POUR LA CONCEPTION DES BAP.

Nous étudions dans ce travail, la possibilité de formuler des BAP avec des additions minérales économiques (avantage éco-environnemental) comme les déchets de marbre. Ces déchets de marbre sont rarement utilisés dans le béton en raison de l'absence d'une étude approfondie de ses propriétés. Notre programme expérimental étudie l'influence des déchets de marbre sous forme d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques à l'état frais et durci des BAP (BAP DM) obtenus et comparés à ceux d'un BAP (BAP FC) de référence avec les fillers calcaires comme ajouts. Nous utilisons les mêmes formulations des bétons que celles définies au chapitre précédent.

On Rappelle : les différentes caractéristiques intrinsèques des déchets de marbre sont présentées dans le tableau suivant.

Les fines de déchets de marbre	Masse volumique	Compacité	Porosité	Coef d'absorption d'eau
	2,736 g/cm ³	98,03%	1,96%	0,39

Tableau IV. 17: Caractéristiques physiques des déchets de marbre.

IV.5.1. Étude à l'état frais :

Un des avantages des bétons autoplaçants à l'état frais sera d'améliorer la maniabilité du mélange qui peut être évaluée par la mesure du diamètre d'étalement du béton, afin qu'il puisse remplir facilement les coffrages sans utiliser un moyen de vibration (l'étalement du béton et sa mise en place se font seulement sous l'effet de la gravité) [Menai 95].

Les chercheurs visent aussi à aboutir à la stabilité des bétons autoplaçants, car en général le critère de fluidité-stabilité est assez difficile à assurer (la stabilité sous entend ; la résistance à la ségrégation) [Menai 95].

La caractérisation à l'état frais des bétons autoplaçants s'est limitée aux essais suivants : L'étalement au cône, écoulement à la boîte en L, V funnel et stabilité au tamis, air occlus et la masse volumique.

Les essais ont été effectués selon les procédures et les recommandations décrites par l'AFGC.

a. L'étalement :

Le béton (BAP DM) est introduit dans le cône sans compaction. On mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute. Pour les BAP, des temps d'écoulement intermédiaires ont été mesurés. Il s'agit nécessairement du temps à l'obtention d'une galette de 50 cm de diamètre, noté T_{50} [AFGC 00]. Une observation visuelle permet aussi également de constater si une ségrégation horizontale a eu lieu ou non.

Les résultats d'essai d'étalement pour le (BAP DM) sont présentés dans le tableau IV.18:

Désignation de béton	BAP DM	BAP FC (de référence)
Etalement (cm)	70	77
T_{50} (s)	6,85	2,63

Tableau IV. 18: Les résultats de l'étalement (BAP DM).

L'étalement spécifié pour le béton (BAP DM) est 70 cm de classe S2 (: de 66 à 75cm) donc on obtient un BAP répondant aux exigences de l'AFGC. Le temps mesuré pour atteindre une galette de 50 cm de diamètre (T_{50}) est de 6,85s, Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Pour des BAP, cette valeur est, généralement, comprise entre 4 et 10 secondes [Hasni 99].

Selon Nagataki et Fujiwara une valeur de l'étalement comprise entre 500 et 700 mm suffit au béton pour être autoplaçant. Pour un étalement supérieur à 700 mm, le béton risque de subir une ségrégation, et pour des étalements inférieurs à 500 mm, le béton risque de présenter une déformabilité insuffisante pour pouvoir passer à travers les zones fortement armées [Nagataki 95].

On remarque que l'augmentation du dosage en superplastifiant ne permet pas de faire augmenter sensiblement l'étalement de béton (BAP DM). Le dosage en superplastifiant obtenu par la méthode Japonaise de (BAP DM) est donc égal (ou supérieur) au dosage de saturation pour atteindre un BAP (avec un étalement souhaité).

Le tableau IV.18 montre que cette exigence du cahier des charges a été convenablement remplie par ce béton à base des déchets de marbre (BAP DM).

Nous pouvons constater que l'ensemble des bétons autoplaçants voir tableau IV.18 respecte le critère d'étalement. L'étalement spécifié est respectivement compris entre 70 cm de béton (BAP DM) et 77cm de béton (BAP FC).

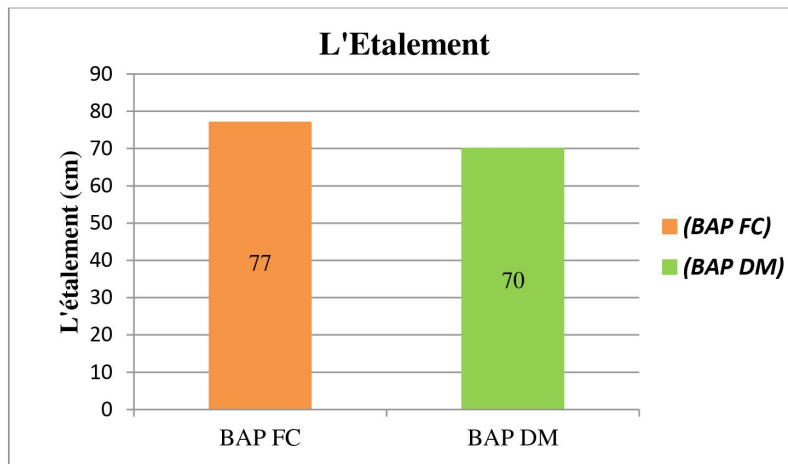


Figure IV. 4: Comparaison entre l'étalement de (BAP FC) et (BAP DM).

Sur l'histogramme de la figure IV. 4, on constate que l'étalement de béton (BAP DM) diminue de (10%) par rapport à l'étalement de béton (BAP FC). Cette différence est la conséquence de présence des fillers calcaires réduisant la demande en eau qui conduit à une diminution de la viscosité du BAP, et augmente son diamètre d'étalement. Notons que les travaux antérieurs des

différents auteurs ne précisent pas la valeur limite de la finesse du calcaire pour que les résultats soient observés.

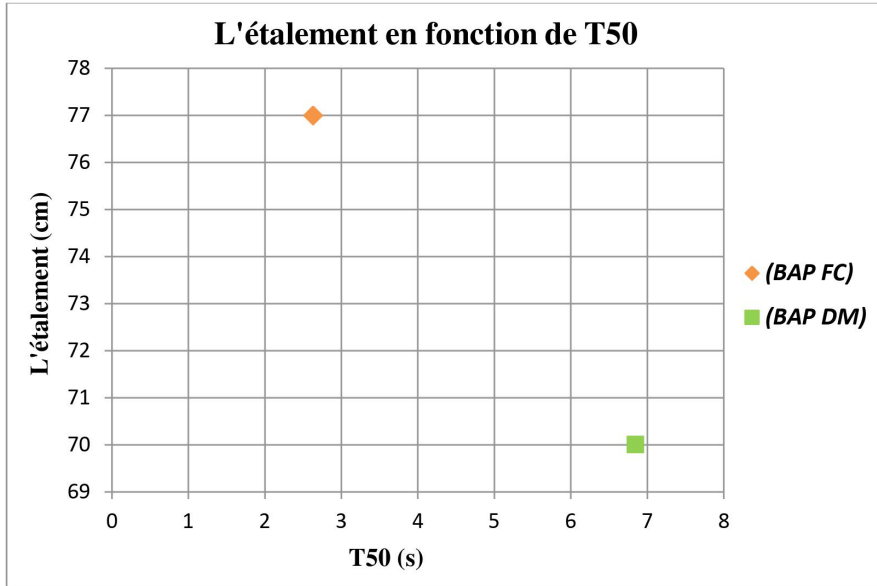


Figure IV. 5: l'étalement en fonction de T₅₀.

La figure IV. 5 nous présente l'étalement en fonction de temps mesuré pour atteindre une galette de 50 cm de diamètre (T₅₀), On observe que l'augmentation de l'étalement est liée avec une diminution de temps d'écoulement.

b. Essai de la boîte en L :

Les résultats sont regroupés dans le tableau IV. 19:

Désignation de béton	BAP DM	BAP FC (de référence)
La boîte en L (cm)	0,92	1
T ₂₀ (s)	3,02	1,52
T ₄₀ (s)	5,54	2,12
T ₆₀ (s)	7,03	2,83

Tableau IV. 19: Les résultats de la boîte en L (BAP DM).

Sur la ségrégation dynamique du béton (BAP DM), les résultats représentés sur le tableau IV.19

sont conformes à ce que l'on peut attendre d'un béton autoplaçant, répondant aux exigences de l'AFGC. Cependant, le plus important dans cet essai est que le béton (BAP DM) testé s'écoule à travers les armatures correctement. Sur ce point, aucun problème n'est à signaler puisque tous les BAP présentent des taux de remplissage supérieur à 0,80.

