



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## **Université Amar Thelidji- Laghouat**

**Faculté :** Génie Civil et Architecture

**Département :** Génie Civil

### **MÉMOIRE DE MASTER**

**Présenté par :** Saadaoui Saad Eddine

**Domaine :** Sciences et technologies

**Filière :** Génie Civil

**Option :** Matériaux en Génie Civil

### **Thème**

## **CARACTERISATION DES BETON AUTOPLAÇANTS A BASE DE GRANULATS DE GRANITE ET DE PLASTIQUE RECYCLES**

### **Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Benabed Benchaa	Professeur	Président
Djoudi Amina	Maître de conférences A	Examinatrice
Boukhelkhal Aboubakeur	Maître de conférences A	Rapporteur
Benguit Amar	Maître-assistant A	Co-rapporteur

**Promotion : Juin - 2022**

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents, mon très cher père pour tous ses efforts et à la plus douce femme au monde ma mère pour sa patience . Si j'en suis arrivée là, c'est grâce à vous.

A mes frères : Boubakeur , Djamel Eddine , Ahmad

A mes sœurs : Fatima El Zahra , Soumia , Bouthaina

A mes neveux : Iyed , Razane , Maria , Djouri

A ma fiancée

A toute ma famille

A mes collègues à l'université de Laghouat

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma reconnaissance envers mon promoteur Monsieur Boukhelkhal Aboubakeur. Je le remercie pour son aide précieuse, sa grande disponibilité, ses conseils et orientations et sa gentillesse qui m'ont permis de mener à bien ce projet de fin d'étude. Mes remerciements vont également à Monsieur Benguit Amar, mon co-promoteur pour sa contribution et ses encourageants tout au long de la préparation de ce travail.

Je remercie Monsieur Benabed Benchaa, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de mon mémoire de Master. De même, J'adresse mes remerciements à Mademoiselle Djoudi Amina, d'avoir accepté d'examiner ce projet de fin d'étude et de participer au jury de soutenance.

Je remercie également le directeur du Laboratoire de Recherches de Génie Civil de l'Université de Laghouat, ainsi que tout le personnel qui ont assuré le bon déroulement de la partie expérimentale de ce travail par la mise en disposition des matériaux et appareillage nécessaires.

J'adresse mes remerciements au directeur du laboratoire de travaux publics de Sud (LTPS-Laghouat) et à son personnel pour m'avoir facilité l'accès et la réalisation de certains essais au sein de leur laboratoire.

Mes remerciements vont particulièrement à Monsieur Boudali Sahraoui, Technicien à l'organisme national de contrôle technique de la construction – Laghouat, pour sa disponibilité et son aide efficace.

Mes remerciements s'adressent finalement à mes collègues au département de Génie civil à l'université de Laghouat et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce mémoire de Master.



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## **Université Amar Thelidji- Laghouat**

**FACULTE : Génie Civil et Architecture**

**DEPARTEMENT : Génie Civil**

---

### **RESUME DE MEMOIRE DE MASTER**

**Domaine :** Sciences et technologies

**Filière :** Génie Civil

**Option :** Matériaux en Génie Civil

**Thème :**

**Caractérisation des bétons autoplaçants à base de granulats de granite et de plastique recyclés**

**Présenté par :** Saadaoui Saad Eddine

**Encadré par :** Boukhelkhal Aboubakeur et Benguit Amar

**Résumé :**

Ce travail de recherche vise à étudier l'effet individuel et combiné de deux types de granulats recyclés (granite et plastique) sur les propriétés du béton autoplaçant aux états frais et durci. A cet effet, dix compositions ont été préparées dont une de référence qui contient uniquement du sable alluvionnaire (SA), tandis que dans les autres compositions le SA est partiellement substitué (par volume) par le granite recyclé, le plastique recyclé (10, 20 et 30%), et la combinaison granite-plastique (20, 40 et 60%). Les essais réalisés à l'état frais sont l'étalement, l'étalement J-Ring, ségrégation au tamis, masse volumique du béton frais. A l'état durci, les résistances à la compression et à la flexion, la vitesse d'auscultation sonore, l'absorption d'eau par immersion et la résistance à la ségrégation statique ont été également mesurées. Les résultats montrent que l'utilisation des granulats recyclés réduit légèrement la déformabilité et la capacité d'écoulement de BAP. La résistance à la compression est peu affectée par l'incorporation des granulats recyclés. Les bétons autoplaçants à base de granulats de granite et plastiques recyclés absorbent moins d'eau contrairement aux granulats naturels.

**Mots clés :** Béton autoplaçant, granite recyclé, plastique recyclé, déformabilité, ségrégation, résistance, environnement.

## TABLE DE MATIERES

ملخص

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....1

### *Chapitre 1. Revue bibliographique sur le béton autoplaçant et les granulats recyclés*

<b>1.1. Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Définition du béton autoplaçant .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Propriétés principales d'un BAP à l'état frais .....</b>	<b>4</b>
1.3.1. Capacité de remplissage .....	4
1.3.2. Capacité de passage.....	4
1.3.3. Résistance à la ségrégation .....	5
<b>1.4. Domaine d'utilisation du BAP .....</b>	<b>5</b>
<b>1.5. Principaux constituants de béton autoplaçant .....</b>	<b>5</b>
1.5.1. Ciments .....	6
1.5.2. Additions minérales.....	6
1.5.3. Granulats.....	7
1.5.3.1. Volumes des granulats.....	7
1.5.3.2. Formes des granulats.....	7
1.5.3.3. Granulométrie des granulats.....	7
1.5.3.4. Rapport gravillon/sable.....	7
1.5.3.5. Finesse des granulats.....	7
1.5.4. Eau de gâchage.....	7
1.5.5. Adjuvants .....	8
1.5.5.1. Superplastifiant.....	8

1.5.5.2. Agents colloïdaux (agent de viscosité ou agents de cohésion.....)	9
<b>1.6. Le recyclage des granulats .....</b>	<b>9</b>
1.6.1. Granulat de béton démolé .....	9
1.6.2. Granulat de déchets de brique .....	10
1.6.3. Granulat de marbre .....	12
1.6.4. Granulat de céramique.....	13
1.6.5. Granulat de plastique.....	14
1.6.6. Granulat de verre.....	14
1.6.7. Granulat de caoutchouc .....	15

## ***Chapitre 2. Caractérisation des matériaux, formulation et campagne expérimentale***

<b>2.1. Introduction .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2. Caractérisation des matériaux utilisés .....</b>	<b>17</b>
2.2.1. Ciment .....	17
2.2.2. Superplastifiant .....	18
2.2.3. Eau de gachage.....	18
2.2.4. Granulats.....	18
2.2.4.1. Gravillon.....	18
2.2.4.2. Sable.....	18
a. Sable alluvionnaire.....	19
b. Granite recyclé .....	19
c. Plastique recyclé.....	20
<b>2.3. Formulation.....</b>	<b>23</b>
2.3.1. Formulation du mortier autoplaçant .....	23
2.3.2. Formulation du béton autoplaçant .....	24
2.3.2.1. Remplacement du sable alluvionnaire par des granulats recyclés.....	24
<b>2.4. Procédure de malaxage.....</b>	<b>24</b>
2.4.1. Cas du mortier.....	24
2.4.2. Cas du Béton.....	25

<b>2.5. Compagne expérimentale .....</b>	<b>25</b>
2.5.1. Essais sur mortier frais .....	25
2.5.1.1. Essai d'étalement au mini-cône .....	25
2.5.1.2. Essai d'écoulement au mini-entonnoir en V.....	26
2.5.2. Essais sur béton frais .....	27
2.5.2.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams.....	27
2.5.2.2. Essai d'étalement modifié (J-Ring) .....	28
2.5.2.3. Essai de stabilité au tamis .....	29
2.5.2.4. Masse volumique du béton frais.....	30
2.5.3. Confection, démoulage et mode mûrissement des éprouvettes.....	31
2.5.4. Essais effectués sur béton durci .....	32
2.5.4.1. Résistance à la compression.....	32
2.5.4.2. Résistance à la traction par flexion trois points .....	32
2.5.4.3. Vitesse d'auscultation sonique (VAS) : (NF P 18-418) [47].....	33
2.5.4.4. Essai absorption d'eau par immersion totale .....	34
2.5.4.5. Essai de ségrégation statique .....	35

### ***Chapitre 3. Analyse et discussion des résultats***

<b>3.1. Introduction .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2. Essais sur mortiers frais .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3. Essais sur bétons frais .....</b>	<b>37</b>
3.3.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams .....	38
3.3.2. Etalement au J-Ring .....	40
3.3.3. Essai de résistance à la ségrégation.....	41
3.3.4. Masse volumique du béton frais .....	42
<b>3.4. Essais sur bétons durcis .....</b>	<b>43</b>
3.4.1. Résistance à la compression .....	43
3.4.2. Résistance à la traction par flexion 3P .....	44
3.4.3. Vitesse d'auscultation sonique (VAS) .....	45

3.4.4. Absorption d'eau par immersion .....	45
3.4.5. Résistance à la ségrégation statique.....	46
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>49</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>51</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1.</b> Comparaison de la composition d'un BAP et d'un BO .....	6
<b>Figure 1.2.</b> Effets du superplastifiant sur une pâte de ciment [18].....	8
<b>Figure 1.3.</b> Variation de l'étalement en fonction du temps pour différents pourcentages de granulat de béton démolé .....	10
<b>Figure 1.4.</b> Influence de déchets de brique sur la résistance à la compression des mortiers .....	11
<b>Figure 1.5.</b> Variation de l'expansion des mortiers en fonction du taux de substitution de déchets de brique .....	11
<b>Figure 1.6.</b> Influence de différents types de granulats recyclés (brique, marbre, enrobés bitumineux, béton de démolition) sur l'étalement au J-Ring de béton autoplaçant [4] .....	12
<b>Figure 1.7.</b> Effet de substitution du sable et gravier naturels par différents pourcentages de déchets de céramique sur l'affaissement du béton.....	13
<b>Figure 1.8.</b> Effet des granulats de plastique sur l'absorption d'eau du béton .....	14
<b>Figure 1.9.</b> Développement de la résistance à la compression des bétons à base de déchets de verre en fonction de l'âge.....	15
<b>Figure 1.10 :</b> Evolution de la masse volumique du béton à base de granulats de caoutchouc.....	15
<b>Figure 1.11.</b> Variation de la résistance à la compression à 28 jours du béton en fonction du pourcentage en granulats de caoutchouc .....	16
<b>Figure 2.1.</b> Transformation des déchets de granite en granulat .....	20
<b>Figure 2.2.</b> Plastique PEHD recyclé.....	21
<b>Figure 2.3.</b> L'analyse granulométrique.....	21
<b>Figure 2.4.</b> Granulats utilisés.....	22
<b>Figure 2.5.</b> Procédure de malaxage du mortier autoplaçant .....	25
<b>Figure 2.6.</b> Procédure de malaxage du béton autoplaçant .....	25
<b>Figure 2.7.</b> Essai étalement au mini cône pour mortier autoplaçant. ....	26
<b>Figure 2.8.</b> Essai d'écoulement au mini-entonnoir en V.....	26
<b>Figure 2.9</b> Essai d'étalement au cône d'Abrams pour béton autoplaçant.....	27
<b>Figure 2.10 :</b> Essai d'étalement J-Ring .....	29
<b>Figure 2.11.</b> Essai de stabilité au tamis .....	30
<b>Figure 2.12.</b> Mesure de la masse volumique du béton frais.....	31
<b>Figure 2.13.</b> Confection des éprouvettes.....	31

---

<b>Figure 2.14.</b> Détermination de la résistance à la compression.....	32
<b>Figure 2.15.</b> Essai de traction par flexion trois point.....	33
<b>Figure 2.16.</b> Vitesse d'auscultation sonique (VAS).....	34
<b>Figure 2.17.</b> Absorption d'eau par immersion totale. ....	35
<b>Figure 2.18.</b> Découpage des éprouvettes .....	35
<b>Figure 3.1.</b> Variation de l'étalement des bétons autoplaçants en fonction du pourcentage du type et de pourcentage des granulats recyclés .....	39
<b>Figure 3.2.</b> Effet du type et de pourcentage des granulats recyclés sur le temps d'écoulement T50 des bétons autoplaçants .....	39
<b>Figure 3.3.</b> Variation de l'étalement au J-Ring des bétons autoplaçants en fonction du pourcentage du type et de pourcentage des granulats recyclés.....	40
<b>Figure 3.4.</b> Effet du type et de pourcentage des granulats recyclés sur la différence d'hauteurs des bétons autoplaçants.....	41
<b>Figure 3.5.</b> Variation de l'indice de ségrégation des bétons autoplaçants en fonction du pourcentage du type et de pourcentage des granulats recyclés.....	42
<b>Figure 3.6.</b> Effet du type et de pourcentage des granulats recyclés sur la masse volumique du béton frais .....	43
<b>Figure 3.7.</b> Effet du type et de pourcentage des granulats recyclés sur la résistance à la compression des bétons autoplaçants à 28 jours .....	44
<b>Figure 3.8.</b> Variation de la résistance à la flexion des bétons autoplaçants à 28 jours en fonction du type et de pourcentage des granulats recyclés.....	44
<b>Figure 3.9.</b> Effet du type et de pourcentage des granulats recyclés sur la vitesse d'auscultation sonique des bétons autoplaçants à 28 jours .....	45
<b>Figure 3.10.</b> Influence du type et de pourcentage des granulats recyclés sur l'absorption d'eau des bétons autoplaçants .....	46
<b>Figure 3.11.</b> Examen visuel de la ségrégation statique .....	48

**LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau 2.1</b> Propriétés chimiques et physico-mécaniques du ciment utilisé.....	17
<b>Tableau 2.2.</b> Caractéristiques du superplastifiant.....	18
<b>Tableau 2.3.</b> Caractéristiques physiques des gravillons .....	18
<b>Tableau 2.4</b> Granulométrie des sables utilisés.....	22
<b>Tableau 2.5.</b> Propriétés physiques des sables utilisés.....	22
<b>Tableau 2.6.</b> Aptitude d'écoulement en fonction de différence d'étalements [45]....	28
<b>Tableau 3.7.</b> Compositions des mélanges de mortier autoplçant (en masse pour 1 m <sup>3</sup> ).....	37
<b>Tableau 3.8.</b> Compositions des mélanges de béton autoplçant (en masse pour 1 m <sup>3</sup> )..	38

# ***INTRODUCTION GÉNÉRALE***

---

## INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau hétérogène constitué de gravier, de sable, de ciment et de l'eau. Ses qualités architecturales et techniques alliées à son coût relativement faible font de lui le matériau le plus utilisé dans les ouvrages de génie civil. Il est rapporté que chaque seconde sont coulés 190 m<sup>3</sup> de béton dans le monde, soit 6 milliards de m<sup>3</sup> par an ; ce qui en fait le matériau manufacturé le plus utilisé au monde. Toutefois, l'industrie de construction et plus spécialement celle de béton consomme de larges quantités de ressources naturelles, notamment sous forme de granulats (60-70% par volume de béton). En Algérie et comme tout le monde, la demande en granulats est de plus en plus accrue pour répondre aux besoins de la population en termes de logement et des infrastructures routières. Or, l'interdiction d'extraction des matériaux alluvionnaires (Loi N° : 05/12/2005 du 04/08/2005), l'épuisement de certains gisements naturels de granulats et les difficultés de mise en place de nouvelles exploitations de carrières imposent de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement en granulats.

L'industrie des matériaux et produits est toujours accompagnée par des sous-produits ou des déchets qui ont une incidence directe sur l'environnement. Dans certains pays le rejet des déchets solides, provenant par exemple des usines des matériaux de construction et des démolitions des constructions, dans les décharges publiques est strictement interdit. La gestion des déchets solides est une préoccupation socio-environnementale dans le monde. Avec la rareté de l'espace de décharge, l'utilisation des déchets est devenue une alternative intéressante à l'élimination. Le recyclage des déchets industriels et de construction pour la fabrication de nouveaux matériaux de construction est une solution intéressante aussi bien sur le plan écologique que sur le plan économique. Cette approche permet de : (i) résoudre le problème de stockage de déchets, (ii) réduire la pollution de l'environnement, (iii) préserver les ressources naturelles et (iv) réduire le coût de construction.

Ce travail vise à élaborer un éco-béton autoplaçant intégré dans le cadre du développement durable et ce par le biais de la valorisation des déchets de granite et de plastique comme granulats fin.

En plus de l'introduction générale, le mémoire comporte trois chapitres avec une conclusion générale et des recommandations. Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur le béton autoplaçant et les granulats recyclés. Le chapitre suivant est

destiné à la caractérisation des matériaux entrant dans la composition du BAP, nous expliquerons ensuite la méthode de formulation du mortier et béton autoplaçants. Dans la partie expérimentale, on va s'occuper à la réalisation des essais relatifs à la caractérisation du mortier à l'état frais, et du béton à l'état frais et à l'état durci. Dans le dernier chapitre, nous exposons et discutons les différents résultats obtenus. Ce chapitre sera suivi par une conclusion générale dans laquelle est présenté les principaux résultats obtenus. Des recommandations seront données en fin de ce travail pour des futurs travaux envisagés.

