REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie civil

Spécialité : Matériaux en génie civil .

Effet des granulats légers sur les propriétés rhéologiques physico-mécaniques et thermiques de mortier auto-plaçant léger et durable.

Présenté par

M^{dm} :Saidani souad

Proposé et Dirigé par

M^{dm} :Heriheri .o

Melle : Benziane.S

Promotion 2019

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces langues années d'étude.

Nous tenons à exprimer nos vifs Remerciements et notre profonde Gratitude à notre promoteur Mdm Heriheri w et Melle Benziane S pour leurs disponibilités, leurs aides durant tout le déroulement de ce projet. Grâce à leurs dévouements, conseils scientifiques et suivis, nous avons pu mener à terme notre travail.

A tous les enseignants de l'Université, et surtout nos professeurs durant toutes les années, pour la connaissance qu'ils ont toujours sus nous transmettre et pour leur disponibilité dans la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier aussi tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont de bien vouloir assister à cette soutenance.

On n'oublie pas mes parents et mon mari pour leur contribution, leur soutien et leur patience.
Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amies, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.

On leur dit merci de tout notre cœur.

Merci

Dédicace

C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde après mon DIEU pour leurs sacrifices :

*.**Mon très cher père,** pour tous les sacrifices consentis pour la réussite de mes études, je ne trouverai jamais les mots justes pour te remercier.*

***ma très chère mère**, pour sa bravoure et son amour sans cesse renouvelé. Que ce présent soit le témoignage de ma reconnaissance et qu'il fasse l'objet de ma fierté. Puisse dieu te permettre de jouir du produit de ton effort.*

*A mon chère mari :Zouhir et sa famille **« Makhloufi»***

A mon filles :Seif el islam .

A Mon petit frère : Nadjib

A Mes sœurs : Karima Sara et Chaima

*A toute la famille **« Saidani»** et **«Bahmad»** sans exception.*

A touts mes aimables amies, et sœurs de cœur, mes collègues d'études.

A Melle Benziane S: cette humble dédicace ne saurait exprime mon grand respect et ma profond estime, que dieu vous procure bonne santé et long vie pleine de bonheur.

SOUAD

الملخـــص

تم تكريس هذه الأطروحة لدراسة صياغة وتوصيف الملاط ذاتي القولبة الخفيف والمخصص للترميم. تعتبر الخرسانة الخفيفة الوزن مادة قديمة وفي الوقت نفسه مواد جديدة ، جزءًا من مجموعة الخرسانة الخاصة. خصائصه تشير إلى تطبيقات جديدة.

ما يميز الخرسانة خفيفة الوزن عن الخرسانة العادية هو كثافتها المنخفضة. تتراوح كثافة الخرسانة العادية من 2200 إلى 2600 كجم / م 3 بينما تتراوح كثافة الخرسانة الخفيفة بين 300 و 1850 كجم / م 3. يساهم استخدام الخرسانة ذات الكثافة المنخفضة في تقليل وزن العناصر المبنية بالإسمنت وبالتالي إنقاص من أبعاد العناصر الداعمة ، مما يؤدي إلى تقليل القوى التي تنقلها الأساسات إلى الأرض ، وبالتالي أبعاد الأخيرة ؛ مما يسمح البناء على التربة ذات القدرة على تحمل منخفضة. تكنولوجيا هذه الخرسانة يمكن أن تكون مفيدة للبناء ، وخاصة في البلدان النامية.

الخرسانة خفيفة الوزن لديها الموصلية الحرارية المنخفضة وعزل الصوت جيد. لذلك ، يمكن أن توفر حلاً تقنيًا مثيرًا للاهتمام لمشكلة العزل الحراري والصوتي في المباني. تصنع هذه الخرسانة عادة بثلاث طرق: عن طريق استخدام المجاميع الخفيفة أو التهوية أو الغاز ، أو عن طريق تقليل الجزء الدقيق من الحبيبات. في كل من الحالات الثلاث ، يتم تقليل كثافة الخرسانة عن طريق زيادة الفراغات الهوائية في الخرسانة.

لدراستنا ، اخترنا الملاط ذاتي القولبة الخفيف المصنوع من الحصى الخفيفة الاصطناعية ، ويستند خيارنا على خصائصها المثيرة للاهتمام ، وهي حبيبات البوليسترين و الحجر الخفاف.