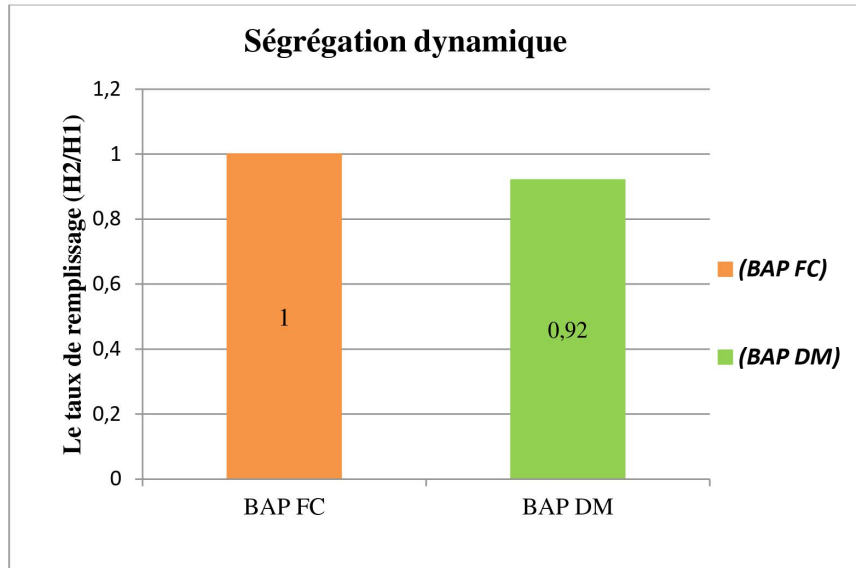


Figure IV. 6: Comparaison entre le taux de remplissage de (BAP FC) et (BAP DM).

Sur l'histogramme de la figure IV. 6, on peut remarquer une diminution du taux de remplissage H2/H1 de béton (BAP DM) de (8%) par rapport au béton (BAP FC), et de cela on peut conclure que le béton (BAP DM) est plus visqueux que le béton (BAP FC).

c. Essai de l'entonnoir :

Un autre paramètre à vérifier pour l'ensemble des bétons est le temps d'écoulement. Cet essai est utilisé aussi pour évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement.

Le tableau suivant représente les résultats obtenus de l'essai V funnel :

Désignation de béton	BAP DM	BAP FC (de référence)
Temps d'écoulement (s)	24,75	9,76

Tableau IV. 20: Les résultats de temps d'écoulement (BAP DM).

Les temps d'écoulement mesurés par l'entonnoir étaient respectivement compris entre 9 et 25 s et ils sont proches des valeurs couramment rencontrées.

Le temps d'écoulement mesuré par l'entonnoir est (24,75 s) ci concerne le béton à base des déchets de marbre (BAP DM), donc cela peut être considéré comme satisfaisant et à la limite du domaine de la spécificité autoplaçante.

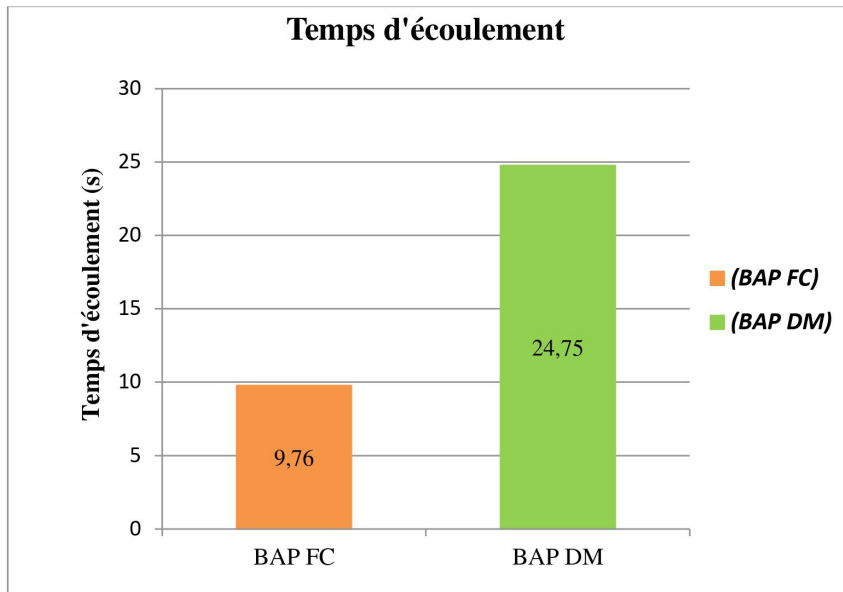


Figure IV. 7: Comparaison entre le temps d'écoulement de (BAP FC) et (BAP DM).

Nous remarquons sur l'histogramme de la figure IV. 7 que le temps d'écoulement de béton (BAP DM) est plus élevé de (60%) que celui de béton (BAP FC). Donc les fillers calcaires peuvent avoir une influence sur la fluidité des BAP par rapport aux fines des déchets de marbre, en d'autres termes, ces fines des déchets de marbre freinent l'écoulement de béton.

d. Stabilité au tamis :

On a effectué l'essai de stabilité au tamis pour caractériser la ségrégation statique. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

Désignation de béton	BAP DM	BAP FC (de référence)
Stabilité au tamis (%)	4,10	8,36

Tableau IV. 21: Les résultats de stabilité au tamis (BAP DM).

Sur la ségrégation statique, le (BAP DM) présente un taux de ségrégation inférieur à 15 %, synonyme d'une stabilité satisfaisante, on remarque que le mélange homogène et ne présente pas de risques de ségrégation statique.

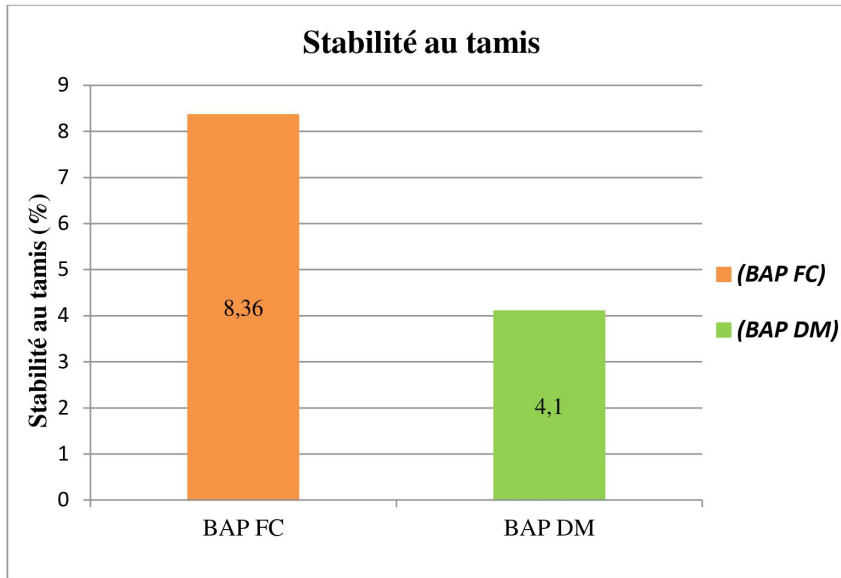


Figure IV. 8: Comparaison entre la stabilité au tamis de (BAP FC) et (BAP DM).

Sur l'histogramme de la figure IV. 8, on observe que le béton à base des déchets de marbre (BAP DM) au milieu non confiné est plus stable que le béton à base des fillers calcaires (BAP FC), donc le (BAP DM) à un taux de stabilité plus élevé de (50%) par rapport au béton (BAP FC) ($4,10\% < 8,36\%$).

A partir de ce résultat on peut distinguer deux points :

- On sait que l'augmentation du dosage en eau provoque une diminution de la cohésion au sein du mélange qui peut entraîner des phénomènes de ségrégations très préjudiciables, ce qui confirme que l'augmentation du dosage en eau de béton (BAP DM) a permis une correction (ajustement) de la formulation pour l'obtention de bon BAP, répondant aux exigences des cahiers des charges.
- On peut noter que l'augmentation du dosage en Super **plastifiant** a engendré une **diminution de la** du **taux de ségrégation**. Ceci confirme l'influence positive de ce produit vis-à-vis de la ségrégation statique du BAP.

Selon la recommandation [Bensebti 08].

- On peut noter que le risque de ségrégation statique commence à devenir important quand l'étalement dépasse les 70 cm. Ainsi on peut admettre qu'il n'est pas nécessaire de procéder à des essais complémentaires de détermination de l'indice de ségrégation statique si les bétons confectionnés présentent des étalements inférieurs ou égaux à 70 cm.

Donc le béton à base des déchets de marbre (BAP DM) répond aux exigences d'une bonne fluidité, une stabilité accrue et une capacité de remplissage satisfaisante.

e. L'air occlus :

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Désignation de béton	BAP DM	BAP FC (de référence)
Air occlus (%)	2	2,2

Tableau IV. 22: Les résultats d'air occlus (BAP DM).

L'augmentation de la teneur en air accroît généralement la plasticité du béton et les résultats obtenus vont dans ce sens pour le béton (BAP DM) et le béton (BAP FC).

Le pourcentage d'air pour le béton (BAP DM) est inférieur que celui de béton (BAP FC). Les **additions minérales** telles que les déchets de marbre, donnent au BAP une microstructure plus dense que les fines de fillers calcaires.