## **CHAPITRE 1 :**

# ***REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE BETON AUTOPLAÇANT ET LES GRANULATS RECYCLES***

---

### **1.1. Introduction :**

Les maîtres d'ouvrage, architectes, ingénieurs, entrepreneurs du BTP, fabricants de béton et préfabriquants ont toujours recherché un béton permettant :

- ↪ une mise en place aisée ;
- ↪ un bon remplissage des coffrages et des moules ;
- ↪ un parfait enrobage des armatures ;
- ↪ une forte compacité ;
- ↪ la suppression des opérations coûteuses en main d'œuvre (vibration, tirage à la règle, ragréage, etc.) ;
- ↪ l'allongement du temps d'ouvrabilité ;
- ↪ l'amélioration de la qualité esthétique des parements ;
- ↪ l'augmentation des cadences de production et de la productivité des chantiers et des usines ;
- ↪ la réduction de la pénibilité des tâches des ouvriers ;
- ↪ la réduction des nuisances sonores sur les chantiers ;
- ↪ la diminution des reprises de bétonnage.

Ces objectifs doivent être atteints en conservant à terme pour ce béton des performances comparables à celles d'un béton traditionnel de même caractéristiques. L'expertise acquise lors des travaux de recherche sur les bétons et la maîtrise croissante des nouveaux superplastifiants ont permis la mise au point de nouveaux bétons: les béton autoplaçant (BAP) qui répondent largement à ces exigences. Ces bétons sont très fluides, homogènes, aisé à mettre en œuvre sans vibration, ne ségrégeant pas et présentent des propriétés de résistance et de durabilité supérieures à celles des bétons traditionnels. Cette superfluidité a été rendue possible par l'arrivée sur le marché des dernières générations d'adjuvants superplastifiants qui présentent l'avantage d'augmenter considérablement la dispersion des grains de ciment.

### **1.2. Définition du béton autoplaçant :**

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, qui se mettent en place sans vibration (compaction sous le seul effet de la gravité sans apport d'énergie extérieure). Ces

bétons sont homogènes et stables, et présentent des résistances, des propriétés de durabilité améliorées par comparaison aux bétons traditionnels mis en œuvre par vibration. Ils se distinguent des bétons traditionnels principalement par leurs caractéristiques à l'état frais. Grâce à leur formulation, ils offrent des caractéristiques exceptionnelles de mobilité et de remplissage des coffrages tout en conservant leur homogénéité lors de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois mise en place (absence de ségrégation statique).

### **1.3. Propriétés principales d'un BAP à l'état frais**

Les bétons autoplaçants se comportent comme des fluides plus ou moins visqueux et se mettent en place sans sollicitation. Sur chantier, le test d'affaissement au cône d'Abrams est très utile pour caractériser les bétons ordinaires, alors qu'il n'est utilisé que pour mesurer l'étalement la galette d'un BAP. Or, un seul test ne suffisant pas à prédire la qualité d'un BAP, plusieurs tests ont été développés pour caractériser les propriétés du BAP. Les propriétés générales d'un BAP frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles.

#### **1.3.1. Capacité de remplissage**

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le BAP est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu non confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations (vibrations externe ou interne). Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects puisque le diamètre final atteint par la galette de béton correspond à la capacité de déformation, et le temps de passage à un certain diamètre (à 50 cm de diamètre par exemple) correspond à la vitesse de la déformation du béton.

#### **1.3.2. Capacité de passage :**

La capacité de passage est l'aptitude du béton de passer à travers des sections exigües ou fortement ferraiées sans blocage. Cette propriété dépend de la stabilité du mélange, volume et taille des gravillons et de l'espacement entre les armatures. Un BAP ayant une excellente

déformabilité, mais présentant une mauvaise stabilité aura forcément une ségrégation entre la pâte et les gravillons, ce qui cause le blocage des BAP au voisinage des armatures, et réduit en conséquence leur capacité de passage [1]. Pour éviter ce problème le BAP doit avoir une grande résistance à la ségrégation, ce qui peut être obtenu en réduisant le rapport E/P et/ou en utilisant un agent de viscosité [2].

Le blocage se produit lorsque le contact et la collision entre les particules des gravillons auront lieu auprès des armatures. Ce risque augmente au fur et à mesure que le volume et la taille des gravillons augmentent. Toutefois, pour un ouvrage peu ferrailé (grand écartement entre les armatures), il est possible d'augmenter la taille des gravillons pourvu qu'il donne un béton de caractère autoplaçant.

### **1.3.3. Résistance à la ségrégation**

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [3]. La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension par l'utilisation d'un agent de viscosité ou en augmentant le volume de la pâte au détriment du volume de gros granulat [4].

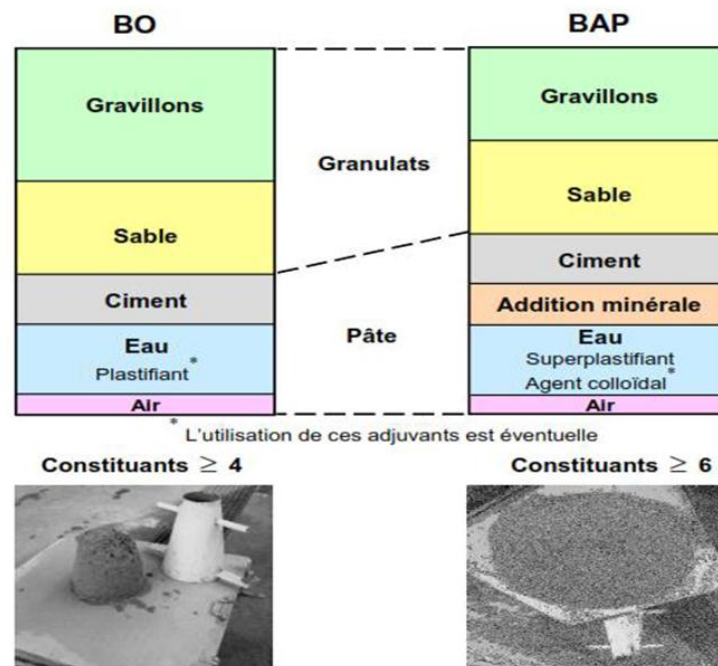
### **1.4. Domaine d'utilisation du BAP :**

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [5]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP tels que les voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains.....etc.

### **1.5. Principaux constituants de béton autoplaçant**

En plus des matériaux constituant du béton conventionnel (gravillons, sable, ciment et l'eau) et pour satisfaire ses propriétés à l'état frais, le BAP contient d'autres éléments qui sont le superplastifiant et les additions minérales. Du fait que le BAP est constitué d'une quantité de fines élevée, son volume d'air est faible. La teneur en eau du BAP est en général proche à

celle du béton courant. Pour minimiser les frottements intergranulaires, le BAP comporte un volume des granulats légèrement faible par rapport au béton conventionnel (Fig. 1.1).



**Figure 1.1.** Comparaison de la composition d'un BAP et d'un BO.

D'une façon générale la composition de béton autoplaçant est basée sur les critères suivants [6] :

- Un volume de pâte élevé
- Une quantité importante de fines
- Un faible volume de gravillons
- Un fort dosage de superplastifiant
- L'utilisation éventuelle d'un agent colloïdal.

### 1.5.1. Ciments

Les ciments qui conviennent mieux à la fabrication de béton sont ceux qui répondent à des exigences plus élevées, telles que haute résistance, délai de décoffrage raccourci. Selon l'EFNARC, tous les ciments qui sont conformes à la norme EN 197-1 peuvent être utilisés dans la production des BAP [7].

### 1.5.2. Additions minérales

Les exigences particulières de fluidité du BAP imposent un dosage en pâte très élevé, raison pour laquelle ce béton comprend en général des additions minérales. La plupart du temps, il s'agit de cendre volante siliceuse ou de fines de calcaire.

### **1.5.3. Granulats :**

Les caractéristiques du BAP spécialement à l'état frais sont largement affectés par le type de granulats, et leurs volume, forme, granulométrie, taille, humidité, finesse ainsi que le rapport Gravillon/Sable (G/S).

#### *1.5.3.1. Volume des granulats :*

Le volume de sable joue un rôle primordial dans le comportement du BAP. Un volume de granulat adéquat donne un béton fluide et homogène. Si le volume de granulat dépasse certaine limite, le contact entre les particules augmente, ce qui conduit à la diminution de la déformabilité de béton [8, 9].

#### *1.5.3.2. Forme des granulats :*

L'utilisation de granulats de forme ronde donne des résultats très satisfaisantes en terme de de déformabilité et capacité de passage (moins d'interaction entre les granulats). Des granulats naturels sont préférables aux granulats concassés, puisqu'ils assurent une meilleure capacité de passage en produisant de faibles frottements interparticulaires. En général, le choix de granulats naturels ou concassés dépend de la disponibilité locale de ces granulats [10].

#### *1.5.3.3. Granulométrie des granulats :*

L'utilisation des granulats de granularité continue est préférable pour la fabrication des BAP car ils permettent d'une part d'obtenir un mélange de meilleure capacité de déformation, et d'autre part d'utiliser une quantité de pâte moins importante pour remplir les vides intergranulaires [11].

#### *1.5.3.4. Rapport Gravillon/Sable :*

Un rapport G/S proche de 1 permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire et de réduire par conséquent la quantité de la pâte liante nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées [9].

#### *1.5.3.5. Finesse de granulats :*

Généralement on utilise des sables avec un module de finesse variant entre 2,4 et 2,8 pour la production des BAP. Cependant, un sable fin est recommandé pour assurer une résistance satisfaisante à la ségrégation [12].

### **1.5.4. Eau de gâchage :**

En référence à la norme NF EN 1008 [13], l'eau de gâchage doit être propre et exempt de toutes impuretés.

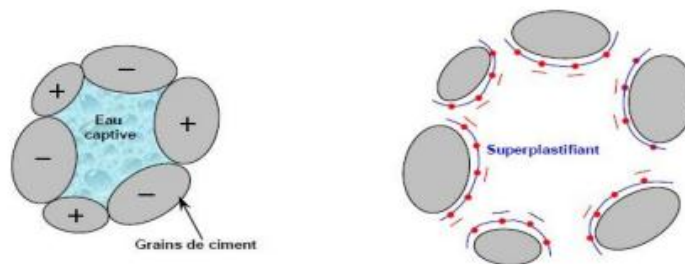
### 1.5.5. Adjuvants :

#### 1.5.5.1. Superplastifiant :

Les superplastifiants (ou superfluidifiants ou encore haut réducteur d'eau) sont des polymères à chaînes-moléculaires très longues. La norme ASTM C494 définit les SP comme " adjuvants à haut pouvoir de réduction d'eau " [14]. Ces adjuvants sont capables de réduire la teneur en eau de 30%, voire de 40% avec la nouvelle génération des SP [15].

Les SP permettent de défloculer les grains de la poudre (ciment + additions fines) au contact de l'eau en agissant par la combinaison d'effets de répulsion électrostatique et stérique [16]. L'effet électrostatique permet de naturaliser les charges électriques présentes à la surface des grains, alors que l'effet stérique engendre l'écartement des grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues [17]. Il en découle que l'eau initialement piégée entre les floccs se retrouve de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange (Fig. 1.2) [18]. Donc, il devient possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, et de produire donc des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place [19].

Le superplastifiant est un adjuvant introduit dans des bétons, mortiers ou coulis peu avant la mise en œuvre en vue d'améliorer l'ouvrabilité du mélange sans avoir recouru à l'ajout d'eau, ou de maintenir une ouvrabilité constante tout en diminuant la quantité d'eau (gain de résistance). Sa fonction secondaire est de modifier le temps de prise en prolongeant la durée pratique d'utilisation de BAP [20].



**Figure 1.2.** Effets du superplastifiant sur une pâte de ciment [18].

#### 1.5.5.2. Agents colloïdaux (agent de viscosité ou agents de cohésion) :

Ce sont généralement de dérivées cellulosiques, de polysaccharides ou de suspensions colloïdales. Leur interaction avec l'eau permet d'augmenter la viscosité de celle-ci [21], et ce grâce aux longues chaînes de polymères qui les composent, et qui se fixent sur les molécules d'eau, et par enchevêtrement augmente sa viscosité. Ces produits sont fréquemment utilisés pour empêcher le délavement à l'état frais des bétons coulés sous l'eau, comme agent de

pompage, pour augmenter la résistance à l'affaissement du béton projeté, pour éviter le ressuage des coulis d'injection [22]. Les agents de viscosité se présentent généralement sous forme de poudre et sont mélangés aux matériaux secs ou avec une partie de l'eau de gâchage. Contrairement aux SP qui diminuent le seuil de cisaillement et la viscosité, les agents de viscosité les augmentent, empêchent le ressuage et limitent le risque de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse.

## **1.6. Le recyclage des granulats :**

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des fleuves et mers. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu. Il s'agit de produits nobles dont l'utilisation pourrait, par exemple, être en tout ou partie remplacée par des granulats recyclés pour la production de différents types de bétons. Comme toute matière première naturelle, les granulats naturels sont limités en quantité et leur extraction n'est pas sans impact sur la faune et la flore, on constate d'ailleurs que les critères d'exploitation deviennent plus stricts [23]. L'utilisation des granulats naturels doit être réservée à des usages plus nobles pour lesquels aucune alternative n'existe.

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

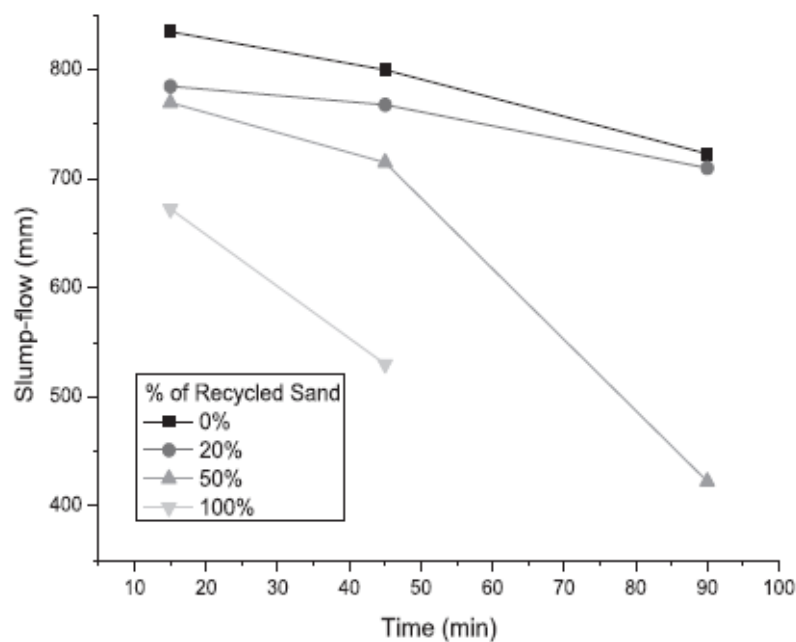
- ✓ réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- ✓ réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- ✓ recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

### **1.6.1. Granulat de béton démoli :**

Le recyclage des matériaux de démolition répond aux soucis de préserver ou d'économiser les granulats naturels pour les besoins de fonctionnement des chantiers. La majorité des applications de granulat recyclés issus de produits de démolition trouvent essentiellement des débouchés dans le domaine routier, mais une meilleure connaissance du comportement des bétons incluant de tels granulats peut contribuer au développement de cette application

[24,25]. Les matériaux de démolition peuvent constituer une alternative économique et écologique intéressante.

De nombreux travaux de recherches qui traitent l'effet de substitution des granulats naturels par des granulats issus des bétons de démolition pour la fabrication de béton hydraulique ont été publiés. La figure 1.3 montre la variation de l'étalement en fonction du temps pour différents taux de substitution de sable naturel par des granulats de béton démolli (GBD) [26]. Les résultats obtenus montrent une nette diminution de l'étalement avec le remplacement du sable par GBD. Cependant, le taux de réduction de l'étalement est plus important pour des taux de remplacement les plus élevés (50 et 100%). Il a été conclu que le mélange de référence et le mélange à base de 20% de GB présentent un comportement à peu près similaire, alors que les mélanges à base de 50 et 100% de GB montrent de fortes réductions particulièrement après 45 min ce qui entraînent une perte du caractère autoplaçant du béton (étalement < 550 mm [27]).

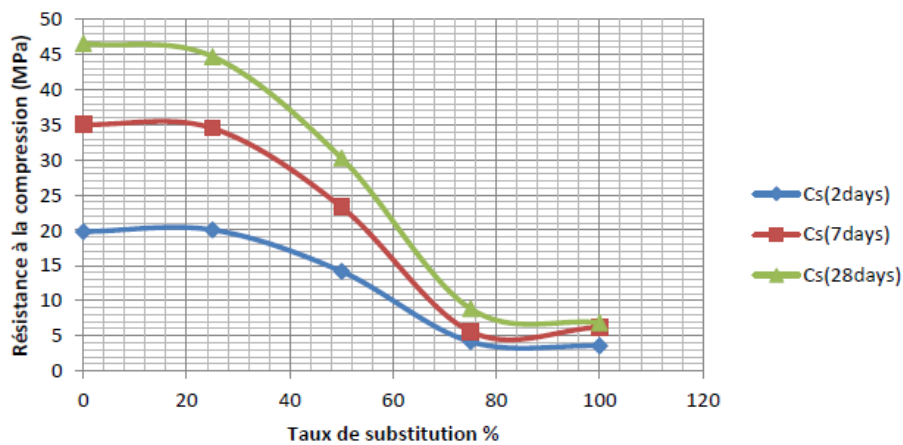


**Figure 1.3.** Variation de l'étalement en fonction du temps pour différents pourcentages de granulat de béton démolli [26].