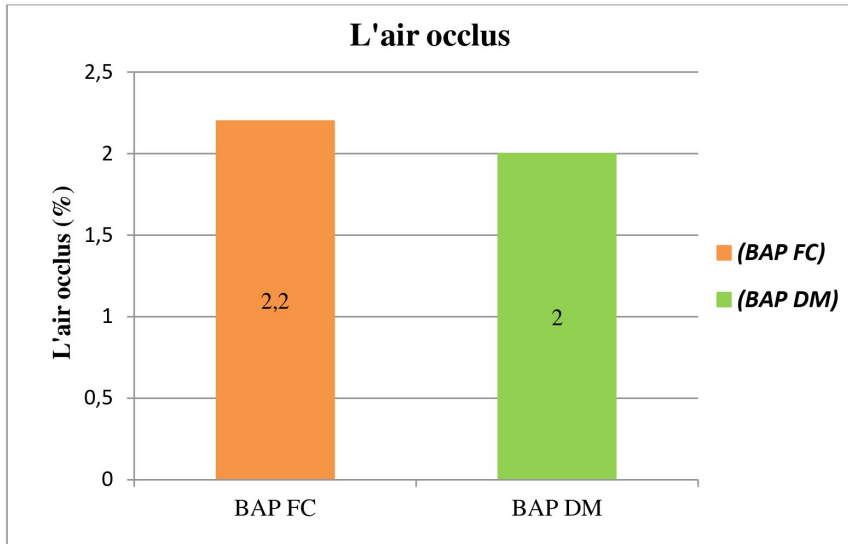


Figure IV. 9: Comparaison entre l'air occlus de (BAP FC) et (BAP DM).

D'après l'histogramme de la figure IV.9 on remarque que le béton à base des fillers calcaires (BAP FC) contient plus d'air que le béton à base des déchets de marbre (BAP DM), donc l'ajout des déchets de marbre diminue de (10%) l'air occlus par rapport aux fillers calcaires. En d'autre terme, l'introduction des **additions minéraux** entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire.

f. La densité :

Désignation de béton	BAP DM	BAP FC (de référence)
Densité réelle (Kg/m^3)	2243,00	2360,80
Densité théorique (Kg/m^3)	2378,12	2373,30

Tableau IV. 23: Les résultats de la densité (BAP DM).

La densité réelle est un peu plus faible (légèrement) que la densité théorique (le poids des constituants n'est pas exacte, la procédure de gâchage, le prélèvement...).

Le béton à base des déchets de marbre (BAP DM) à une densité théorique de (135Kg/m^3) de plus par rapport à sa densité réelle. Par contre le béton (BAP FC) à une légère différence (seulement 13Kg/m^3) entre la densité théorique et sa densité réelle.

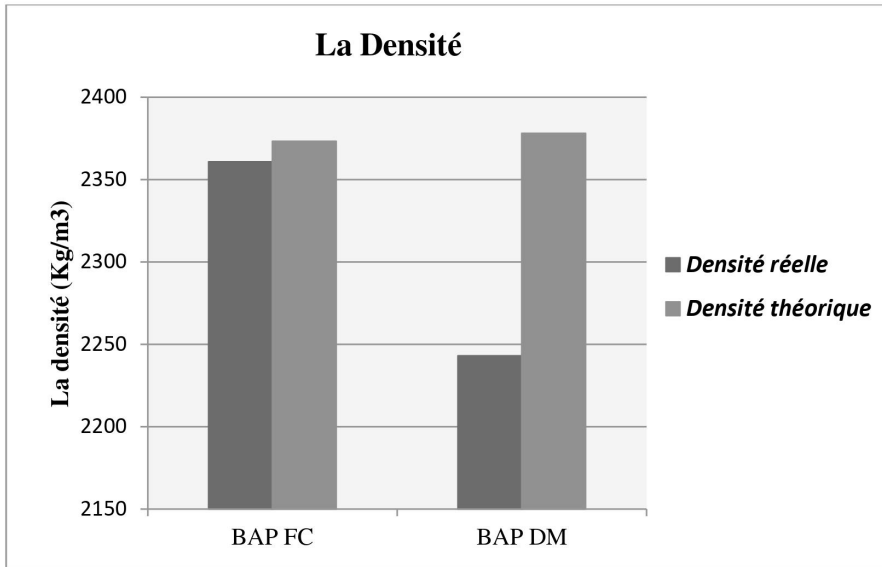


Figure IV. 10: Comparaison entre la densité réelle et la densité théorique de (BAP FC) et (BAP DM).

IV.5.2. Étude à l'état durci :

Les éprouvettes confectionnées ont été testées à la rupture en compression simple et en traction par flexion à 3, 7, 28 et 90 jours, de conservation à $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}=55 \pm 5\%$.

a. La résistance à la compression :

Les résistances des éprouvettes sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Désignation de béton		BAP DM	BAP FC (de référence)
Résistance à la compression(MPa)	3j	16,95	14,62
	7j	24,97	24,35
	28j	42,13	35,33
	90j	43,31	36,03

Tableau IV. 24: Résistances à la compression sur cylindres 10x20cm en MPa (BAP DM).

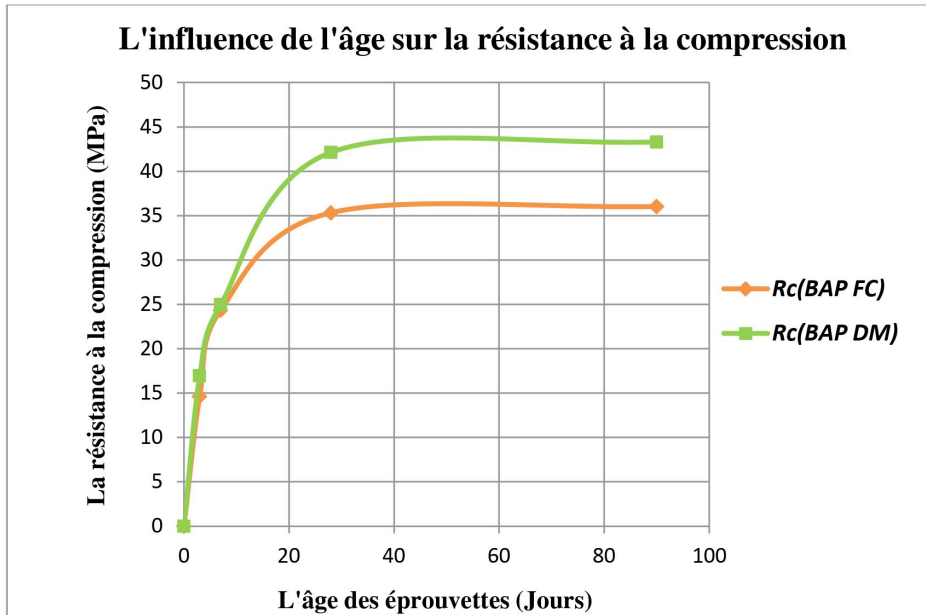


Figure IV. 11: Evolution de la résistance à la compression en fonction temps de (BAP FC) Et (BAP DM).

Sur la figure IV.11, les résistances sont présentées en fonction du temps. En analysant les courbes de cette figure, on peut voir que les résistances des bétons en fonction du temps sont quasiment croissantes. Elles présentent la même allure quelle que soit le type de béton.

La résistance initiale au jeune âge (3jours) de béton (BAP DM) atteint (40%) par rapport à la résistance à 28 jours (moyen terme), et à 7 jours l'hydratation de béton (BAP DM) affiche une augmentation de résistance de 8MPa. En d'autre terme on remarque pour le béton (BAP DM) que R_{C7j} / R_{C28j} est de l'ordre de (59%) ce qui montre que plus de la moitié de la résistance est acquise pendant les 7 premiers jours.

Et entre 28 jours et 90jours, la résistance obtenue de béton (BAP DM) n'enregistre pas une augmentation sensible, on voit une différence de 1MPa . En d'autres termes une augmentation de (3%) par rapport au moyen terme (tableau IV. 24).

Le béton à base des déchets de marbre (BAP DM) donne de meilleures performances que le béton de référence à base des fillers calcaires (BAP FC) à jeune âge, moyen et long terme, On rappelle que la quantité de superplastifiant utilisée dans la formulation de (BAP DM) est supérieure à celle employée dans la formulation de (BAP FC) (respectivement de 11,32 à 10.50 kg/m^3) et de tels produits peuvent avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique,

malgré E/C de béton (BAP DM) est légèrement supérieure que E/C de béton (BAP FC) (respectivement de 0,455 à 0,45).Ce qui confirme le rôle et la fonction d'un retardateur de durcissement joué par le déchet de marbre.

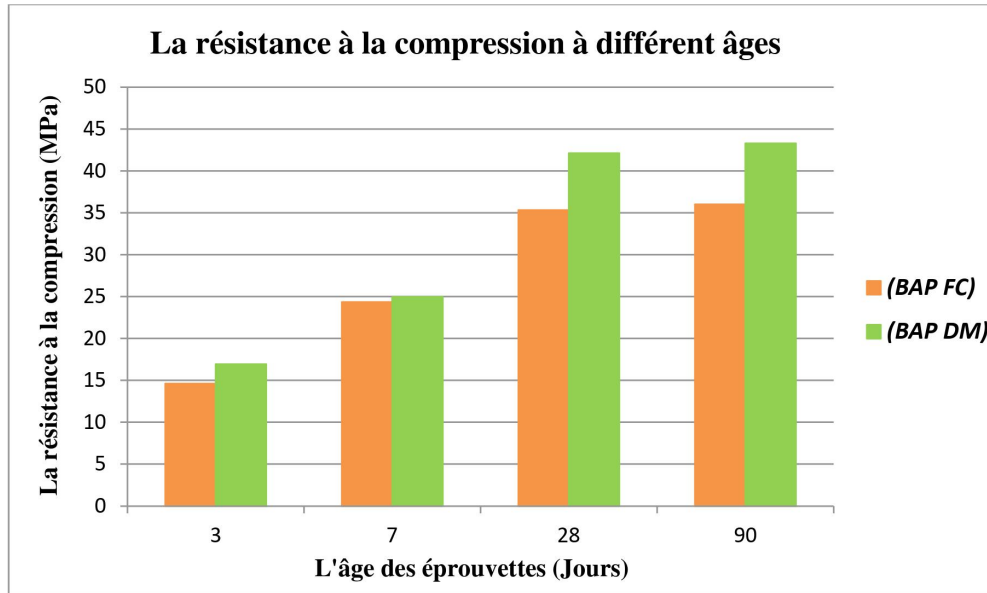


Figure IV. 12: Comparaison entre la résistance à la compression de (BAP FC) et (BAP DM) en fonction de temps.

Sur l'histogramme de la figure IV.12, on peut constater une augmentation de résistance à la compression de (BAP DM) de l'ordre 2MPa par rapport au (BAP FC) à 3 jours, à 7 jours une différence négligeable et à moyen terme à 28 jours une différence de résistance de (BAP DM) par rapport au (BAP FC) est 6MPa cette différence est à la hausse à long terme pour atteindre à 90 jours à 8MPa.

c. La résistance à la traction par flexion :

Désignation de béton		BAP DM	BAP FC (de référence)
Résistance à la traction par flexion (MPa)	3j	4,10	2,60
	7j	4,90	3,72
	28j	5,01	4,34
	90j	11,01	8,04

Tableau IV. 25: Résistances à la traction par flexion sur prismes 7x7x28 en MPa (BAP DM).

La résistance à la traction par flexion de béton (BAP DM) augmente de la même façon que celle à la compression (au jeune âge et moyen terme) et plus rapide (à long terme).

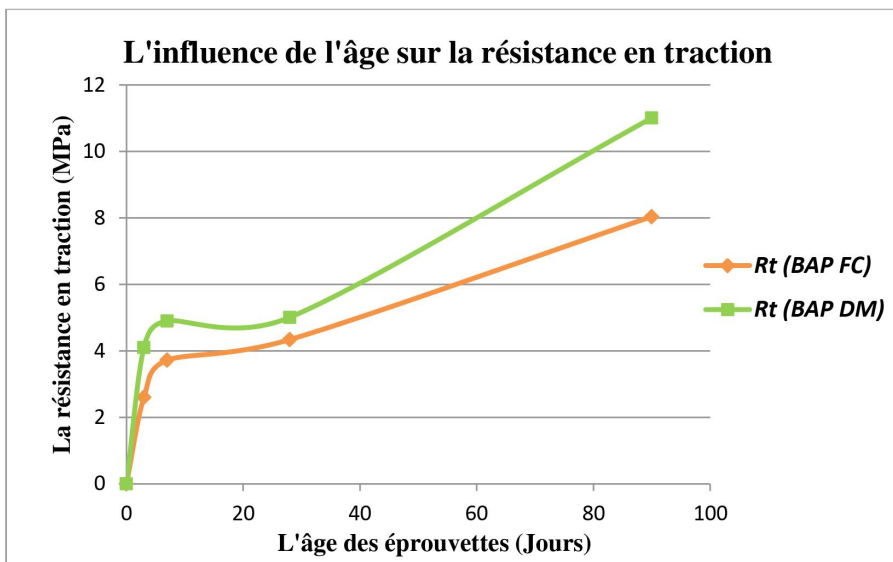


Figure IV. 13: Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps de (BAP FC) Et (BAP DM).

La figure IV. 13, montre que l'évolution de la résistance à la traction par flexion augmente avec l'âge des éprouvettes.

En ce qui concerne la résistance à la traction par flexion de béton (BAP DM) l'augmentation de cette résistance entre 3 jours et 7 jours (81% et 97% respectivement) par rapport à la résistance à moyen terme à 28 jours, ce qui montre que plus 80% de la résistance à la traction par flexion est acquise pendant les 7 premiers jours.

Entre 28 jours et 90 jours, l'hydratation de béton (BAP DM) affiche un gain de 6 MPa en plus. En d'autres termes, une augmentation de (55%) par rapport à moyen terme (tableau IV. 25), ce qui montre que l'hydratation du ciment est perturbée par l'introduction des fines des déchets de marbre.

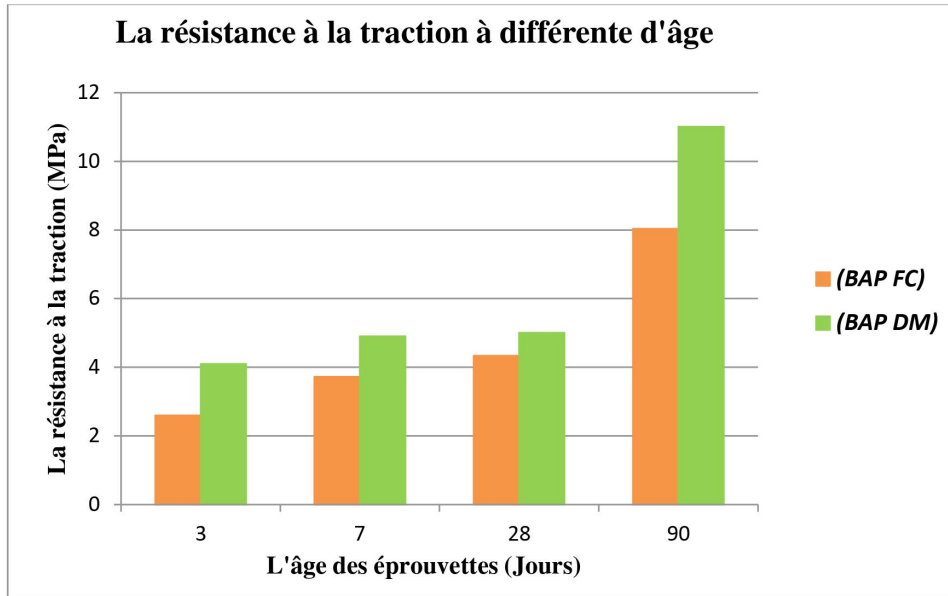


Figure IV. 14: Comparaison entre la résistance à la traction par flexion de (BAP FC) et (BAP DM) en fonction de temps.

D'après l'histogramme de la figure IV.14 on remarque une augmentation de résistance à la traction de béton à base des déchets de marbre (BAP DM) à 3 jours, 7 jours et 28 jours de (1,5MPa, 1,18MPa, 0,68MPa, respectivement) par rapport au (BAP FC), cette augmentation est remarquable à long terme pour atteindre au 90 jours 3 MPa.

IV.5.3. Bilan :

Ce travail a porté essentiellement sur l'étude de la possibilité de récupération des déchets de marbre dans la confection des BAP. L'étude présente une démarche expérimentale de remplacer les fines des fillers de calcaires par les fines des déchets de marbre et analyser les propriétés mécaniques à l'état frais (l'étalement, ségrégation dynamique, ségrégation statique, air occlus, densité, le temps d'écoulement) et à l'état durci (la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion) des BAP obtenus (BAP DM), en les comparant à celles d'un (BAP FC)

(de référence). Les résultats obtenus ici permettent alors d'envisager l'utilisation des fines des déchets de marbre comme addition dans les bétons autoplaçants.

Donc à travers cette étude, nous avons mis en évidence :

La possibilité de formuler des BAP avec des additions minérales économiques (avantage éco-environnemental), tel que les déchets de marbre, et nous permet de voir que même si le volume de pâte est le même dans tous les bétons, les caractéristiques mécaniques et physiques changent avec la nature des additions.

IV.6. CONCLUSION:

Cette étude apporte un éclairage sur la valorisation des déchets de marbre comme addition pour la formulation des bétons autoplaçants.