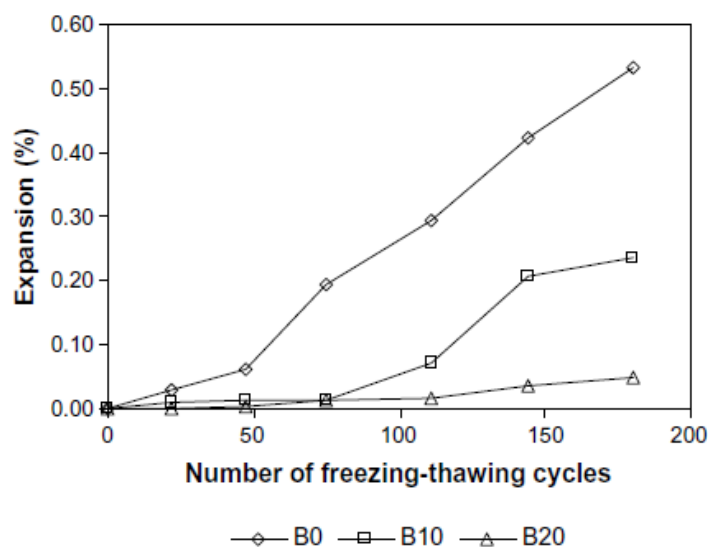
### 1.6.2. Granulat de déchets de brique :

Les déchets de briques sont générés par l'industrie des produits rouges ou obtenus suite aux opérations de réalisation ou de démolition des constructions. Leur quantité est en croissance à cause de la grande consommation de brique et au nombre élevé de briqueteries qui rejettent ce que représente 10 à 15 % de leurs productions (briques non conformes, déformées et cassées)

[28]. Plusieurs études ont montré la possibilité d'utilisation des déchets de brique comme poudre ou granulats pour la production du béton. Bourmatte [29] a conduit un travail expérimental en vue d'étudier les caractéristiques des bétons hydrauliques à base de granulats recyclés. La figure 1.4 présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers à 2, 7 et 28 jours en fonction de différents taux de substitution de sable par déchets de brique. La résistance diminue avec l'augmentation de la quantité de déchets de brique. Un mortier contenant 25% de déchets de brique présente de meilleures résistances à la compression (identiques à celles du mortier témoin). Bektas et al [30] ont étudié l'effet de brique concassé (comme sable) sur la durabilité vis-à-vis des cycles gel-dégel (Figure 1.5). Les auteurs ont observé une réduction de l'expansion avec l'augmentation du taux de brique concassé.



**Figure 1.4.** Influence de déchets de brique sur la résistance à la compression des mortiers [30].



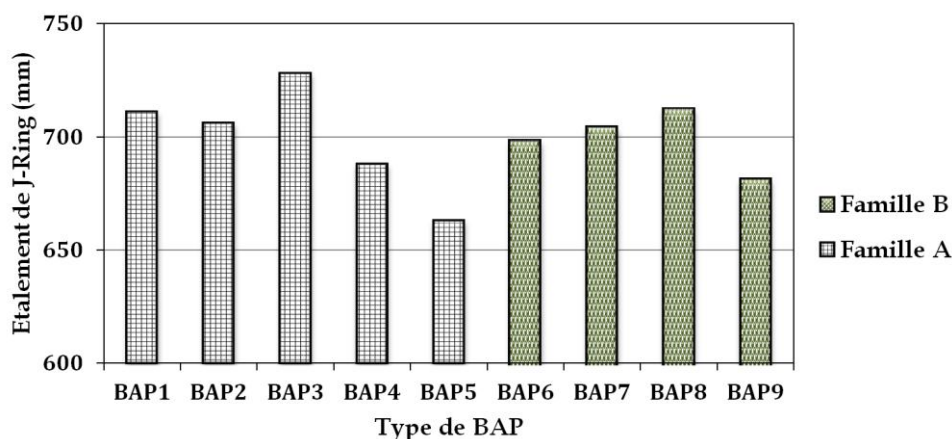
**Figure 1.5.** Variation de l'expansion des mortiers en fonction du taux de substitution de déchets de brique [30].

### 1.6.3. Granulat de marbre :

L'industrie de marbrerie génère annuellement des quantités importantes de déchet. Ces déchets résultent des opérations de sciage, façonnage et lustration de la pierre de marbre [31]. Cette pierre naturelle d'origine calcaire met des années pour sa formation. Elle est caractérisée par sa beauté, sa grande variété et son aspect lisse et brillant qui font d'elle l'une des roches les plus nobles que puisse exister. Chaque marbre a son originalité de par sa composition et de par de ses couleurs. Le marbre est couramment utilisé pour fabriquer des objets esthétiques aussi bien pour les maisons (revêtements muraux, des dallages, éléments sanitaires), les jardins publics que pour l'aménagement des voies.

Lorsque la pierre de marbre est transportée de la carrière de marbrier vers l'usine, elle est découpée en de petites pierres dépendant des dimensions recherchées. Ces petites pierres sont ensuite façonnées et lustrées de telle manière à obtenir la taille et l'aspect souhaités. Pendant ces opérations une quantité importante de marbre qui représente presque 20% à 30% de la matière première est perdue et souvent rejetée dans la nature [32].

L'utilisation de ces déchets est très bénéfique, d'une part pour éviter la pollution de la nature et d'autre part pour protéger et conserver les ressources naturelles fortement consommées par l'industrie de béton. Le recyclage des déchets de marbre dans la fabrication des bétons est très avantageux en termes de coût, de durabilité et d'écologie [33]. Dans son travail, Chaib [4] a examiné l'effet de substitution partielle (50%-BAP6) et totale (100%-BAP2) des granulats naturels par différents types de granulats recyclés (brique, marbre, enrobés bitumineux, béton de démolition) sur l'étalement au J-Ring de béton autoplaçant (figure 1.6). L'auteur a conclu que la substitution du gravier naturel par de déchets de marbre réduit légèrement l'étalement et par conséquent la capacité de passage de béton autoplaçant.

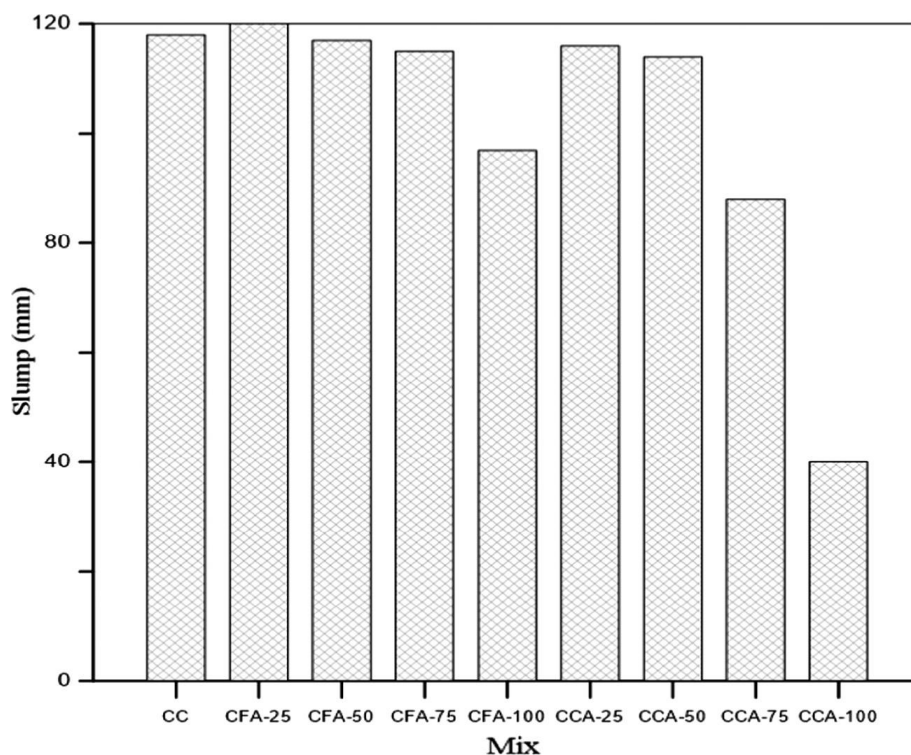


**Figure 1.6.** Influence de différents types de granulats recyclés (brique, marbre, enrobés bitumineux, béton de démolition) sur l'étalement au J-Ring de béton autoplaçant [4].

#### 1.6.4. Granulat de céramique :

La céramique est un matériau constitué d'argile et des aluminosilicates provenant des feldspaths. Le mélange de ces matériaux et son traitement à haute température permet de fabriquer des pièces solides, réfractaires et durables souvent utilisée dans les maisons et les bâtiments comme éléments d'ornements et appareils sanitaires. Senthamarai et Manoharan [34] ont rapporté que la production journalière de céramique génère environ 30% de déchets dont leur non utilisation pose un gros problème environnemental lié à leur dépôt.

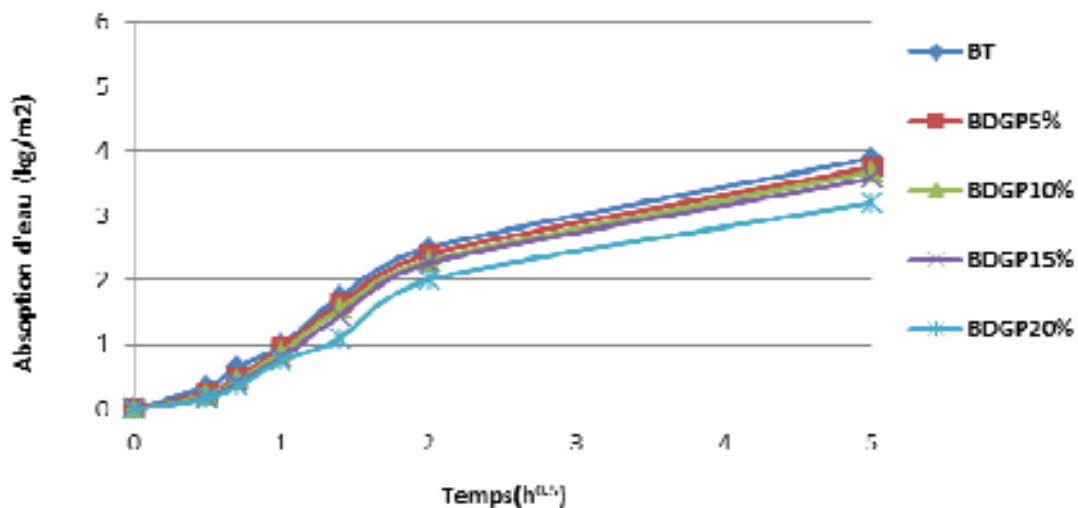
Plusieurs travaux de recherches ont été menés afin d'étudier la possibilité d'utilisation de déchets de céramique comme granulats pour remplacer les granulats naturels ou comme filler pour substituer partiellement le ciment [35-36]. L'effet de substitution du sable et gravier naturels par différents pourcentages de déchets de céramique (25, 50, 75 et 100%) sur l'affaissement du béton a été examiné par Awoyera et al [37], les résultats sont montrés sur la figure 1.7. Les auteurs ont constaté une légère diminution de l'affaissement avec l'incorporation de déchets de céramique jusqu'à 75%. Par contre la substitution totale du sable et gravier naturels par de déchets de céramique cause une réduction remarquable de l'affaissement.



**Figure 1.7.** Effet de substitution du sable et gravier naturels par différents pourcentages de déchets de céramique sur l'affaissement du béton [37].

### 1.6.5. Granulat de plastique :

Les déchets en matières plastiques représentent une part importante des déchets solides municipaux. Ces posent un sérieux problème à cause de leur durée de vie puisque ce sont des déchets voyants. Leur gestion est donc nécessaire que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social. Un travail a été mené pour étudier la possibilité d'utiliser des déchets de bouteilles plastiques (PET-polyéthylène téréphtalate) et des citernes (PEBD -polyéthylène basse densité) dans le béton sans autre transformation que le broyage, afin de minimiser le coût du matériau final [38]. L'influence de la proportion des déchets utilisés sur les caractéristiques physiques et mécaniques du nouveau matériau été étudiée et analysée. L'analyse des résultats issus de l'essai d'absorption d'eau (figure 1.8) montre que l'augmentation du volume de plastiques entraîne une diminution de la quantité d'eau absorbée ce qui permet de fabriquer des bétons plus durable.

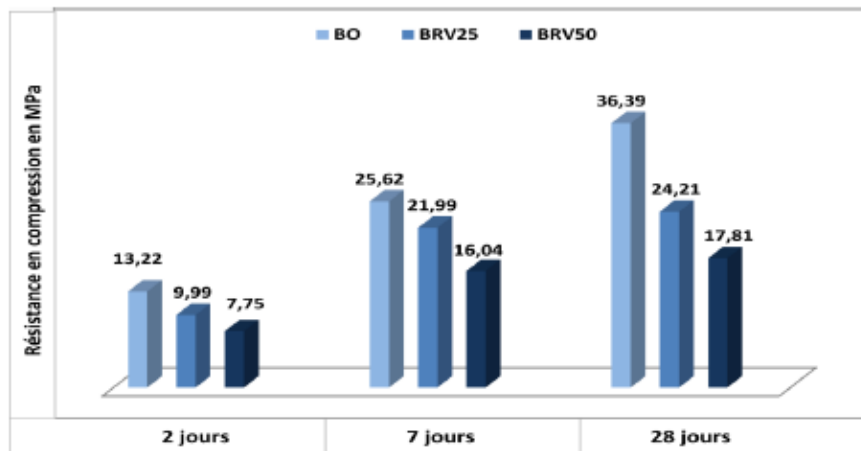


**Figure 1.8.** Effet des granulats de plastique sur l'absorption d'eau du béton [38].

### 1.6.6. Granulat de verre :

Des quantités importantes de déchets de verre sont annuellement jetées par les usines de production des éléments en verre (panneaux, miroirs, tubes et bouteilles), les ateliers de verrerie et les habitants. Ces déchets posent des problèmes multiples à savoir l'aspect dangereux lié à leur collectage et la détérioration de l'environnement liée à leur dépôt. Si ces déchets sont traités et ensuite broyés aux différentes tailles (granulat ou poudre fine), il est possible d'envisager leur utilisation comme un matériau cimentaire ou un granulat pour remplacer partiellement ou totalement le ciment Portland et les granulats. Dans une étude récente [39], l'effet de granulats de verre recyclé sur la résistance à la compression de béton a été traité (Figure 1.9). Les résultats montrent une diminution de la résistance à la compression

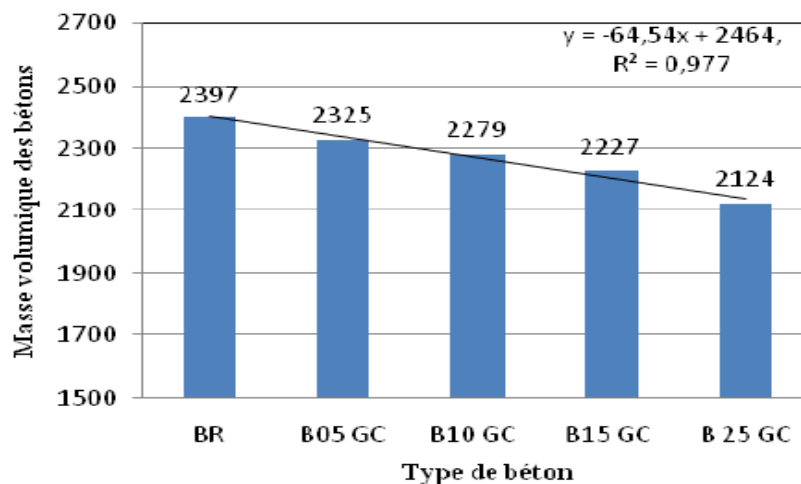
à tous les âges avec l'incorporation de déchets de verre. Cette diminution est plus prononcée à 28 jours. Ceci est probablement dû à la nature fragile du matériau verre.