La composition et le comportement à l'état frais des BAP sont plus complexes que celle d'un béton traditionnel. En effet, leur composition spécifique nécessite la mise en place d'un contrôle soutenu de leur formulation, ainsi qu'un contrôle de leurs propriétés à l'état frais, avant la mise en œuvre. Selon l'analyse précédente on peut qualifier que le béton à base des déchets de marbre (BAP DM) répond aux exigences d'une bonne fluidité, une stabilité accrue et une capacité de remplissage satisfaisante, (satisfait les conditions de L'AFGC à l'état frais).

Une première remarque pourrait être faite sur les performances obtenues par les bétons autoplaçants à base des déchets de marbre (BAP DM). Il est visible que l'on obtient de bon béton en termes de résistances mécaniques (la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion) par rapport le BAP à base des fillers calcaires (BAP FC), qui sont dues essentiellement à la présence d'une quantité importante des fines des déchets de marbre comme addition dans les (BAP DM), qui peuvent également avoir une action positive sur leurs compacités et par conséquent donne une matrice homogène, afin de favoriser l'amélioration des qualités mécaniques et de la durabilité du béton durci, Cela nous conduit à conclure que les déchets de marbre sont aptes à être utilisés comme addition dans la confection des bétons autoplaçants.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les bétons autoplaçants (BAP) constituent une nouvelle avancée pour la construction en béton et ils offrent en cela des avantages aussi bien d'ordre économique, technique que sociaux. L'absence de vibration qui caractérise leur mise en place permet en effet de réduire les coûts globaux de production, de construire des éléments à géométrie complexe ou fortement ferraillés et également de réduire les nuisances sonores et la pénibilité du travail qu'ils nécessitent.

Ce travail a porté essentiellement sur l'étude de la possibilité de récupération des déchets de marbre dans la confection des BAP, en effet la formulation du (BAP) nécessite de grande quantités des fines afin d'améliorer la fluidité sans entrainer de ressuage et/ou de ségrégation. Notre étude présente une démarche expérimentale suivie, en remplaçant les fines des fillers calcaires par les fines des déchets de marbre qui sont disponibles en quantité et à moindre coût dans notre pays ce qui illustre l'impact économique et environnemental favorable. La base de cette démarche est de déterminer les performances de cette composition qui permet de comprendre le comportement des additions des déchets de marbre dans le BAP, et le comparant à celles d'un BAP à base des fillers calcaires. En d'autres termes, la possibilité de formuler des BAP avec des additions minérales économiques (avantage éco-environnemental), tel que les déchets de marbre.

L'objectif de ce travail de thèse était donc de donner une réponse claire à deux questions majeures: Ainsi, le premier objectif sur la valorisation des déchets de marbre comme additions et évaluer les conséquences de ces fines non seulement dans les compositions des BAP mais aussi sur leurs propriétés mécaniques et physiques à l'état frais et durci. Le deuxième objectif était de chercher à comparer les performances des BAP à base des déchets de marbre à l'état frais et durci à celles des BAP à base des fillers calcaires.

Nous avons pu remarquer que dans la littérature il existe un nombre important de méthodes et approches de formulation des bétons autoplaçants et différents essais de caractérisation de ce nouveau type de béton.

Nous avons pu constater aussi que le nombre d'essais permettant la caractérisation de la

fluidité, de la capacité de remplissage et la ségréabilité diffère d'un pays à un autre. Presque tous les laboratoires de recherche recensés dans le monde ont leur propre technique de caractérisation.

Nous avons présenté un travail de formulation des bétons autoplacants en utilisant la méthode Japonaise. Parce qu'elle est sécuritaire conséquence de dosage de pâte élevé. Et elle ne nécessite pas d'outil informatique et sa procédure de réalisation est très simple.

De nombreuses mesures ont été exposées pour la caractérisation des BAP obtenus à l'état frais (l'étalement, ségrégation dynamique, ségrégation statique, air occlus, densité, le temps d'écoulement). A l'état durci, une caractérisation classique des mélanges (résistances mécaniques : à la compression et traction /flexion) a été réalisée sur des éprouvettes respectivement cylindriques de 10x20 cm et prismatiques de dimensions 7x7x28 cm, sous des conditions de conservation de $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$, $HR=55 \pm 5\%$ jusqu'à l'âge d'écrasement de 3-7-28 jours et 90 jours.

Notre étude a porté sur l'analyse de l'influence des fines des déchets de marbre sous forme d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques et physiques à l'état frais et durci de BAP à base de matériaux locaux (BAP DM), comparées à celles de BAP à base de fillers calcaires comme addition (BAP FC). Pour répondre à ces objectifs, nous avons commencé par définir les formulations de ces bétons, à partir des matériaux identiques, les mêmes compositions (les composantes pulvérulents, proportions granulaires similaires) avec un ajustement sur la quantité d'eau et de superplastifiant pour atteindre un BAP et ne diffèrent que par la nature des additions.

Les deux formulations ont été ensuite caractérisées à l'aide d'essais spécifiques pour vérifier leurs aptitudes à remplir le cahier des charges imposé pour un BAP à l'état frais : (l'étalement, ségrégation dynamique, ségrégation statique, air occlus, densité, le temps d'écoulement).

Une première remarque pourrait être faite sur les performances obtenues par le béton autoplacant à base des déchets de marbre (BAP DM). Il est visible que l'on obtient de bon béton en termes de résistances mécaniques (la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion) par rapport au BAP à base de fillers calcaires (BAP FC). Ce qui

nous permettons de voir que même si le volume de pâte est le même dans les deux bétons, les caractéristiques mécaniques changent avec la nature des fines.

D'après les résultats obtenus, on estime finalement que les deux compositions sont des BAP car elles satisfont les critères d'un BAP selon [AFGC 2000].

On remarque que les deux additions (fillers calcaires, déchets de marbre) qu'on a utilisés pour la confection des bétons (BAP FC) et (BAP DM) sont dérivées du calcaire, ils ont une densité en moyenne de 2,7 et ont une même dimension d'ordre (20microns).

On peut constater que les fines des déchets de marbre demandent plus d'eau que les fillers calcaires, par conséquent pour assurer le dosage de saturation des constituants de béton (BAP DM), il est nécessaire d'ajuster la quantité d'eau et de superplastifiant pour atteindre un bon BAP.

A travers cette étude, nous avons mis en évidence :

L'utilisation et la valorisation des fines des déchets de marbre dans un BAP qui satisfait les conditions de l'AFGC à l'état frais et donne de bon béton en termes de résistances mécaniques par rapport au béton de référence (BAP FC).

Cela nous conduit à conclure que les déchets de marbre sont aptes à être utilisés dans la confection des bétons autoplaçants comme addition, quant à leurs aspects économiques une étude technico-économique est nécessaire.

A la fin, cette recherche a ouvert la porte à des recherches nouvelles qui doivent s'intéresser à la valorisation des sous produits dans la confection des bétons autoplaçants (BAP).

Ce travail ouvre différentes perspectives :

- Etude de la microstructure.
- Influence d'autres paramètres de composition et d'environnement.
- Etude de quelques comportements de ce nouveau type de béton, il serait intéressant

d'étudier d'autres propriétés à l'état durci : comportement différé, la tenue au feu et durabilité dans des milieux chimiquement agressifs, résistance au gel/dégel...

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	I
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX	VIII
LISTE DES PHOTOS	X
LISTE DES NOTATIONS ET DES ABREVIATIONS	XI
INTRODUCTION GENERALE	01
PARTIE 1: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	
Chapitre I : LES BETONS AUTOPLAÇANTS	
I.1. HISTORIQUE :	04
I.2. INTRODUCTION :	05
I.3. UTILISATION DE BAP :	05
I.4. CONCEPT DU BAP :	07
I.5. INFLUENCE DES PARAMETRES DE COMPOSITION SUR LE COMPORTEMENT DE BAP :	09
I.5.1. Influence des additions minérales sur les propriétés de BAP :	09
I.5.2. Influence des ajouts chimiques sur les propriétés des BAP :	10
I.5.3. Influence du volume de pâte sur les propriétés des BAP :	10
I.5.4. Influence des granulats sur les propriétés des BAP :	11
I.5.5. Influence le rapport E/C sur les propriétés des BAP :	11
I.6. MODES DE FORMULATIONS DES BAP :	12
I.6.1. Les approches de formulation :	12
I.6.1.1. Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers :	12
I.6.1.2. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte :	12
I.6.1.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire :	13
I.6.2. Comparaisons des approches :	14
I.6.3. Particularités de la composition des BAP:	14
I.6.3.1. Un volume de pâte élevé :	14
I.6.3.2. Une quantité de fines ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante :	15
I.6.3.3. L'emploi de superplastifiants :	15
I.6.3.4. L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau) :	16
I.6.3.5. Un faible volume de gravillon :	18
I.7. PROPRIETES DU BAP A L'ETAT FRAIS :	19
I.7.1. Mobilité en milieu non confiné :	20
I.7.1.1. L'essai de l'étalement :	20
I.7.1.2. L'essai de l'entonnoir en forme de V«V-Funnel» :	21
I.7.2. Mobilité en milieu confiné :	22
I.7.2.1. L'essai de la boîte en L «L-Flow Meter» :	22
I.7.3. Stabilité :	22
I.7.3.1. L'essai de stabilité au tamis(résistance à la ségrégation) :	22
I.7.3.2. L'essai de ressuage:	24
I.7.4. Les essai complémentaire sur BAP frais :	25
I.7.4.1. Mesure de la teneur en air occlus :	25
I.7.4.2. La masse volumique :	26
I.8. PROPRIETES DU BAP A L'ETAT DURCI :	26

II.8.3.1. Décharge:	46
II.8.3.2. Incinération:	47
II.8.3.3. Compost et fermentation:	48
II.8.3.4. Traitement biologique et mécanique:	49
II.8.3.5. Pyrolyse et gazéification:	49
II.9. DECHETS EN ALGERIE :	50
II.9.1. Les lois algériennes concernant les déchets:	52
II.10. DECHETS UTILISES COMME ADDITIONS OU GRANULATS DU BETON :	52
II.10.1. Laitiers:	52
II.10.1.1. Laitiers de haut fourneau:	52
II.10.1.2. Laitiers d'acier:	53
II.10.1.3. Autres laitiers métallurgiques:	53
II.10.2. Sous-produits provenant des centrales thermiques:	54
II.10.2.1. Mâchefer:	54
II.10.2.2. Scories de sole :	54
II.10.2.3. Cendres volantes :	54
II.10.3. Pouzzolanes naturelles :	55
II.10.4. Béton récupéré :	56
II.10.5. Déchets provenant de l'exploitation de mines et de carrières :	57
II.10.5.1. Marbre:	57
II.10.6. Déchets divers :	58
II.10.6.1. Déchets de mines de charbon:	58
II.10.6.2. Verre de récupération:	58
II.10.6.3. Pneus usages:	59
II.10.6.4. Résidus d'incinérateurs:	59
II.10.6.5. Boues rouges:	60
II.10.6.6. Argile cuite:	60
II.10.6.7. Sciure de bois:	61
II.10.6.8. Le lin de textile:	61
II.10.6.9. La céramique:	61
II.10.6.10. Les carrelages:	62
II.10.6.11. Le plastique et le Polyester:	62
II.10.6.12. La brique:	63
II.11. CONCLUSION:	64

PARTIE 2: PLAN EXPERIMENTAL

Chapitre III : CARACTERISATION DES MATERIAUX DE BASE ET METHODOLOGIE D'ESSAIS

III.1. INTRODUCTION :	65
III.2. MATERIAUX DE BASE UTILISES :	65
III.2.1. Les Granulats :	65
III.2.1.1. Caractéristiques Géométriques :	65
a. Analyse granulométrique :	65
b. Module de finesse :	66
c. Mesure de coefficient d'aplatissement des granulats « NF P 18-561 » :	66
III.2.1.2. Caractéristiques Physiques :	67
a. Mesure de la propreté de granulat :	67

b. Détermination de la masse volumique absolue et apparente des granulats :	68
c. Mesure de coefficient d'absorption des granulats « NF P 18-555 » :	68
III.2.1.3. Caractéristiques Mécaniques :	68
III.2.1.4. Composition Chimique Des Granulats :	69
III.2.2. Les Additions :	69
III.2.2.1. Filler Calcaire :	69
III.2.2.2. Déchet de marbre :	70
III.2.2.2.1. Définition :	70
III.2.2.2.2. Le marbre de la carrière de FIL-FILA :	71
➤ Provenance :	71
➤ Carrière à blocs :	72
a. Le principe de fabrication :	72
b. Recyclage des déchets :	72
c. Granulats de rebuts de masse et de blocs de marbre :	73
➤ Carrière dérivée :	73
a. Le principe de fabrication :	73
b. Recyclage des déchets :	73
III.2.3. Ciment :	75
III.2.4. L'adjuvant (Super Plastifiant) «EN934-2» :	76
III.2.5. Eau De Gâchage :	76
III.3. PROGRAMME EXPERIMENTAL :	77
III.3.1. Formulation de béton :	80
III.3.1.1. Principe et application Approche japonaise :	81
a. Dosage des gravillons :	81
b. Dosage du sable :	82
c. Dosage du liant :	82
d. Dosage de l'eau et du superplastifiant :	82
III.3.2. Confection du mélange :	83
III.3.2.1. Malaxage :	83
III.3.3. Caractérisations Des Mélanges :	84
III.3.3.1. Caractérisation a l'état frais :	85
a. Essai d'étalement « Slump Flow » :	85
a.1. Le temps d'étalement T_{50} :	86
b. Essai de la boîte en L :	86
c. Essai d'entonnoir « V-Funnel » :	87
d. Essai de stabilité au tamis :	87
e. Air occlus :	88
g. Densité :	89
III.3.3.2. Caractérisation a l'état durci :	89
a. Essai de compression :	89
b. Essai de traction par flexion :	90
III.3.4. Fabrication des éprouvettes :	90
a. Eprouvettes cylindriques 10x20cm :	91
b. Eprouvettes prismatiques 7x7x28cm :	92
III.3.4.1. Remplissage :	92
III.3.4.2. Conservation :	92
III.3.4.3. Préparation des éprouvettes :	93
III.4. CONCLUSION :	93

**Chapitre IV : ETUDE DES PERFORMANCES DES BAP A BASE DES
ADDITIONS RECYCLEES**

IV.1. INTRODUCTION :	95
IV.2. RAPPEL SUR LES MATERIAUX :	95
IV.2.1. Caracteristiques des materiaux testes :	95
IV.3. METHODOLOGIE D'ESSAIS :	97
IV.4. CONCEPT DES BAP DE REFERENCE A BASE DES FILLERS CALCAIRES:	98
IV.4.1. Étude à l'état frais :	98
a. L'étalement :	99
b. Essai de la boîte en L :	100
c. Essai de l'entonnoir :	102
d. Stabilité au tamis:	103
e. L'air occlus :	105
f. La densité :	106
IV.4.2. Étude à l'état durci :	107
a. La résistance à la compression :	107
b. La résistance à la traction par flexion :	108
IV.4.3. Bilan:	110
IV.5. VALORISATION DES DECHETS DE MARBRE POUR LA CONCEPT DES BAP:	110
IV.5.1. Étude à l'état frais :	111
a. L'étalement :	111
b. Essai de la boîte en L :	113
c. Essai de l'entonnoir :	114
d. Stabilité au tamis :	115
e. L'air occlus :	117
f. La densité :	118
IV.5.2. Étude à l'état durci :	119
a. La résistance à la compression :	119
b. La résistance à la traction par flexion :	121
IV.5.3. Bilan :	123
IV.6. CONCLUSION :	124
CONCLUSION GENERALE :	125
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	129

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1	Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP [Bethmont 05].	06
Figure I. 2	Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un (BAP) Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [Turcry 04].	08
Figure I. 3	Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [Billberg 01].	09
Figure I. 4	Dispersion des granulats par excès de pâte [Bouhamou 07].	11
Figure I. 5	Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2) [Oh 99].	13
Figure I. 6	Volume de pâte relatif au BAP est différent de BV [Boukni 08].	15
Figure I. 7	Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment [Boukni 08].	16
Figure I. 8	Interaction entre l'eau et les polysaccharides [Hasni 99].	17
Figure I. 9	Optimisation du dosage agent de viscosité – super plastifiant, d'après [Tangtermsirikuls 91].	17
Figure I. 10	Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [Sedran 95].	18
Figure I. 11	Essai d'étalement.	20
Figure I. 12	Essai de V «V funnel».	21
Figure I. 13	Essai de la boîte en L (L-box test).	22
Figure I. 14	Essai de stabilité au tamis.	24
Figure I. 15	Essai de ressuage à l'aéromètre.	25
Figure I. 16	Mesure de l'air occlus à l'aide d'un aéromètre.	25
Figure I. 17	Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [Gibbs 99].	27
Figure I. 18	Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP (de formulation différente) [Petersson 01].	28
Figure I. 19	Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [Pons 03].	29
Figure I. 20	Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [De Larrard 92].	30
Figure I. 21	Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et cinq BAP [Hu 98].	31
Figure I. 22	Retraits endogène et totales d'un béton vibré et deux BAP 60 Mpa [Pons 03].	31
Figure I. 23	Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et cinq BAP [Hu 98].	32
Figure I. 24	Profondeur de carbonatation des BAP (SCC) et des bétons vibrés de même rapport E/C [Hasni 99].	33
Figure I. 25	Perte de masse de deux BAP et d'un béton vibré pendant un test d'écaillage (NF P 18-420) D'après Rougeau 99 [Assié 04].	34
Figure I. 26	Les propriétés résiduelles des BAP [Person 03].	35
Figure I. 27	les propriétés résiduelles des BAP et de BV à 20°C [Person 03].	35
Figure III.1	Organigramme des expériences réalisées Principales étapes de l'étude expérimentale.	78