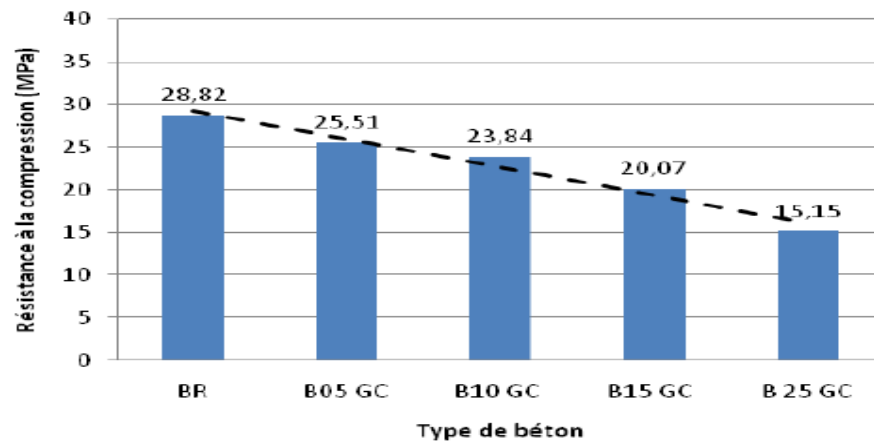
**Figure 1.9.** Développement de la résistance à la compression des bétons à base de déchets de verre en fonction de l'âge [39].

#### 1.6.7. Granulat de caoutchouc :

Le recyclage des déchets du caoutchouc issus des pneus a une grande importance du point de vue environnemental, car ces derniers produisent chaque année d'important flux de déchet, ils représentent une réelle problématique quand on sait qu'un pneu met 400 ans avant de commencer à se dégrader. Plusieurs travaux de recherches qui étudient l'effet de d'utilisation de déchets de caoutchouc comme granulats dans ont été publiés. La figure 1.10 montre que l'incorporation de déchets de caoutchouc conduit à des bétons plus légers [40]. Il a été constaté que l'augmentation du pourcentage de déchets de caoutchouc mène à une diminution quasi linéaire de la résistance à la compression (figure 1.11).



**Figure 1.10.** Evolution de la masse volumique du béton à base de granulats de caoutchouc [40].



**Figure 1.11.** Variation de la résistance à la compression à 28 jours du béton en fonction du pourcentage en granulats de caoutchouc [40].

## **CHAPITRE 2 :**

***CARACTERISATION DES MATERIAUX,  
FORMULATION ET COMPAGNE  
EXPERIMENTALE***

---

## 2.1. Introduction :

L'évaluation des propriétés des pâtes, mortiers et bétons aux états frais et durci nécessitent une bonne connaissance des propriétés physico-mécaniques, thermiques et chimiques de différents matériaux qui leur composent. Nous nous intéressons en premier temps à la caractérisation des matériaux entrant dans la composition de différents mélanges, particulièrement les trios sable utilisés (sable alluvionnaire, granite recyclé et plastique recyclé). On passe ensuite à la description de la méthode de formulation du béton autoplaçant. Enfin, on procèdera à la réalisation des essais relatifs aux mortiers frais et aux bétons à l'état frais et à l'état durci.

## 2.2. Caractérisation des matériaux utilisés :

### 2.2.1. Ciment :

Le ciment utilisé pour la préparation de différents mélanges est un ciment composé Awtad (CPJ ou CEMII) de classe 42,5. Il provient de cimenterie d'El Beidha à Laghouat. Ce ciment est composé majoritairement du clinker avec une proportion de filler calcaire et du gypse. Les propriétés chimique et physico-mécaniques du ciment sont présentées dans le tableau 2.1. Ces propriétés répondent à la norme algérienne NA 442 ainsi que la norme européenne EN 197-1.

**Tableau 2.1.** Propriétés chimiques et physico-mécaniques du ciment utilisé.

Analyse chimique	Perte au feu % (NA5042)	0,5 à 3
	Teneur en sulfate SO <sub>3</sub> %	1,8 à 3
	Teneur en oxyde de magnésium MgO %	1,2 à 3
	Teneur en chlorure (NA5042)	0,01 à 0.05
Propriétés physiques	Consistance normale (%)	25 à 28
	Densité spécifique	3,09
	Finesse (cm <sup>2</sup> /g) (NA231)	3200 à 3800
	Retrait à 28 J (µm/m)	<1000
	Expansion (mm)	< 2,0
	Chaleur d'hydratation (j/g)	< 270
Temps de prise	Début de prise (min)	> 60
	Fin de prise (min)	240 à 400
Résistance à la compression	2 J (MPa)	>10
	28 J (MPa)	>= 42,5

### 2.2.2. Superplastifiant :

Le superplastifiant utilisé tout au long de cette étude est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération Medaflow 30. Cet adjuvant, qui a été fourni par la société Granitex (Alger-Algérie), est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durci. Les caractéristiques de superplastifiant Medaflow 30 sont récapitulées dans le tableau 2.2.

**Tableau 2.2.** Caractéristiques du superplastifiant.

Aspect	Couleur	Densité	pH	Teneur en chlore
Liquide	Brun clair	1,07 ± 0,01	6-6.5	< 0,1 g/l

### 2.2.3. Eau de gâchage :

L'eau utilisée ne doit pas y avoir des effets sur le temps de prise, les résistances et sur les performances des armatures, donc il doit être propre. Dans nos essais l'eau potable de robinet a été utilisée.

### 2.2.4. Granulats :

#### 2.2.4.1. Gravillon :

Le gravillon entrant dans la composition de différents mélanges de BAP est un gravillon concassé d'origine calcaire provenant de la station d'Ouazen à Laghouat. Deux classes de gravillon sont utilisées : 3/8 et 8/15. Les propriétés physiques des granulats sont présentées dans le tableau 2.3. La courbe granulométriques de gravillon est montrée sur la figure 2.3.

**Tableau 2.3.** Caractéristiques physiques des gravillons.

Propriété	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Coefficient d'absorption (%)	4,85	3,48
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2580	
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1360	1325

#### 2.2.4.2. Sable :

Dans cette étude, nous avons utilisé un sable naturel et deux matériaux recyclés (granite et plastique).

**a. Sable alluvionnaire :**

Le sable alluvionnaire est disponible en abondance dans la wilaya de Laghouat (Oued M'Zi). C'est un sable siliceuse de classe granulométrique 0/5.

**b. Granite recyclé :**

Le granite utilisé dans ce travail est un déchet solide fourni par la société de marbre et de granite Gueddouda Allal (Laghouat). La préparation de granite comme granulat fin passe par les étapes suivantes :

- ↪ Collecte de matériau sous forme de morceaux plus ou moins petits (Fig 2.1.a) ;
- ↪ Nettoyage des morceaux (Fig 2.1.b) ;
- ↪ Réduction des dimensions des morceaux par un marteau à main ;
- ↪ Broyage des morceaux moyennant un broyeur à dents (Fig 2.1.c) ;
- ↪ Le produit obtenu (gravillon 8 /15) est broyé pour une 2<sup>ème</sup> fois à l'aide de l'appareil Los Angeles ((5kg de billes + 5kg de matériau) pendant 15 min (Fig 2.1.d) ;
- ↪ Le produit final est tamisé au tamis 5 mm, ce qui permet d'obtenir un matériau de classe 0/5.

**a****b**



c



d



e



f

**Figure 2.1.** Transformation des déchets de granite en granulat fin.

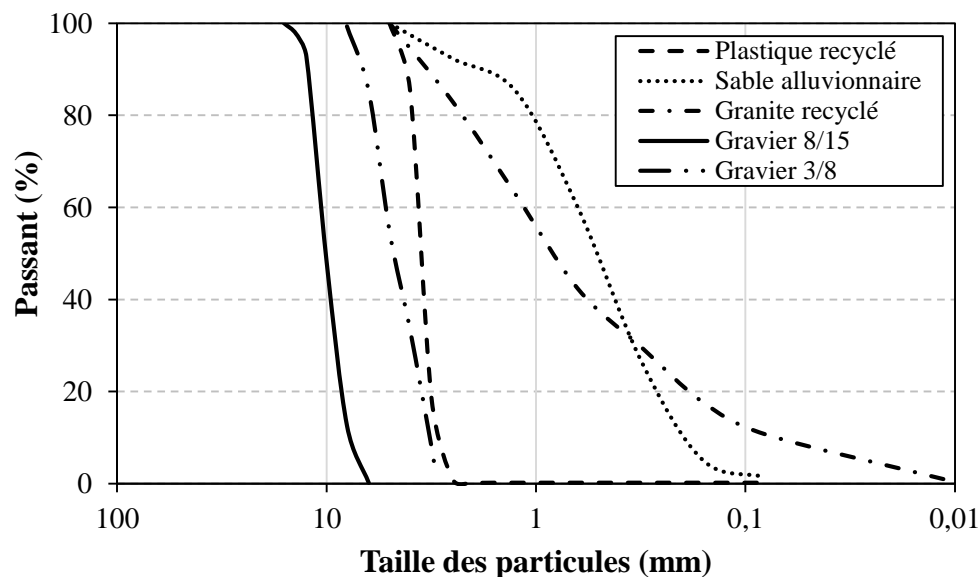
### c. Plastique recyclé :

Le plastique utilisé dans cette étude est de type Polyéthylène haute densité (PEHD), il a été fourni par une société privée Eco-Recyclage.derardja Elkoudous de (Bourdj Bouarerdj). Le matériau est caractérisé par des particules de forme plus ou moins cylindriques multitrouées (Figure 2.2). Sa classe granulométrique est 2/5.



**Figure 2.2.** Plastique PEHD recyclé.

D'après les résultats de l'analyse granulométrique (figure. 2.3), le sable alluvionnaire et le granite recyclé présentent une granulométrie continue et étalée qui sont recommandées pour la production des bétons de bonnes qualités. Le module de finesse de sable alluvionnaire et de granite recyclé est respectivement de 2,20 et 2,65, ces valeurs s'inscrivent dans les limites (2,2 et 2,8) préconisées pour les sables destinés à la composition du béton de structure. Il est à noter que la quantité des fines ( $<100 \mu\text{m}$ ) présentes dans le granite recyclé est de 14% contre 2% pour le sable alluvionnaire le plastique utilisé est caractérisé par une granulométrie serrée avec un module de finesse de 4,98. Les propriétés physiques des sables utilisés sont données dans le tableau 2.5.



**Figure 2.3.** Analyse granulométrique des granulats utilisés.

**Tableau 2.4.** Granulométrie des sables utilisés

	Sable alluvionnaire	Granite recyclé	Plastique recyclé
D <sub>10</sub>	0,20	0,08	3,20
D <sub>30</sub>	0,32	0,32	3,40
D <sub>60</sub>	0,63	1,20	3,70
Cu	3,15	15,00	1,16
Cc	0,79	1,03	0,98
Granulométrie	Étalée	Étalée	Serrée
Matériau	Mal gradué	Bien gradué	Mal gradué

**Tableau 2.5.** Propriétés physiques des sables utilisés

Propriété	Sable alluvionnaire	Granite recyclé	Plastique recyclé
Coefficient d'absorption (%)	0,84	2,44	-
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2620	2720	820
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1500	1390	480
Module de finesse	2,20	2,65	4,98

**Figure 2.4.** Granulats utilisés.

### **2.3. Formulation :**

La formulation du béton est une étape très importante dans le but d'obtenir un béton ouvrable, résistant et durable. En général, la formulation du béton dépend des caractéristiques souhaitées à l'état frais et durci. La formulation des bétons conventionnels dépend de deux caractéristiques qui sont choisies préalablement : la consistance souhaitée et de la résistance caractéristique (28 jours). Pour les BAP, la formulation semble plus complexe, puisque les BAP possèdent des propriétés spécifiques et contradictoires à l'état frais : une grande déformabilité, une grande capacité de passage et une grande résistance à la ségrégation. Ces propriétés doivent être équilibrées pour obtenir un bon BAP [9].

Grace à l'évolution du BAP à travers le monde, de nombreuses méthodes de formulation ont été publiées dont les plus répandues sont méthode générale, méthode Suédoise et méthode Française. La méthode de formulation qui sera utilisée dans le présent travail est la méthode générale dite méthode Japonaise, car elle est simple, et peut produire un BAP de propriétés adéquates à la majorité des applications, d'où son nom général [41]. Par ailleurs, cette méthode présente l'avantage d'être applicable même en utilisant des matériaux locaux, mais à condition de faire quelques modifications notamment au niveau de la teneur en sable [42], Du fait que la rhéologie du BAP est fortement liée à celle du mortier autoplaçant (MAP) et en suivant les étapes de la méthode générale, la formulation du mortier autoplaçant constitue une étape primordiale en vue de confectionner un BAP.

#### **2.3.1. Formulation du mortier autoplaçant :**

Les mortiers autoplaçants sont caractérisés par une grande déformabilité permettant d'assurer l'écoulement sous l'effet gravitaire du BAP, et par une viscosité appropriée pour supporter les gros granulats et éviter tout risque de ségrégation du BAP [9]. Du moment que le mortier occupe un volume important dans les BAP (presque 70% du volume du BAP), les résultats d'essais sur le MAP seront concluants et peuvent donner une grande idée sur le comportement rhéologique du BAP. Selon Jin et Démone [12], des tests sur les mortiers sont réalisés car :

- Le BAP comporte un faible volume de gravillon par rapport au béton ordinaire (31% à 35%), donc les propriétés du mortier sont dominantes ;
- L'évaluation des propriétés du mortier constitue une étape intégrale dans la formulation des BAP ;
- Tester un mortier est plus commode qu'un béton.

Pour la formulation du mortier autoplaçant, et comme mentionné précédemment, on s'est basé sur la méthode générale avec une amélioration au niveau de la teneur en sable, le rapport Eau/Liant (E/L) et le rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L) pour s'adapter aux propriétés des matériaux locaux et en particulier le sable. La sélection du rapport sable/mortier et du rapport Sp/L est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette obtenu doit être compris entre  $270 \text{ mm} \leq d \leq 330 \text{ mm}$ , et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre  $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ secs}$  [9]. Toutefois, les rapports E/L et Sp/L ont été fixés au départ respectivement égaux à 0,4 et 0,5 et ce en se basant sur plusieurs travaux de recherche qui ont été menés sur les MAP et BAP à base de nos matériaux locaux et qui ont permis de fabriquer des mortiers et bétons fluides et homogènes [9, 42, 43].

### **2.3.2. Formulation du béton autoplaçant :**

Une fois que la composition du MAP de référence sera obtenue, on ajoute des gravillons pour composer le BAP de référence conformément à la méthode générale de formulation. Le BAP de référence sera ensuite testé moyennant l'essai d'étalement au cône d'Abrams pour valider le dosage de superplastifiant (SP/L). Le dosage optimal est celui qui donne un mélange avec un étalement entre 65 et 80 cm, et qui ne présente aucun signe visuel de ségrégation ou de ressuage. Dans le cas contraire, le dosage doit être réajusté.

#### **2.3.2.1. Remplacement du sable alluvionnaire par des granulats recyclés :**

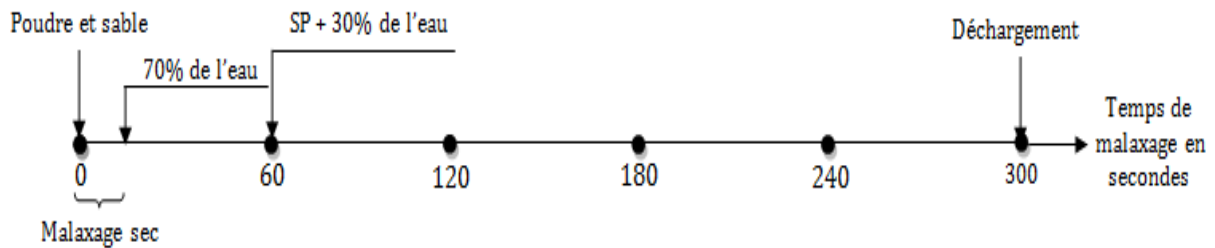
Connaissant la composition finale du BAP de référence, nous pouvons donc aborder la dernière étape dans notre travail, qui consiste à étudier l'effet des granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP. Pour cela, le sable alluvionnaire sera partiellement substitué par des granulats de granite et de plastique avec des pourcentages de 10, 20 et 30%. L'effet combiné des deux granulats recyclés a été examiné pour des taux de substitution de 20, 40 et 60%.

### **2.4. Procédure de malaxage :**

#### **2.4.1. Cas du mortier :**

Après avoir calculé la quantité de chaque élément entrant dans la composition du MAP, on procède à un malaxage sec de la poudre et du sable pendant 15 secondes pour homogénéiser le mélange, on ajoute ensuite 70% de l'eau de gâchage avec un débit régulier dans le reste de la première minute. Durant la minute suivante, on introduit régulièrement le superplastifiant

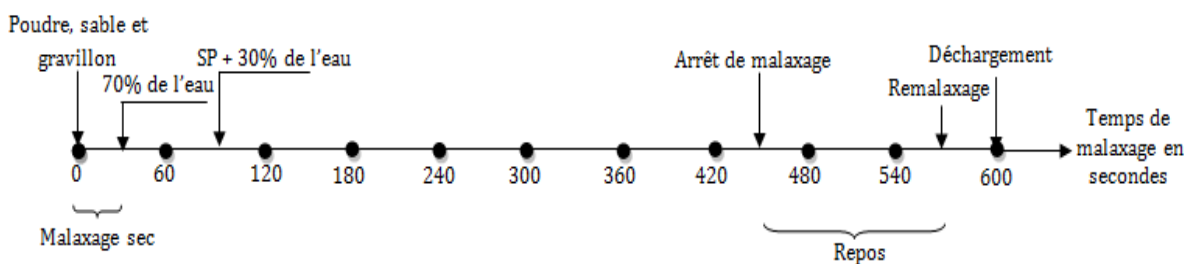
avec l'eau restante (après les avoir mélangés). Le malaxage est continué pendant 3 autres minutes. La figure 2.5 résume toutes ces étapes.