Figure III. 2	Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité [Benkechke08].	81
Figure III. 3	Temps de malaxage.	84
Figure IV. 1	Les essais réalisés.	98
Figure IV. 2	Evolution de la résistance à la compression dans le temps de (BAP FC).	108
Figure IV. 3	Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps de (BAP FC).	109
Figure IV. 4	Comparaison entre l'étalement de (BAP FC) et (BAP DM).	112
Figure IV. 5	l'étalement en fonction de T_{50} .	113
Figure IV. 6	Comparaison entre le taux de remplissage de (BAP FC) et (BAP DM).	114
Figure IV. 7	Comparaison entre le temps d'écoulement de (BAP FC) et (BAP DM).	115
Figure IV. 8	Comparaison entre la stabilité au tamis de (BAP FC) et (BAP DM).	116
Figure IV. 9	Comparaison entre l'air occlus de (BAP FC) et (BAP DM).	118
Figure IV. 10	Comparaison entre la densité réelle et la densité théorique de (BAP FC) et (BAP DM).	119
Figure IV. 11	Evolution de la résistance à la compression en fonction le temps de (BAP FC) Et (BAP DM).	120
Figure IV. 12	Comparaison entre la résistance à la compression de (BAP FC) et (BAP DM) en fonction de temps.	121
Figure IV. 13	Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps de (BAP FC) Et (BAP DM).	122
Figure IV. 14	Comparaison entre la résistance à la traction par flexion de (BAP FC) et (BAP DM) en fonction de temps.	123

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1	Les propriétés essentielles des BAP frais [Khayat 96].	19
Tableau III. 1	Les résultats de l'analyse granulométrique, module de finesse et le coefficient d'aplatissement.	67
Tableau III. 2	Caractéristiques physiques des granulats utilisés.	68
Tableau III. 3	Caractéristiques mécaniques des granulats utilisés.	69
Tableau III. 4	Caractéristiques chimiques des granulats utilisés.	69
Tableau III. 5	Composition chimique du fillers calcaire.	70
Tableau III. 6	Caractéristiques physiques des fillers calcaire.	70
Tableau III. 7	Caractéristiques pétrographiques-minéralogiques, physico-mécanique et chimiques de marbre de la carrière de FIL-FILA.	74
Tableau III. 8	Composition chimique du clinker.	75
Tableau III. 9	Composition minéralogique du clinker.	75
Tableau III. 10	Propriétés physiques du ciment.	75
Tableau III. 11	Résistances mécaniques du ciment (bars).	75
Tableau III. 12	Les caractéristiques de SP 40.	76
Tableau III. 13	Les résultats de l'analyse chimique effectuée sur l'eau utilisée.	77
Tableau III. 14	Différents compositions utilisées dans la recherche.	79
Tableau III. 15	Les différentes mesures effectuées pour la caractérisation de BAP.	80
Tableau III. 16	Caractérisation classique des mélanges.	80
Tableau III. 17	Composition en mètre cube des mélanges.	83
Tableau III. 18	Les éprouvettes utilisées pour performances mécaniques.	91
Tableau IV. 1	Différents compositions utilisées dans la recherche.	96
Tableau IV. 2	Formulation les deux types de BAP kg/m ³ .	96
Tableau IV. 3	Les résultats de l'étalement (BAP FC).	99
Tableau IV. 4	Résultats tirés de la littérature (l'étalement et le T ₅₀).	100
Tableau IV. 5	Les résultats de la boîte en L (BAP FC).	101
Tableau IV. 6	Résultats tirés de la littérature (la boîte en L).	102
Tableau IV. 7	Les résultats de temps d'écoulement (BAP FC).	102
Tableau IV. 8	Résultats tirés de la littérature (le temps d'écoulement).	103
Tableau IV. 9	Les résultats de stabilité au tamis (BAP FC).	104
Tableau IV. 10	Résultats tirés de la littérature (stabilité au tamis).	105
Tableau IV. 11	Les résultats d'air occlus (BAP FC).	105
Tableau IV. 12	Résultats tirés de la littérature (d'air occlus).	106
Tableau IV. 13	Les résultats de la densité (BAP FC).	106
Tableau IV. 14	Résultats tirés de la littérature (de la densité).	107
Tableau IV. 15	Résistances à la compression sur cylindres 10x20 en MPa (BAP FC).	107
Tableau IV. 16	Résistances à la traction par flexion sur prismes 7x7x28 en MPa(BAP FC).	109
Tableau IV. 17	Caractéristiques physiques des déchets de marbre.	110
Tableau IV. 18	Les résultats de l'étalement (BAP DM).	111
Tableau IV. 19	Les résultats de la boîte en L (BAP DM).	113
Tableau IV. 20	Les résultats de temps d'écoulement (BAP DM).	114
Tableau IV. 21	Les résultats de stabilité au tamis (BAP DM).	115
Tableau IV. 22	Les résultats d'air occlus (BAP DM).	117
Tableau IV. 23	Les résultats de la densité (BAP DM).	118

Tableau IV. 24	Résistances à la compression sur cylindres 10x20 en MPa (BAP DM).	119
Tableau IV. 25	Résistances à la traction par flexion sur prismes 7x7x28 en MPa (BAP DM).	122

LISTE DES PHOTOS

Photo I. 1	Mesure de la masse volumique réelle.	26
Photo II. 1	Laitier de haut fourneau.	53
Photo II. 2	Mâchefer.	54
Photo II. 3	Cendres volantes.	55
Photo II. 4	Pouzzolanes naturelles.	56
Photo II. 5	Béton récupéré.	57
Photo II. 6	Marbre.	57
Photo II. 7	Verre de récupération.	59
Photo II. 8	Boues rouges.	60
Photo II. 9	Argile cuite.	60
Photo II. 10	Sciure de bois.	61
Photo II. 11	Céramique.	62
Photo II. 12	Carrelage.	62
Photo II. 13	Polyester	63
Photo II. 14	Brique.	63
Photo III. 1	Le filler calcaire utilisé.	70
Photo III. 2	Le déchet de marbre utilisé.	73
Photo III. 3	Le ciment utilisé.	76
Photo III. 4	Malaxageur utilisé.	84
Photo III. 5	Le cône d'Abrams utilisé.	85
Photo III. 6	Mesure du T ₅₀ .	86
Photo III. 7	La boîte en L utilisé.	86
Photo III. 8	V funnel utilisé.	87
Photo III. 9	Le tamis utilisé.	88
Photo III. 10	L'aéromètre utilisé.	88
Photo III. 11	La presse utilisée de compression.	90
Photo III. 12	Dispositif de traction par flexion.	90
Photo III. 13	Eprouvettes cylindriques 10x20cm.	91
Photo III. 14	Eprouvettes prismatiques 7x7x28cm.	92
Photo IV. 1	Essai d'étalement (BAP FC).	99
Photo IV. 2	Essai de la boîte en L (BAP FC).	101
Photo IV. 3	Essai de temps d'écoulement (BAP FC).	102
Photo IV. 4	Essai de stabilité au tamis (BAP FC).	104
Photo IV. 5	Essai d'air occlus (BAP FC).	105

LISTE DES NOTATIONS ET DES ABREVIATIONS

A	Coefficient d'aplatissement
AFGC	Association Française de Génie Civil
BAP	Béton autoplaçant.
BAP FC	Béton autoplaçant à base de fillers calcaires.
BAP DM	Béton autoplaçant à base de fines des déchets de marbre.
BO	Béton ordinaire.
BV	Béton Vibré.
C	Dosage en ciment.
CPJ-CEMII	Ciment portland composé.
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
d	Diamètre d'étalement d'un mortier.
d ₀	Diamètre inférieur du cône pour mortier.
D	Etalement relatif d'un mortier.
E	Dosage en eau. Epaisseur.
E _{ij}	Module d'élasticité.
E _g	Module d'élasticité des granulats.
F	Dosage en fines.
f _{cj}	Résistance à la compression du béton.
G	Dosage en gravillon. Grosueur.
H ₁ , H ₂	Hauteur.
HR	Humidité relative.
H _z	Horizontale
J	Jours.
Kg	Kilogramme.
Kpa	Kilopascal.

L	Liant. Longueur.
M_{VR}	Masse volumique réelle.
M_v	Masse volumique théorique.
m	Masse. Mètre.
MF	Module de finesse.
Mpa	Mica pascal (N/mm^2).
P	Poids du récipient plein.
Rc	Résistance à la compression du béton.
Rt	Résistance à la traction du béton.
P_0	Poids du récipient vide.
S	Dosage en sable. Seconde.
SP	Superplastifiants.
T	Le temps d'écoulement relatif d'un mortier. Température.
t_e	Le temps d'écoulement à l'entonnoir d'un mortier.
UF	Fillers calcaires.
V	Volume du récipient. Verticale.
ρ	La densité.
μm	Micromètre.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[AFGC 00] Association Française de Génie Civil «Bétons autoplaçants-Recommandations provisoires» Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000.

[Assié 04] ASSIÉ S. «Durabilité des bétons autoplaçants»Thèse de doctorat de L'institut nationale des sciences applique de TOULOUSE 2004.