**Figure 2.5.** Procédure de malaxage du mortier autoplaçant.

#### 2.4.2. Cas du Béton :

Un exemple de calcul des quantités des constituants du BAP est donné dans l'annexe B. Une fois que toutes les quantités seront calculées et pesées, on procède à un malaxage sec de la poudre, du sable et des gravillons pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange. Puis on ajoute 70% de l'eau de gâchage avec un débit régulier dans les 60 secondes suivantes. Durant toute la minute suivante, on introduit régulièrement le superplastifiant avec l'eau restante (après les avoir mélangés). Le malaxage est continué pendant 5 autres minutes. Le malaxage est arrêté ensuite pendant 2 minutes, puis recommencé durant 30 secondes avant le déchargement. La figure 2.6 récapitule toutes ces étapes.



**Figure 2.6.** Procédure de malaxage du béton autoplaçant.

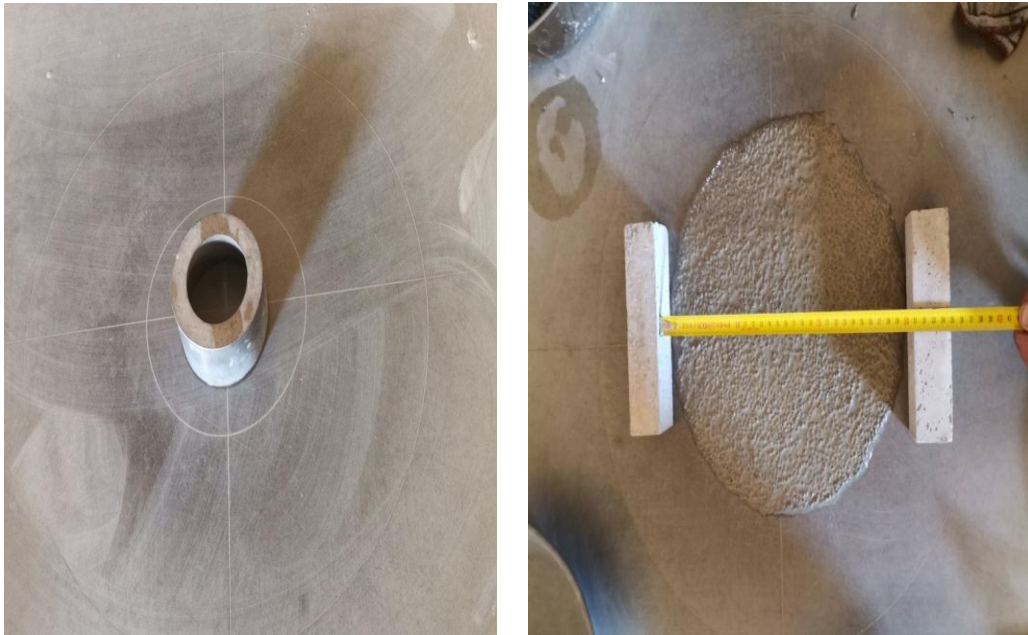
### 2.5. Campagne expérimentale :

#### 2.5.1. Essais sur mortier frais :

##### 2.5.1.1. Essai d'étalement au mini-cône :

L'essai consiste à remplir un mini-cône en mortier autoplaçant, et à le soulever verticalement (Figure. 2.7). Une fois que le cône est enlevé, le mortier s'étale sur la plaque. Après l'arrêt de l'écoulement, on mesure l'étalement selon deux diamètres perpendiculaires  $d_1$

et  $d_2$ . L'étalement final est la moyenne des deux valeurs obtenues. Un contrôle visuel de la galette du mortier peut s'avérer intéressant.



**Figure 2.7.** Essai étalement au mini cône pour mortier autoplaçant.

#### 2.5.1.2. Essai d'écoulement au mini-entonnoir en V :

La méthode consiste à remplir un mini-entonnoir en V en mortier tout en maintenant le clapet qui se situe à la base du mini-entonnoir fermé. Le clapet est ensuite ouvert permettant au mortier de s'écouler au travers l'orifice. Le temps d'écoulement  $T_v$  est le temps qui sépare l'instant de l'ouverture du clapet et l'instant où la lumière du jour devient visible du haut du mini-entonnoir (Fig. 2.8).



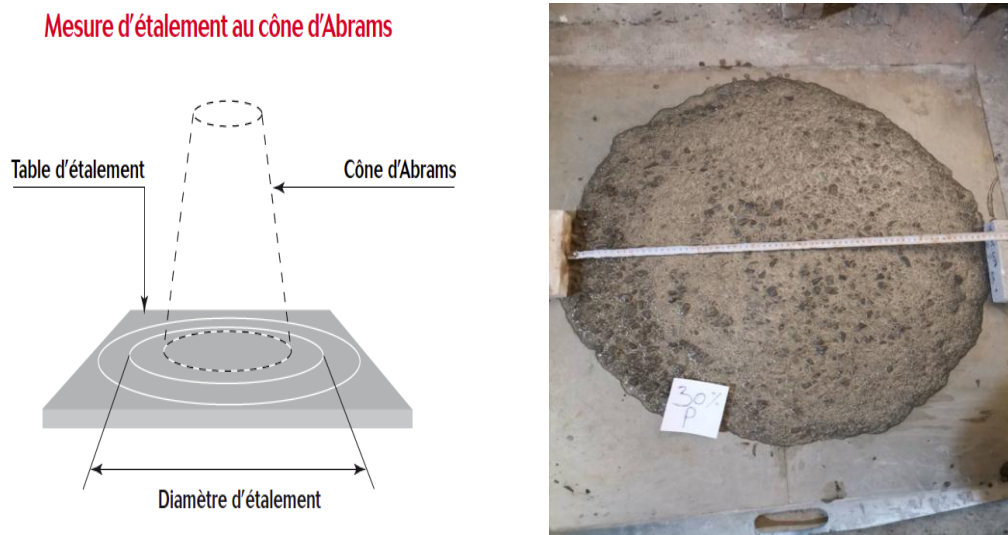
**Figure 2.8.** Essai d'écoulement au mini-entonnoir en V.

## 2.5.2. Essais sur béton frais :

### 2.5.2.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams

L'essai d'étalement est utilisé pour évaluer la déformabilité du BAP en milieu non confiné. La procédure de cet essai est identique à l'essai d'affaissement du béton ordinaire. (Fig. 2.9) Dans l'essai d'affaissement, on mesure la différence d hauteurs entre le cône et le béton, alors que dans l'essai d'étalement le diamètre final d'étalement et le temps d'écoulement  $T_{50}$  sont mesurés. Il est à noter que le temps d'écoulement  $T_{50}$  est le temps que met le béton au cours de son écoulement pour atteindre un cercle de diamètre de 50 cm.

Un grand diamètre d'étalement indique une grande déformabilité et vice versa. Pour obtenir un BAP, des valeurs d'étalement variant entre 65 et 80 cm sont recommandées [7]. Pour le temps d'écoulement  $T_{50}$ , une faible valeur indique une faible déformabilité, tandis qu'une grande valeur indique une grande déformabilité, L'EFNARC [7] recommande des valeurs de  $T_{50}$  bornées par 2 et 5s. La stabilité du BAP peut être évaluée visuellement en observant le processus d'écoulement et les bords de la galette après l'arrêt de l'écoulement. La présence d'une couche de laitance ou l'accumulation de gros granulats au centre de la galette est le signe de ségrégation.



**Figure 2.9.** Essai d'étalement au cône d'Abrams pour béton autoplaçant.

Depuis 2002, différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application.

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm (Structures en béton non armées ou faiblement armées) ;
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm (voiles, poteaux) ;

- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm (structures de formes complexes, ferrailage dense) [7].

#### 2.5.2.2. Essai d'étalement modifié (J-Ring) :

La couronne métallique ou J-Ring est utilisé communément avec le cône d'Abrams pour mesurer la capacité de passage du BAP à travers un milieu confiné (Fig 2.10). Le cône est rempli en béton en une seule fois sans compactage. Lorsque le cône est soulevé, le béton s'écoule à travers des barres de la couronne métallique. La capacité de passage est exprimée par la différence d'hauteurs entre le béton à l'intérieur et à l'extérieur de la couronne. Le diamètre final d'étalement est aussi mesurés (Fig 2.10). La résistance à la ségrégation peut être évaluée visuellement en observant le centre et le périphérique de la galette après l'arrêt de l'écoulement.

La capacité de passage dépend de la différence d'hauteurs, une faible valeur (inférieur à 1cm) de celle-ci est le signe d'une bonne capacité de passage [7], tandis qu'une grande valeur est le synonyme d'une mauvaise capacité de passage. La différence d'étalements avec et sans la couronne donne une indication sur le risque de blocage. Pour éviter ce risque, certains auteurs [44,45] préconisent des valeurs inférieures à 5 cm. Le tableau 2.7 donne des renseignements sur l'écoulement des BAP en fonction de la différence d'étalements sans et avec la couronne [46].

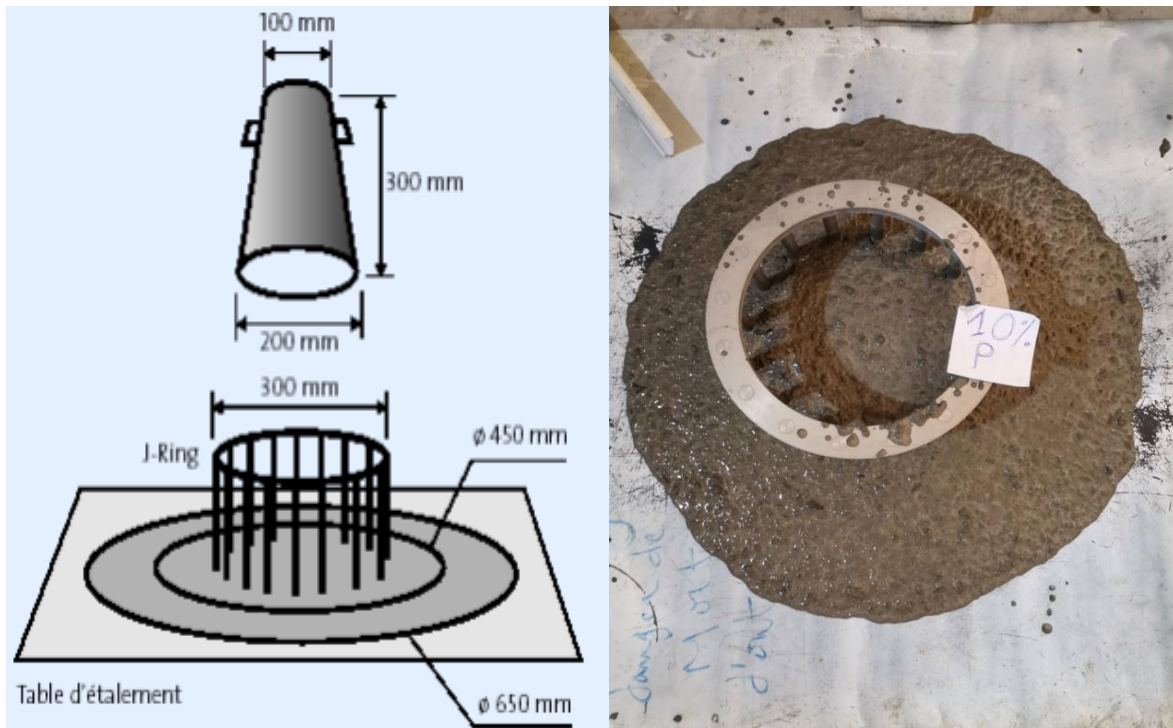
**Tableau 2.7** : Aptitude d'écoulement en fonction de différence d'étalements [46].

Étalement- Étalement J-Ring (cm)	Commentaire
0 à 2,5	Bon écoulement
> 2,5 à 5	Écoulement partiellement bloqué
> 5	Écoulement sévèrement bloqué

L'appareillage utilisé et le mode opératoire de cet essai sont similaires à l'essai d'étalement. L'exception réside dans la présence de la couronne métallique comme on peut le voir sur la figure 2.10.

Pour calculer la différence d'hauteurs  $B_J$ , il est nécessaire de mesurer la hauteur du béton en cinq points, l'un à l'intérieur (au centre de la galette du béton) et les autres à l'extérieur de la couronne métallique. Cette différence d'hauteurs  $B_J$  est donnée par la formule suivante :

$$B_J = \frac{\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2}}{4} - \Delta h_0 \quad (2.1)$$



**Figure 2.10.** Essai d'étalement J-Ring.

### 2.5.2.3. Essai de stabilité au tamis :

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour contrôler la stabilité du béton livré sur chantier, Il consiste à mesurer le pourcentage en masse d'un échantillon de béton (indice de ségrégation IS) passant à travers un tamis de 5 mm (Fig 2.11). Les critères d'acceptabilité d'une formulation de béton autoplaçant sont divisés en trois classes [47] :

- $0\% \leq IS \leq 15\%$  : stabilité satisfaisante ;
- $15\% < IS \leq 30\%$  : stabilité critique ;
- $IS > 30\%$  : stabilité très mauvaise.

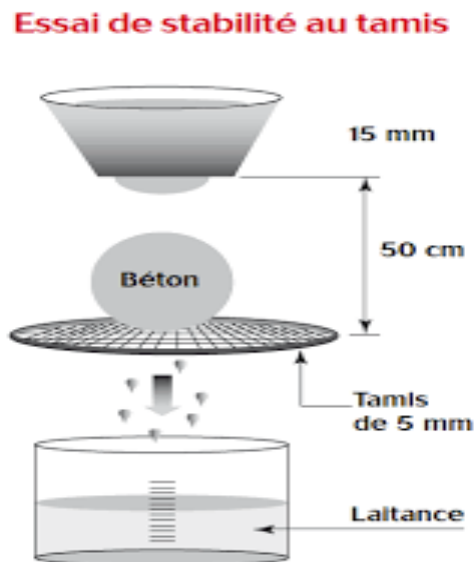
L'indice de ségrégation est calculé selon l'expression suivante :

$$IS = \left( \frac{Q_L}{Q_T} \right) * 100 \quad (2.2)$$

IS : indice de ségrégation (%);

$Q_L$  : quantité du béton (laitance) passant à travers un tamis de 5 mm (kg) ;

$Q_T$  : quantité totale du béton ( $4,8 \pm 0,2$  kg).



**Figure 2.11.** Essai de stabilité au tamis.

#### 2.5.2.4. Masse volumique du béton frais :

La masse volumique réelle du béton frais est mesurée par la pesée d'un récipient remplis de béton autoplaçant sans vibration. Si  $M$  est la masse du récipient plein de béton et  $M_0$  celle du récipient vide, la masse volumique est déduite par l'application de la formule suivante :

$$\rho = \frac{M - M_0}{V} \quad (2.3)$$

Où

$\rho$  : la masse volumique réelle du béton frais ( $\text{kg/m}^3$ ).

$V$  : le volume du récipient utilisé ( $\text{m}^3$ ).



**Figure 2.12.** Mesure de la masse volumique du béton frais.

### **2.5.3. Confection, démoulage et mode mûrissement des éprouvettes :**

Une fois la procédure de malaxage est achevée, et après avoir fait tous les essais relatifs aux bétons à l'état frais, des éprouvettes de types cubiques 10\*10\*10, prismatiques 7\*7\*28 et cylindriques 10\*20 sont coulées sans compactage pour réaliser les essais relatifs aux bétons à l'état durci (Figure 2.13). Les éprouvettes ont été ensuite recouvertes de feuille de plastique pendant 24 heures. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulés, et conservées dans une chambre de température de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  et d'hygrométrie relative  $\geq 95\%$  jusqu'à l'échéance de l'essai, et ce conformément à la norme NF P18-438 [48].



**Figure 2.13.** Confection des éprouvettes.

#### 2.5.4. Essais effectués sur béton durci :

Pour chaque mélange, trois éprouvettes 7\*7\*28 ont été testé pour évaluer la résistance à la flexion et la vitesse d'auscultation sonore, et six éprouvettes 7\*7\* pour déterminer la résistance à la compression. Ces essais ont été effectués conformément à la norme en vigueur [48]. L'absorption d'eau par immersion a été également mesurée à l'âge de 28 jours [49]. L'essai de résistance à la ségrégation est réalisé sur des éprouvettes cylindriques (10×20) après 28 jours.

##### 2.5.4.1. Résistance à la compression :

La résistance à la compression peut être mesurée sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques conformément à la norme NF P18-430 [48]. L'essai de compression se fait, dans notre cas, sur six morceaux de trois éprouvettes prismatiques 7x7x28 qui ont été préalablement écrasées par flexion (figure 2.14). L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture moyennant une presse hydraulique de capacité de 2000 kN, cette presse est munie d'un affichage digital permettant d'entrer la surface de l'éprouvette, la vitesse de chargement (2,5 kN/s) et d'obtenir la force et la résistance à la compression.



**Figure 2.14.** Détermination de la résistance à la compression.

##### 2.5.4.2. Résistance à la traction par flexion trois points :

L'essai de résistance à la traction est effectué selon la norme NF P18-433 [48]. La méthode consiste à soumettre des éprouvettes 7x7x28 cm reposant sur deux appuis à une charge croissante concentrée au milieu jusqu'à la rupture. La charge est appliquée à l'aide d'une

presse à lecture digitale reliée à un système d'acquisition (PC). La vitesse de chargement est prise égale à 50 N/s (figure 2.15). La contrainte de flexion maximale se localise au milieu de l'éprouvette, et se calcule par la formule suivante :

$$\sigma_f = \frac{M}{I} v \quad (2.4)$$

Où :

$M$  : moment de flexion maximale ( $M=F l/4$ ) en kN.cm ;

$I$  : moment d'inertie de la section transversale du béton ( $I=a^4/12$ ) en cm<sup>4</sup> ;

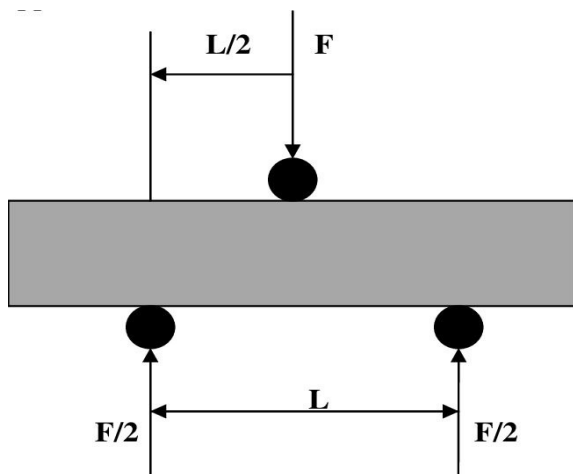
$v$  : distance entre l'axe neutre et la fibre la plus éloignée  $v = a/2$  en cm ;

$F$  : force concentrée en kN ;

$l$  : distance entre deux appuis.

Nous pouvons calculer la contrainte de traction par flexion selon la formule suivante :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2a^3} \quad (2.5)$$



**Figure 2.15.** Essai de traction par flexion trois points.

#### 2.5.4.3. Vitesse d'auscultation sonore (VAS) : (NF P 18-418) [48].

C'est un essai non destructif qui permet d'avoir une idée sur la compacité, donc la résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique d'un béton. Il consiste à mettre deux sondes (émettrice et réceptrice) de l'ultrason sur deux faces opposées d'une éprouvette 7x7x28 cm âgée 28 jours (Figure 2.16). Connaissant la distance entre les deux transducteurs, la VAS est donnée par la formule suivante :

$$V = \frac{d}{t} \quad (2.6)$$

V : vitesse d'auscultation sonore en m/s ;

d : distance entre les deux transducteurs en m ;

t : temps de propagation d'ondes en s.



**Figure 2.16.** Vitesse d'auscultation sonore (VAS).

#### 2.5.4.4. Essai absorption d'eau par immersion totale :

Cet essai est réalisé en conformité avec la norme ASTM C642-97 [49]. La méthode consiste à sécher préalablement des éprouvettes prismatiques à l'étuve à  $105 \pm 5$  °C pendant 72 heures. Les éprouvettes sont ensuite retirées et laissées refroidir, puis sont pesées soit  $M_0$ . Par la suite, les éprouvettes sont immergées totalement dans l'eau à  $20 \pm 2$  °C durant 72 heures (Figure 2.17). Les éprouvettes sont ensuite retirées, et après avoir étoffé leurs faces à l'aide d'une serviette, elles sont pesées de nouveau soit  $M_1$ . Le taux d'absorption est calculé comme suit :

$$A_{bi} = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad (2.7)$$

Où

$A_{bi}$  : taux d'absorption en % ;

$M_0$  : masse de l'éprouvette à l'état sec en kg ;

$M_1$  : masse de l'éprouvette à l'état saturé en kg ;



**Figure 2.17.** Absorption d'eau par immersion totale.

#### 2.5.4.5. Essai de ségrégation statique :

L'essai consiste à couper longitudinalement des éprouvettes cylindriques (10×20 cm) en deux morceaux, et à examiner par la suite d'éventuels signes de ségrégation statique en observant la répartition des gros granulats le long des faces planes des morceaux. Toute accumulation des gros granulats est le signe d'une ségrégation statique. La découpe des éprouvettes se fait moyennant un scié électrique, comme on voit sur la figure 2.18.



**Figure 2.18 :** Découpage des éprouvettes.

## **CHAPITRE 3 :**

# ***ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS***

---

### 3.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter, discuter et interpréter les différents résultats obtenus. Nous commençons par l'optimisation dosage en superplastifiant (rapport superplastifiant sur liant (SP/L)), on passe ensuite à la discussion des résultats des essais effectués sur mortiers frais puis sur bétons aux états frais et durcis.

### 3.2. Essais sur mortiers frais :

L'objectif de ces essais est la détermination le dosage de superplastifiant qui permet d'obtenir un mortier fluide et homogène. Pour cela, deux essais ont été effectué (essai d'étalement et essai d'écoulement) premièrement sur le mortier à base de sable 100% naturel, puis sur des mortiers qui contiennent différents types et pourcentages de granulats fins recyclés. Le tableau 3.1 récapitule la composition des différents mélanges de MAP (en masse pour 1 m<sup>3</sup>), ainsi que les résultats d'essais d'optimisation du rapport SP/L.

D'après les résultats du tableau 3.1, on a remarqué qu'un dosage en SP de 0,9% a donné de bons résultats aussi bien pour l'étalement que pour le temps d'écoulement. En fait, l'étalement obtenu est compris entre 31 et 33 cm, qui est dans le domaine ciblé 27 et 33 cm, de même pour le temps d'écoulement où ses valeurs sont bornées entre 2,15-3,8 s (fourchette ciblée 2 et 10 s). De l'autre côté, on a observé une diminution de l'étalement avec l'ajout de granite recyclé ce qui est attribué au pourcentage des fines élevé que caractérise le granite recyclé par rapport au sable alluvionnaire. Pour les résultats du temps d'écoulement, on a noté une légère diminution du temps d'écoulement avec l'addition du granite recyclé, alors que l'incorporation du plastique recyclé et la combinaison granite-plastique entraînent une augmentation de temps d'écoulement.

**Tableau 3.1.** Compositions des mélanges de mortier autoplaçant (en masse pour 1 m<sup>3</sup>)

Mélanges	E/C	Sable A (kg)	Granite (kg)	Plastique (kg)	SP (%)	SP (kg)	Ciment (kg)	Eau (kg)	Etalement (cm)	Temps d'écoulement (s)
100SA	0,4	1310,0	-	-	0,9	6,22	690,65	283,14	31,75	2,86
10G		1179,0	136,0	-					31,75	2,15
20G		1048,0	272,0	-					31,60	2,30
30G		917,0	408,0	-					31,05	2,40
10P		1179,0	-	41,0					31,60	4,00
20P		1048,0	-	82,0					32,75	3,6
30P		917,0	-	123,0					33,1	3,8
10G+10P		1048,0	136,0	41,0					32,15	3,44
20G+20P		786,0	272,0	82,0					33,4	3,7
30G+30P		524,0	408,0	123,0					33,5	3,6

**SA** : Sable alluvionnaire, **G** : Granite recyclé, **P** : Plastique recyclé.

### 3.3. Essais sur bétons frais :

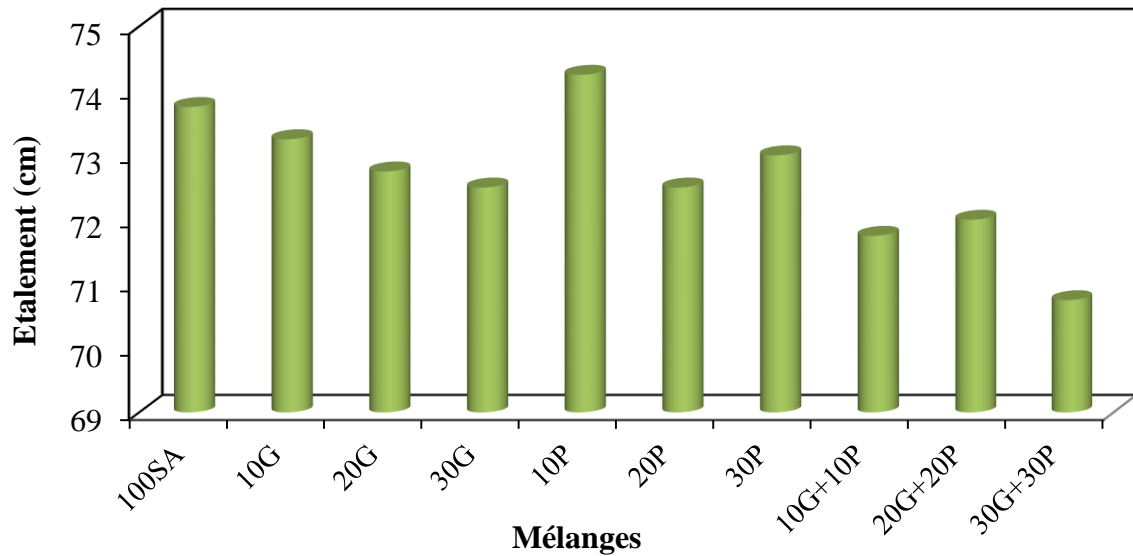
Les essais effectués dans cette partie ont pour but l'étude de l'effet individuel et combiné de deux type de granulats recyclés sur les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais. Les compositions des mélanges sont présentées dans le tableau 3.2, les résultats obtenus sont illustrés dans les figures 3.1 à 3.6.

**Tableau 3.2.** Compositions des mélanges de béton autoplaçant (en masse pour 1 m<sup>3</sup>)

Mélanges	E/C	Constituants								
		Sable A (kg)	Granite (kg)	Plastique (kg)	Gravier 8/15 (kg)	Gravier 3/8 (kg)	SP (%)	SP (kg)	Ciment (kg)	Eau (kg)
100SA	0,4	868,10	-	-	534,08	263,25	0,90	4,15	461,56	221,89
10G		781,30	90,11	-						221,89
20G		694,50	180,23	-						221,89
30G		607,70	270,34	-			222,22			
10P		781,30	-	27,17			222,22			
20P		694,50	-	54,33			222,22			
30P		607,70	-	81,50			222,22			
10G+10P		694,50	90,11	27,17			222,22			
20G+20P		520,90	180,23	54,33			0,75	3,46		222,38
30G+30P		347,30	270,34	81,50			0,70	3,23		222,54

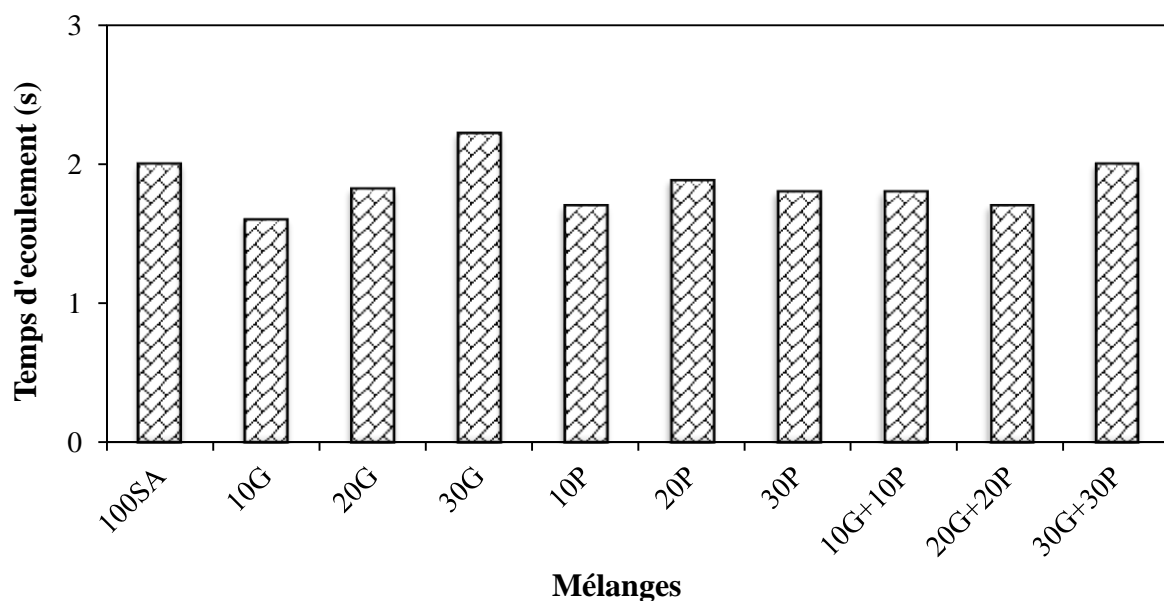
### 3.3.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams

La figure 3.1 montre la variation de l'étalement en fonction de la quantité de granite et plastique recyclés. L'étalement est un bon indicateur de la capacité du BAP à s'écouler sous son poids propre dans un coffrage libre. Les résultats montrent que toutes les compositions testées présentent une bonne déformabilité, avec des valeurs d'étalement allant de 70,75 à 74,25 cm, ces valeurs s'inscrivent dans la fourchette recommandée par l'EFNARC (65-80 cm) [35]. Il a été noté une diminution de l'étalement avec l'introduction du granite recyclé, ce qui signifie que les mélanges préparés du GR présentent une fluidité et une déformabilité inférieures par rapport au mélange de référence (10SA). Cette diminution est due au pourcentage des fines (<100 µm) élevé que caractérise le granite recyclé par comparaison au sable alluvionnaire. L'ajout de 10% des granulats du plastique provoque une légère augmentation de l'étalement. Toutefois des pourcentages de 20 et 30% ont conduit à une diminution de l'étalement et par conséquent la déformabilité de BAP. L'incorporation combinée de granite et de plastique recyclés mène à une diminution d'étalement. Ces résultats peuvent être attribués à la réduction de dosage en SP afin de limiter le risque de ressuage.



**Figure 3.1.** Variation de l'étalement des bétons autoplaçants en fonction du type et de pourcentage des granulats recyclés.

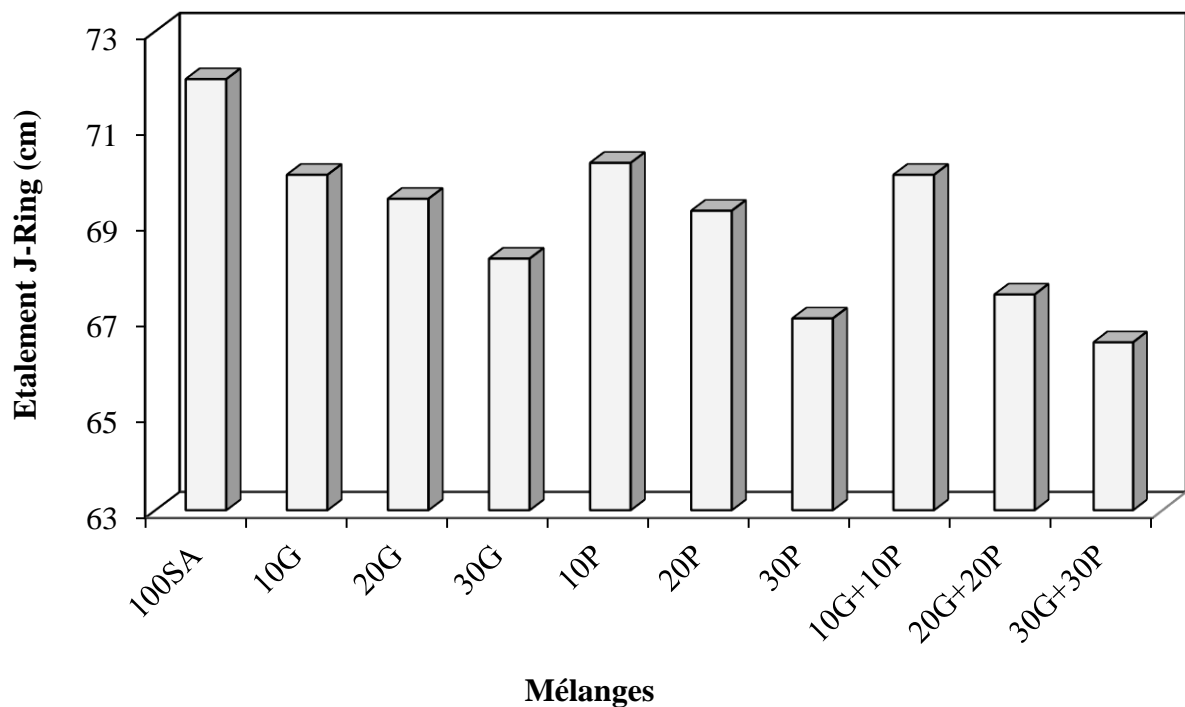
La Figure 3.2 représente la variation de temps d'écoulement en fonction de taux de substitution des granulats recyclés. Les valeurs obtenues varient entre 1,6 à 2,22 s. Les résultats montrent une diminution du temps d'écoulement au fur et à mesure que le sable naturel est substitué par des granulats recyclés, exception pour le mélange 30G qui présente un temps d'écoulement légèrement supérieur par rapport au mélange témoin. Comme le temps d'écoulement est souvent corrélé à la viscosité plastique, la diminution de ce temps est le synonyme d'une diminution de la viscosité plastique.