[Baron 96] BARON J. OLLIVIER J.P. «Les bétons, Bases et données pour leur formulation». Eyrolles,

[Benkechkache 08] BENKECHKECHE G. « Étude du comportement différé des bétons autoplaçants »Thèse de magistère, Université Mentouri de Constantine, Novembre 2008.

[Benkechkache 07] BENKECHKECHE G. HOUARI H. BENSEBTI S.CHAABANE A.« Étude du comportement différé des bétons autoplaçants, influence des paramètres de compositions et de chargement» Séminaire National de Génie Civil 20 & 21 Novembre 2007.

[Bensebti 08] BENSEBTI S.E. «Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base des matériaux locaux»Thèse doctorat, Université Mentouri de Constantine, Juillet 2008.

[Bensebti 07] BENSEBTI S. AGGOUNE A. HOUARI H. DUVAL R. «La ségrégation statique dans les bétons autoplaçants, mise en place d'une procédure expérimentale» ANNALS du bâtiment et des travaux publics AVRIL-JUIN 2007-N°2-3.p22-28.

[Bethmont 05] BETHMONT S. «Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP)»Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.

[Billberg 01] BILLBERG P. « Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration»Proceeding of and International Symposium on Self- Compacting Concrete, Tokyo , Japon , pp.285-294, 23-25 octobre 2001.

[Bonnet 04] BONNET S. TURATSINZE A. GRANJU J-L. «Effets de l'incorporation de granulats en caoutchouc, issus du broyage de pneus usagés sur la résistance à la fissuration d'un mortier de ciment»Annales du bâtiment et des travaux publics, décembre 2004-N° 6.

[Bouhamou 07] BOUHAMOU N. BELAS N. MESBAHA H. YAHIA A. MEBROUKI «Comportement à l'état frais des BAP à base des matériaux locaux algériens»ANNALES du bâtiment et des travaux publics Avril- Juin -N° 2-3. p 29, 37.

[Boukni 08] BOUKNI G. «Tenue au feu des bétons autoplaçants»Thèse de magistère, Université Mentouri de Constantine, Novembre 2008.

[Bourmatte 04] BOURMATTE N. «Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques» Thèse de magister, Université Mentouri de Constantine, 2004.

- [Burak 06] **BURAK FELEKOĞLU** «comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete», construction and building material 2006.
- [Collectif 01] Collectif. Revue Française de Génie Civil (Volume 5) «Transferts dans les bétons et durabilité»Hermès, 2001.
- [De larrard 99] **DE LARRAR F. BELLOG A.** « L'influence du granulats sur la résistance à la compression des bétons»Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées ,N°219,Jan-Fév1999,pp 41-52.
- [Domone 06] **DOMONE P.L.**«A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete», Cement Concrete Composites 2006.
- [Dreux 83] **DREUX G. GORISSE F.** «Composition des bétons, méthode Dreux-Gorisse, bilan des cinq années d'application en cotes d'ivoire» Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, N° 441, paris, mai 1983.
- [Dupaing 95] **DUPAING R. LANCHON R. SAINT ARROMAN J-C.** «Granulats, sols, ciments et bétons»Editions Casteilla, 1995.
- [Felekoglu 03] **FELEKOGLU B. SELCUK TURKEL , BULENT BARADAN** «Effet of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete»Building and Environment 2003.
- [Gibbs 99] **GIBBS J.C. ZHU W.**«Strength of hardened self-compacting concrete»Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 199-209, 13-15 septembre 1999.
- [Hasni 99] **HASNI**« Bétons Autoplaçants»rapport de recherche N°98-004/98-006, Fédération Française du Bâtiment 1999.
- [Holcim 04] Recommandation éditée par Holcim «Le béton autoplaçants»Version 26.11. 2004.
- [Hu 98] **HU C. BARBIERI B.,** «Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel»Science des matériaux et propriétés des bétons, pp.265-272,Rencontre Internationale, Toulouse, 5-6 mars 1998.
- [Jacobs 99] **JACOBS F. HUNKLER F.** «Design of self-compacting concrete for durable concrete structure» In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete.RILEM, 1999.
- [Jeremie 01] **JEREMIE D.** «Caractérisation des déchets»Les presses de institut national de l'environnement France, 2001.
- [Josserand 02] **JOSSERAND L.** «Ressuage des bétons hydrauliques»Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2002.
- [Khayat 99] **KHAYAT H.** «Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidation Concrete» ACI Materials Journal. V 96, N°3,May-Jun1999.

[Maillot 01] MAILLOT R. « Mémento technique des granulats » Les presses de l'école des mines, Paris, 2001.

[Menai 95] MENAI K. « Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants » Thèse de maîtrise sciences des appliquées spécialité Génie Civil Université de Sherbrooke, CANADA, Septembre 1995.

[Ministère TP 05] Ministère des Travaux Publics « Valorisation des pneus usagés et les déchets plastiques dans le domaine des travaux publics » Journée scientifique, Novembre 2005.

[Mouli] MOULI M. BENAICHE F. « Pouzzolane de Beni-Saf : Bilan de quelques études » Dept of civil Engineering, ENSET Oran, Algeria, Bp1523 ELM'NAOUER.

[Nagataki 95] NAGATAKI S. FUJIWARA H. « Self-compacting property of highly flowable concrete » Second CANMET/ACI international symposium on advances in concrete technology, Las Vegas ACISP 154-16, pp301-314 Juin 1995.

[Neville 00] NEVILLE A.M. « Propriétés des Bétons » Traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles 2000.

[Oh 99] OH S.G. NOGUSHI T. TOMOSAWA F. « Toward mix design for theology of self-compacting concrete » In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.

[Okamura 00] OKAMURA H. OZAWA K. OUCHI M. « Self-compacting concrete. Structural Concrete » (1):3_17, March 2000.

[Okamura 94] OKAMURA K. OZAWA K. « Self performance concrete in Japan International Workshop on High Performance Concrete » Bangkok Thaïlande P16.

[Okamura 99] OKAMURA H. OUCHI M. « Self-compacting concrete, development, present use and future » In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.

[Ouchi 99] OUCHI M. Edamatsu Y. « A simple évaluation méthode for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete » In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.

[Ozawa 91a] OZAWA K. MAEKAWA K. OKAMURA H. KUNISHIMA M. « Challenge for high performance concrete » Proc. Conf on High Performance Concrete University of Tokyo .p 5-17.

[Persson 03] PERSSON B. « Self-compacting concrete at fire temperatures » Lund Institute of Technology, Division of Building Materials 2003.

[Pimienta 97] PIMIANTA P. DELMOTTE P. « Blocs de construction en granulats recyclés » CSTB MAGASINE N° 109 novembre 1997.

[Pons 03] PONS G. PROUST E. ASSIE S. «Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete» Proceedings of 3 International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 645-645, 17-20 août 2003.

[Proust 02] PROUST E. «Retraits et fluages des bétons autoplaçants: vers une meilleure compréhension des comportements différés» Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2002.

[Ramachandran 81] RAMACHANDRAN V-S. «Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton» CBD-215-F, conseil national de recherches Canada, juin 1981.

[Remond 97] PIMENTA P. REMOND «Béton de déchets, prévenir les risques» CSTB magazine N° 109 novembre 1997.

[Saadani] SAADANI S. «Comportement des bétons à base de granulats recyclés» Thèse de magistère, Université Mentouri de Constantine.

[Sakata 98] SAKATA K. «Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete» CONSEC 98, International Conference 2, pp.2057-2064, Tronso, GB, 1998.

[Sedran 95] SEDRAN T. «Les bétons autonivelants : synthèse bibliographique» Bulletin de liaison du LCPC n° 196.p 53-60.

[Sedran 99] SEDRAN T. «Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants» Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.

[Senebi 04] SENEBI M. «Medium strength self-compacting concrete containing Fly-ash» Modelling using factorial plans, cement and concrete Research, 2004.

[Shi 02] SHI C. WU Y. SHAO Y. RIEFLER M. «Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete» First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, pp. 349-354, 12-13 November 2002.

[Sonebi 99] SONEBI M. BARTOS P.J.M. «Hardened SCC and its bond with reinforcement» Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 275-289, 13-15 septembre 1999.

[Sperandio 01] SPERANDIO K. «Identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en œuvre par les collectivités locales» Thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2001.

[Tangtermsirikul 91] TANGTERMSIRIKUL S. «Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete» In Proceedings of regional symposium on infrastructure development in civil engineering. SC-4, 19-20 December, 1991.

[Turcry 04] TURCRY P. «Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants, Influence de la Formulation» Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes 2004.

[Utsi 03] UTSI S. EMBORG M. CARSWARD J. « Relation with workability and rheological parameters» herd international RILM symposium on self compacting concrete, rilem publication SARL. P.311-22.2003.

[Vieira 03] VIEIRA M. BETTENCOURT A.«Deformability of hardened SCC»Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 637-644, 17-20 août 2003.

[Zhu 05] ZHU , GIBBS «Use of different limestone and chalk powders in self-compacting Concrete» Cement and concrete research, 2005, vol 35, pp1457-1462.