**Figure 3.2.** Effet du type et de pourcentage des granulats recyclés sur le temps d'écoulement T50 des bétons autoplaçants.

### 3.3.2. Étalement au J-Ring

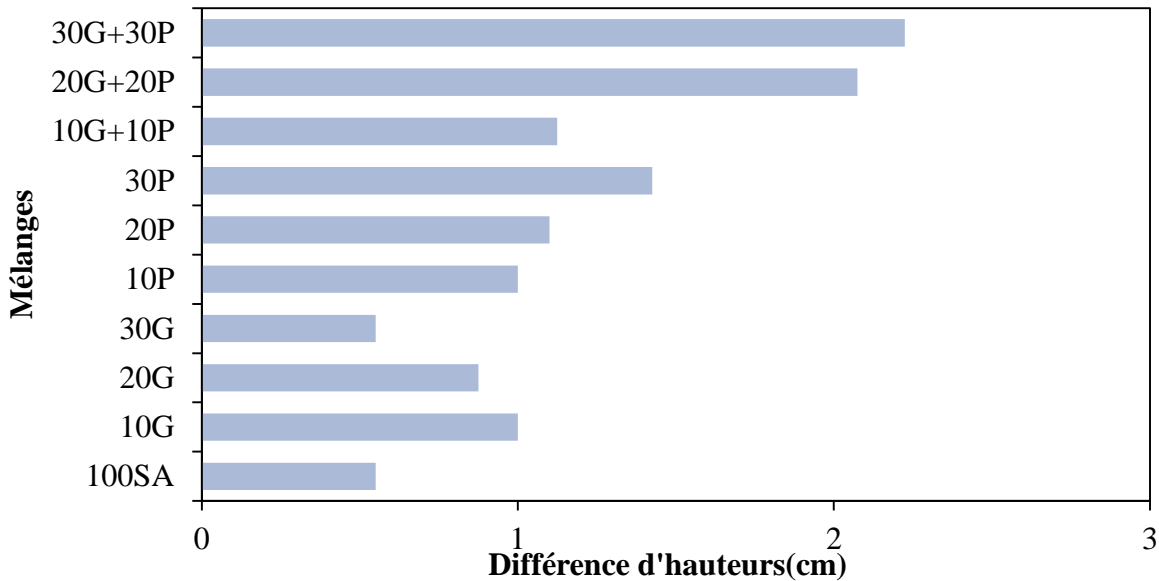
La figure 3.3 présente l'effet de granulat de granite et de plastique sur l'étalement au J-Ring. Les valeurs obtenues varient entre 66,5 et 72 cm. L'ajout des granulats recyclés contribue à diminuer l'étalement au J-Ring. Cette diminution est d'autant plus grande que le pourcentage des granulats recyclés augmente. Par ailleurs, la différence d'étalements ( $E_{\text{sans J-Ring}} - E_{\text{avec J-Ring}}$ ), pour tous les mélanges, varie entre 2,5 et 5 cm, ce qui permet de conclure, d'après la norme ASTM C1621, que ces mélanges présentent un risque de blocage au droit des zones fortement ferrillées [106], à l'exception du mélange 30P dont la différence d'étalements est supérieure à 5 cm ce qui indique que le risque de blocage est élevé.



**Figure 3.3.** Variation de l'étalement au J-Ring des bétons autoplaçants en fonction du type et de pourcentage des granulats recyclés.

La Figure 3.4 représente la variation de différence de hauteurs des BAP en fonction de taux de substitution des granulats recyclés. Cet essai permet de vérifier le risque de non blocage. Plus les valeurs sont grandes plus le risque de blocage est grand et vice versa. On constate une augmentation des valeurs de différence de hauteurs avec l'introduction des granulats recyclés. Les mélanges 20G+20P et 30G+30P peuvent présenter un risque de blocage car la différence de hauteurs atteint des valeurs élevées. L'augmentation des valeurs de différence d'hauteurs

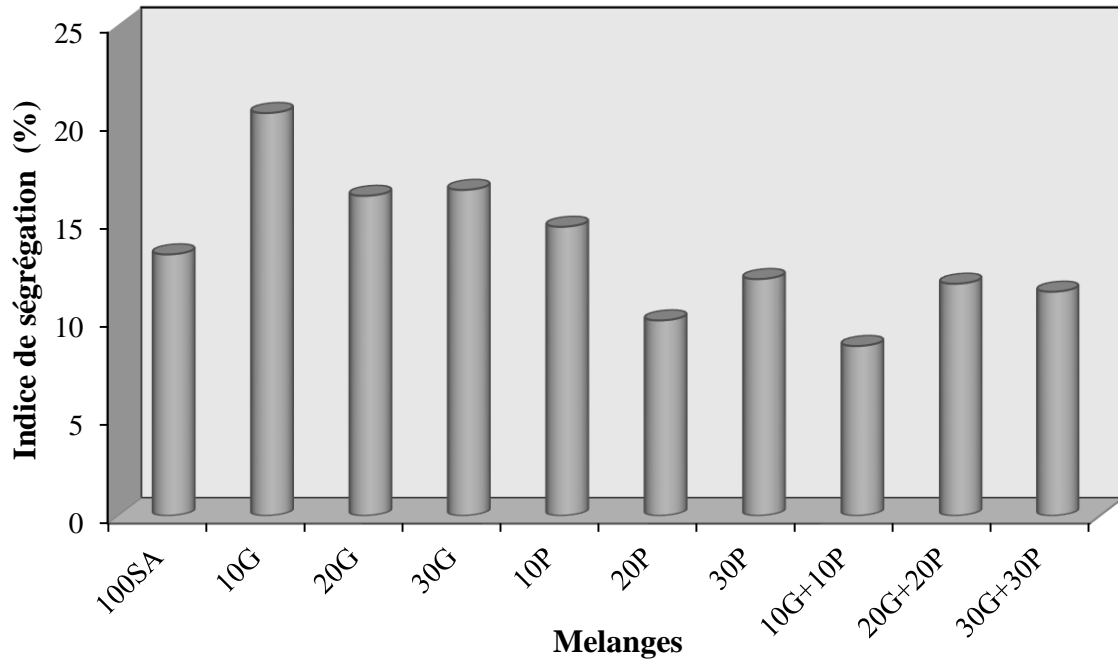
est le signe d'une réduction de la capacité de passage ce qui confirme les résultats de la figure 3.3.



**Figure 3.4.** Effet du type et de pourcentage des granulats recyclés sur la différence d'hauteurs des bétons autoplaçants.

### 3.3.3. Essai de résistance à la ségrégation :

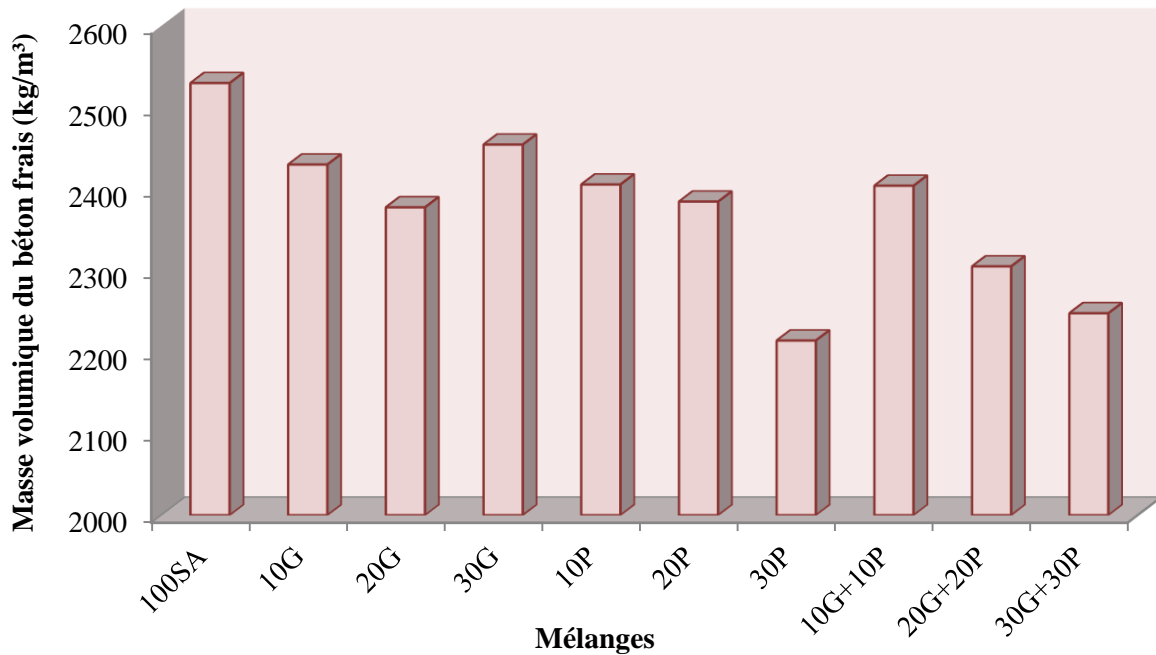
Les résultats de l'essai de ségrégation au tamis sont présentés dans la figure 3.5. Les valeurs obtenues varient entre 8,66 et 20,52%. Cette figure montre que l'addition du granite recyclé conduit à une augmentation de l'indice de ségrégation et par conséquent du risque de ségrégation. L'indice de ségrégation des mélanges 10G, 20G, 30G et 10P est respectivement de 20,52 ; 16,31 et 16,61%. Selon l'EFNARC, ces valeurs indiquent que ces compositions présentent une résistance critique à la ségrégation dynamique ( $15\% \leq IS \leq 30\%$ ) [41]. Pour les autres mélanges, les pourcentages optimaux de laitance passant à travers le tamis sont compris entre ( $0\% \leq IS \leq 15\%$ ), ce qui permet de conclure que ces mélanges présentent de bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage.



**Figure 3.5.** Variation de l'indice de ségrégation des bétons autoplaçants en fonction du type et de pourcentage des granulats recyclés.

#### 3.3.4. Masse volumique du béton frais :

La variation de la masse volumique des BAP frais en fonction de taux de substitution des granulats recyclé est illustrée sur la figure 3.6. Les valeurs trouvées varient de 2214 à 2530 kg/m<sup>3</sup>. Les résultats indiquent une diminution de la masse volumique avec l'addition des granulats recyclés. A titre d'exemple l'ajout de 30% de plastique recyclé permet de réduire la masse volumique par environ 12,5%, ce qui contribue efficacement à réduire le poids de structure ainsi que les dimensions des éléments porteurs.



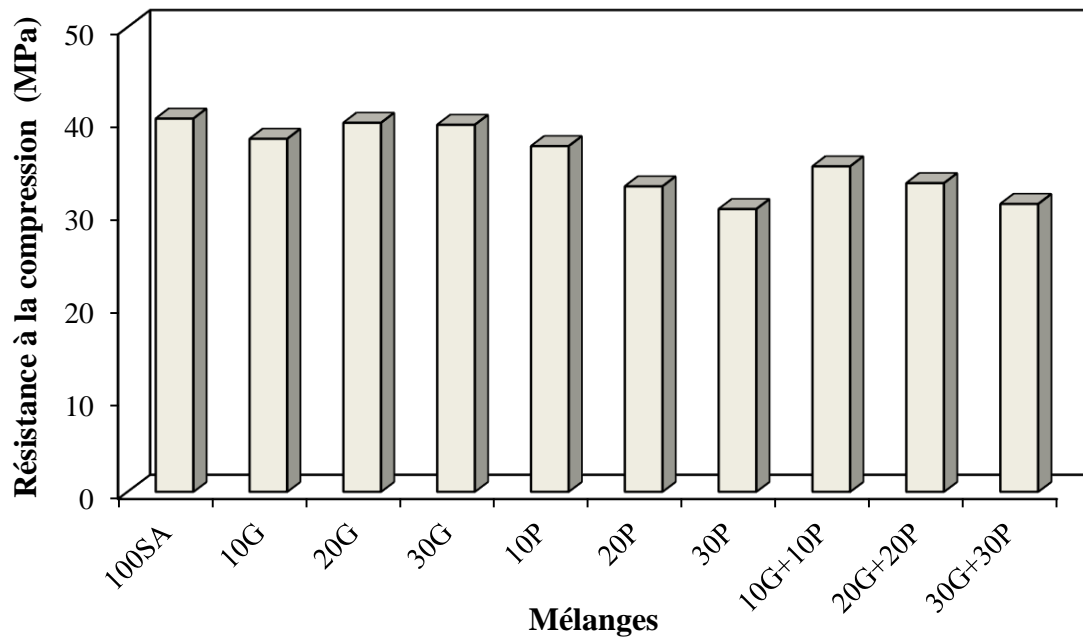
**Figure 3.6.** Effet du type et de pourcentage des granulats recyclés sur la masse volumique du béton frais.

### 3.4. Essais sur bétons durcis :

#### 3.4.1. Résistance à la compression

L'influence des granulats recyclés sur la résistance à la compression des bétons autoplaçants à 28 jours est présenté sur figure 3.8. L'analyse des résultats obtenus permet de faire les constatations suivantes :

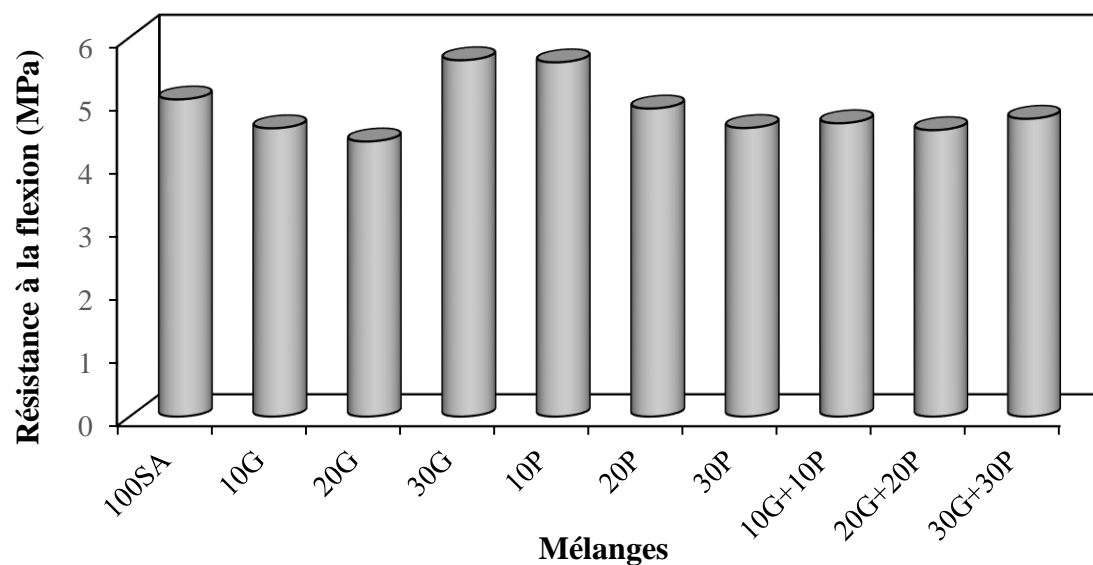
- Les résistances obtenues varient de 30,50 à 40,20 MPa ;
- Le mélange à base de sable alluvionnaire est celui qui présente la résistance la plus grande (40,20 MPa)
- L'ajout de 20% et 30% des granulats de granite donne des résistances presque similaires au mélange témoin ;
- L'incorporation des granulats de plastique contribue à diminuer la résistance à la compression. Cette diminution est de l'ordre de 3 à 10 MPa.
- Les mélanges à base de combinaison granite-plastique développent des résistances inférieures (31-35 MPa) à celle du mélange de référence.



**Figure 3.8.** Effet du type et de pourcentage des granulats recyclés sur la résistance à la compression des bétons autoplaçants à 28 jours.

### 3.4.2. Résistance à la traction par flexion 3P :

La figure 3.9 représente la variation de la résistance à la traction par flexion des bétons autoplaçants à 28 jours. Les valeurs obtenues sont bornées entre 4,36 et 5,64 MPa. Les mélanges composés de 30G et 10P ont développé des résistances supérieures par environ 12% par rapport au mélange témoin. Les autres mélanges ont eu une diminution plus ou moins faible de leur résistance à la traction.

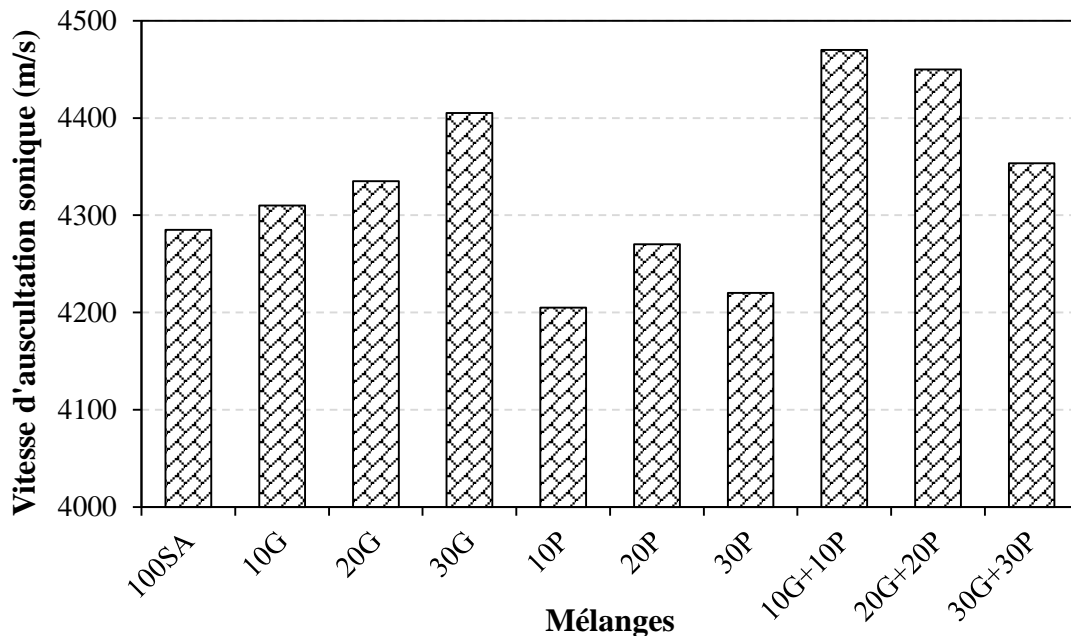


**Figure 3.9.** Variation de la résistance à la flexion des bétons autoplaçants à 28 jours en fonction du type et de pourcentage des granulats recyclés.

### 3.4.3. Vitesse d'auscultation sonore (VAS) :

La variation de vitesse d'auscultation sonore des BAP en fonction de taux de substitution de granulats recyclés est représentée sur la figure 3.10. Les valeurs obtenues varient entre 4205 et 4470 m/s. L'addition des granulats de granite mène à une augmentation de la vitesse d'auscultation sonore par 1 à 5%, tandis que les granulats de plastique réduit légèrement la vitesse d'auscultation sonore. Les mélanges à base de combinaison granite-plastique présentent des valeurs de VAS supérieures par comparaison au mélange de référence.

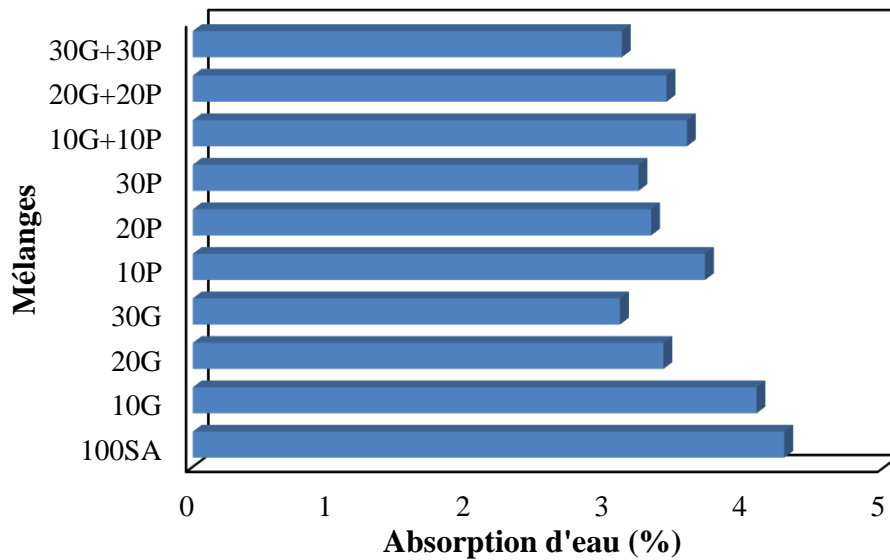
Whitehurst [50] a classifié les bétons selon leur qualité comme suit : excellente, bonne, modérée, mauvaise et très mauvaise pour des VAS de 4500 et plus, 3500-4500, 3000-3500, 2000-3000 et  $\leq 2000$  m/s. Cette classification indique que toutes les compositions testées ont de bonnes qualités.



**Figure 3.10.** Effet du type et de pourcentage des granulats recyclés sur la vitesse d'auscultation sonore des bétons autoplaçants à 28 jours.

### 3.4.4. Absorption d'eau par immersion :

Les résultats issus de l'essai d'absorption par immersion sont illustrés sur la figure 3.11. Les valeurs obtenues sont bornées entre 3,09 et 4,27%. Il est clair d'après les résultats obtenus que l'augmentation de la quantité des granulats recyclés conduit à une diminution du taux d'eau absorbée. Les résultats (cas du plastique) sont en conformité avec ceux rapportés dans la référence [38].



**Figure 3.8.** Influence du type et de pourcentage des granulats recyclés sur l'absorption d'eau des bétons autoplaçants.

#### 3.4.5. Résistance à la ségrégation statique :

La figure 3.9 montre un examen visuel de la ségrégation statique des éprouvettes cylindriques coupées en deux morceaux. Cette figure indique que tous les mélanges présentent une distribution régulière et homogène de grosses particules dans toutes les parties de l'éprouvette et à tous les niveaux, ce qui permet de conclure que ces mélanges ont de bonnes résistances à la ségrégation statique.







**Figure 3.9.** Examen visuel de la ségrégation statique.



## ***CONCLUSION GÉNÉRALE***

---

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce projet de fin d'études a été mené pour évaluer les effets séparés et combinés de deux types des granulats recyclés le granite et le plastique sur les caractéristiques des bétons autoplaçants frais et durci. Il vise à produire un béton autoplaçant à faible impact environnemental, résistant et économique, et ce à travers l'exploitation des déchets de granite et de plastique qui sont disponibles partout dans notre pays. Sur la base des résultats expérimentaux, il est possible de tirer les conclusions suivantes :

- ↪ Un dosage en SP de 0,9% permet de fabriquer des mortiers autoplaçants fluide et homogène qui contiennent de granulats recyclés. Ce dosage peut être réduit au niveau de béton pour obtenir des béton autoplaçants sans ressuage.
- ↪ L'addition des granulats recyclés contribue à diminuer l'étalement et par conséquent la déformabilité de béton autoplaçant ;
- ↪ Comme le temps d'écoulement est un bon indicateur de la viscosité plastique, l'incorporation des granulats recyclés diminue légèrement le temps d'écoulement par conséquent la viscosité plastique ;
- ↪ L'utilisation des granulats recyclés réduit la capacité de passage de béton autoplaçant. Cette réduction est d'autant plus grande que le pourcentage des granulats recyclés augmente (30G, 30P et 30G+30P) ;
- ↪ La résistance à la ségrégation de tous les mélanges est acceptable. L'incorporation combinée des granulats de granite et de plastique contribue à améliorer la résistance à la ségrégation du béton autoplaçant ;
- ↪ La masse de béton autoplaçant frais est diminuée avec l'introduction des granulats recyclés notamment pour le cas du plastique. L'ajout de 30% de plastique recyclé permet de réduire la masse volumique par environ 12,5%, ce qui contribue efficacement à réduire le poids de structure ainsi que les dimensions des éléments porteurs.
- ↪ L'ajout de 20% et 30% des granulats de granite donne des résistances à la compression presque similaires au mélange témoin. Cependant, l'incorporation des granulats de plastique contribue à diminuer la résistance à la compression par environ 3 à 10 MPa ;

- ↪ L'addition des granulats de granite provoque une augmentation de la vitesse d'auscultation sonore par 1 à 5%, tandis que les granulats de plastique réduisent légèrement la vitesse d'auscultation sonore. Les mélanges à base de combinaison granite-plastique présentent des valeurs de vitesse d'auscultation sonore supérieures par comparaison au mélange de référence. Selon les valeurs de la vitesse d'auscultation sonore (4205-4470 m/s), toutes les compositions testées ont de bonnes qualités (3500-4500 m/s) ;
- ↪ Le remplacement du sable alluvionnaire par des granulats recyclés contribue à diminuer la quantité d'eau absorbée. Cette diminution est d'autant plus grande que le pourcentage des granulats recyclés augmente (30G, 30P et 30G+30P) ;
- ↪ L'examen du risque de ségrégation statique montre que tous les mélanges testés sont homogènes et résistants au risque de ségrégation statique ;

Vu les résultats obtenus dans cette investigation expérimentale, on peut avancer que l'utilisation des granulats recyclés tels que le granite et le plastique comme granulat fin pour la fabrication des mortiers et bétons autoplacants peut constituer une alternative aussi bien technologique, économique qu'environnementale importante pour notre pays, en particulier dans les régions qui manquent des granulats naturels.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Khayat, K.H., Assaad, J., and Daczko, J, “ Comparison of field-oriented test methods to assess dynamic stability of self-consolidated concrete ”, *ACI Materials Journal* 2004; 101(2): 168-76.
- [2] Khayat, K.H, “ Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete ”, *ACI Materials Journal* 1999, 96(3): 346–53.
- [3] RILEM, Self Compacting Concrete, State-of-the-Art □, report of Rilem Technical Commite 174-SCC Self Compacting Concrete Edited by A°,Skarendhal and Ö.Petersson, RILEM Publications S.A.R.L.
- [4] Chaib Saad. Etude de l'influence du type de gravier sur le comportement physico-mécanique du béton autoplaçant. Mémoire de Magister.Université de Laghouat, Algérie.2017.157pp
- [5] Collection Technique CIM béton, Fiches techniques, Tome 2 ", Les bétons : formulation, fabrication et mise en oeuvre ", Édition octobre, 2006].
- [6] TAGNIT-HAMOU.A, «Microstructure Et Physico-Chimie Des Ciments Et Des Bétons». Notes De Cours. Université De Sherbrooke. GCI-712. 1995.].
- [7] EFNARC, “ Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete ”, European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures, EFNARC, Norfolk, UK, February 2002, 32pp.
- [8] kamura, H, “ Ferguson lecture for 1996: self-compacting high-performance concrete ”, *Concrete International* 1997; 19(7): 50-54.
- [9] Boukhelkhal A. Rhéologie, caractérisation physico-mécanique et durabilité des bétons autoplaçants a base de la poudre de marbre. Mémoire de Magister, Université de Laghouat, Algérie, 2012, pp.170.
- [10] Billberg, P, “ Mix design model for self-compacting concrete ”, in: the First North American. Conference on the Design and Use of Self-consolidating Concrete, Skarendahl A, editor, Chicago, USA,2002; 65-70.

- [11] Liu, M, “ Wider application of additions in self-compacting concrete ”, Doctoral Thesis of University College London, UK, 2009.
- [12] Domone, P.L., And Jin, J, “Properties of mortar for self-compacting concrete”, Proceedings of Rilem International Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 13-15 September, 1999; 109-20.
- [13] NF EN 1008 Eau de gâchage pour bétons- Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton, Juillet 2003, pp. 18-211.
- [14] ASTM C 494, “ Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete ”, American Society for Testing and Materials, USA, 1992.
- [15] Nowak, A.S., Laumet, P., Czarnecki, A.A., Kaszynska, M., Szerszen, M.M., and Podhoreck, P.J, “ US Specific Self Compacting Concrete for Bridges ”, Final Report for Highway IDEA Project 89, University of Michigan, USA, 2005.
- [16] Baron, J., et Ollivier, J.P, “ Les betons, Bases et donnees pour leur formulation ”, Eyrolles, 1996.
- [17] Bethmont, S, “ Mecanismes de segregation dans les betons autoplacants (BAP) : Etude experimentale des interactions granulaires ”, These de doctorat de l'Ecole Nationale Ponts et Chaussées, France, 2005.
- [18] El Hilali, A, “ étude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) : Influences des fines calcaires et des fibres végétales ”, Thèse de doctorat de l'Université de Cergy Pontoise, France, 2009.
- [19] Aitcin, P.C., Jiang, S., KIM, B.G., Nkinamubanzi, P.C., et Petrov, N, “ L'interaction ciment/superplastifiant : Cas des polysulfonates ”, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Juillet-Aout 2001, N° 233 : 87-98.
- [20] IDJAHNINE Mohamed Yahia A/Halim, formulation et caractérisation du béton autoplaçant avec comme ajout le déchet de brique broyé ,mémoire magister ,université de bejaia,2009,131pp.
- [21] Assié, S, “ Durabilité des bétons autoplaçants ”, Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 2004.

- [22] Sedran, T, “ Les bétons autonivelants (BAN). Synthèse bibliographique ”, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, réf. 3889, Mars-Avril 1995, N° 196: 53-60.
- [23] Rapport technique - Bâtiments exemplaires, L'utilisation de granulats issus du recyclage, p.24.
- [24] F. Buyle-Bodin, R.H. Zaharieva, Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete, *Materials and Structures*, 35 (2002) 504-509.
- [25] C. S. Poon, D. Chan, The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong', *Resources, Conservation and Recycling*, 50 (2007) 293-305.
- [26] Diego Carro-López, Belén González-Fonteboa, Jorge de Brito, Fernando Martínez-Abella, Iris González-Taboada, Pedro Silva. Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials* 96 (2015) 491–501.
- [27] ACHE, Self-compacting concrete: design and appliances, Asociación Científica del Hormigón Estructural, Madrid, 2008 (in Spanish).
- [28] Harbi R. Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base de déchets de briques. Mémoire de Magister 2009, Université de Guelma, Algérie.
- [29] Bourmatte Nadjoua. Granulats recyclés de substitution pour betons hydrauliques : beton de demolition - dechets de briques - dechets de verre. Doctorat en sciences, Université des Freres Metouri Constantine, 2017, p. 176.
- [30] F. Bektas, K. Wang, H. Ceylan. Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1909–1914.
- [31] Celik M.Y, Sabah E. Geological and technical characterization of Iscehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution. *Journal of Environmental Management* 2008; 87: 106-116.
- [32] Alyamac K.E, Ince R. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction Building Materials* 2009; 23: 1201-1210.
- [33] Tunc E.T. Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste. *Journal of Environmental Management* 2019; 231: 86-97.
- [34] Senthamarai R.M, Manoharan P.D. Concrete with ceramic waste aggregate. *Cement and Concrete Composites* 2005; 27(9-10): 910-913.

- [35] Gonzalez-Corominas A, Etxeberria M. Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates. *Construction and Building Materials* 2014; 68: 618-626.
- [36] Subaşı S Öztürk H Emiroğlu M. Utilizing of waste ceramic powders as filler material in selfconsolidating concrete. *Construction and Building Materials* 2017; 149: 567-574.
- [37] Paul O. Awoyera, Julius M. Ndambuki, Joseph O. Akinmusuru, David O. Omole. Characterization of ceramic waste aggregate. *Concrete. HBRC Journal*, 2016.
- [38] Benimam Samir, Debieb Farid, Bentchikou Mohamed, Guendouz Mohamed. Valorisation et recyclage des déchets plastiques dans le béton. *MATEC Web of Conferences* 11, 2014.
- [39] Bourmatte Nadjoua. Granulats recyclés de substitution pour betons hydrauliques : beton de demolition - dechets de briques - dechets de verre. Doctorat en sciences, Université des Freres Metouri Constantine, 2017, p. 176.
- [40] FALI Imane. Propriétés mécaniques des bétons à base de granulats en caoutchouc. Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou, 2016, p.128.
- [41] Okamura, H., and Ozawa, K, “ Mix-design for self-compacting concrete ”, *Concrete Library of JSCE* 1995; 25: 107-20.
- [42] Boukendakdji, O, “ Etude de l’influence des parametres de formulation sur les proprietes d’un beton autoplacant : Optimisation des conditions operatoires ”, These de doctorat de l’Université Saad Dahleb de Blida, Algerie, 2010.
- [43] Benabed B. Influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons autoplacants. Thèse de Doctorat de l’Université Amar Telidji de Laghouat Algérie, 2014, pp. 245.
- [44] Mujtaba, G, “ Supplemental Technical Special Provisions for use of Flowing Concrete and Self-Consolidating Concrete for Manufacturing of Precast/Prestressed Concrete Products ”, Florida Department of Transportation. Gainesville, Florida: State Materials Office, 2004.
- [45] Brameshuber, W., and Uebachs, S, “ Practical experience with the application of self-compacting concrete in Germany”, *Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Oct 23-25, 2001; 687-96.

- [46] ASTM C 1621, “ Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring ”, American Society for Testing and Materials, USA, 2009.
- [47] Association Française de Génie Civil, Bétons auto-plaçants - Recommandations provisoires, Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000.
- [48] AFNOR, “ Beton et constituants du beton ”, Tome 2, 5eme edition, Paris, 2002.
- [49] ASTM C 642-97, “ Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete ”, American Society for Testing and Materials, USA, 1997.
- [50] Whitehurst, E.A, “ Soniscope tests concrete structures ”, Journal of the ACI 1951; 47: 443-4.