يهدف هذا المشروع البحثي إلى تثمين حبات البوليسترين وحبوب حجر الخفاف في ملاط قائم بذاته خفيفًا (MAPL) ، من خلال استبدال الرمال الطبيعية بمواد خفيفة وفقًا للنسب المئوية التي تتراوح بين 0 و 25 و 50 و 75 ٪. يتم تحليل الخواص الميكانيكية والديمومة ، وكذلك الحرارية ، ملاط قائم بذاته على أساس البوليسترين وحجر الخفاف ومقارنتها مع ملاط قائم بذاته باستعمال الرمال الطبيعية بنسبة 100 ٪ . أظهرت النتائج انخفاض في القوة الميكانيكية وتحسين معايير العزل.

الكلمات المفتاحية: ملاط قائم بذاته خفيف، حبات البوليسترين ، حجر الخفاف ، المتانة والعزل.

Résumé

Ce mémoire est consacré à l'étude de la formulation et la caractérisation des mortiers auto-plaçant légers, destinés à la réparation. Le béton léger qui est un matériau ancien et en même temps nouveau, fait partie de la gamme des bétons spéciaux. Ses caractéristiques suggèrent de nouvelles applications.

Ce qui distingue le béton léger du béton ordinaire est sa faible masse volumique. La masse volumique du béton ordinaire varie de 2200 à 2600 kg/m3 tandis que celle du béton léger varie entre 300 et 1850 kg/m3. L'utilisation d'un béton de masse volumique faible contribue à la réduction du poids des éléments construits avec ce béton et par la suite des dimensions des éléments porteurs, aboutissant à la réduction des efforts transmis au sol par les fondations, et par conséquent les dimensions de cette dernière ; ce qui permet la construction sur des sols de faible capacité portante. La technologie de ces bétons peut être profitable pour la construction, notamment dans les pays en voie de développement.

Les bétons légers ont une faible conductivité thermique et une bonne isolation acoustique. Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments. Ces bétons sont normalement réalisés par trois manières : en employant les granulats légers, l'aération ou le gaz, ou en faisant une réduction de la partie fine du granulat. Dans chacun des trois cas la réduction de la densité du béton est réalisée par une augmentation des vides d'air dans le béton.

Pour notre étude, nous avons choisi les mortiers auto-plaçant légers confectionnés à partir de granulats légers artificiels, notre choix est basé sur ses caractéristiques intéressantes, qui sont le polystyrène expansé et la pierre ponce.

Ce travail de recherche vise à valoriser les billes de polystyrène et les grains de la pierre ponce dans le mortier auto-plaçant léger (MAPL), à travers la substitution du sable naturel par les granulats légers selon les pourcentages allant de 0, 25, 50 et 75%. Les propriétés mécaniques et de durabilité, ainsi thermique, du mortier auto-plaçant à base de polystyrène et de la pierre ponce sont analysées et comparées au mortier avec 100% de sable naturel (Témoin). Les résultats montrent une réduction de la résistance mécanique et amélioration des critères d'isolation.

Mot clés : Mortier auto-plaçant léger, les billes de polystyrène, la pierre ponce, durabilité et isolation.

Abstract

This paper is devoted to the study of the formulation and characterization of light self-compacting mortars for repair. Light concrete, which is an old and at the same time new material, is part of the special concrete range. its features suggest new applications.

What distinguishes light concrete from ordinary concrete is its low density. The density of ordinary concrete varies from 2200 to 2600 kg/m3, while that of light concrete varies between 300 and 1850 kg/m3. The use of low density concrete contributes to the reduction of the weight of the elements constructed with this concrete and subsequently the dimensions of the supporting elements, resulting in the reduction of the forces transmitted to the ground by the foundations, and therefore the dimensions of the foundations; this allows the construction on soils of low bearing capacity. The technology of these concretes can be profitable for construction, especially in developing countries.

Light concretes have low thermal conductivity and sound insulation. Therefore, they can provide a very interesting technical solution to the problem of thermal and acoustic insulation in buildings. These concretes are normally made in three ways: by using light aggregates, aeration or gas, or by reducing the fine part of the aggregate. In each of the three cases, the reduction in concrete density is achieved by increasing the air gaps in the concrete.

For our study, we have chosen lightweight self-compacting mortars made from lightweight artificial aggregates; our choice is based on its interesting characteristics, which are expanded polystyrene and pumice.

This research work aims to develop polystyrene beads and pumice grains in lightweight self-compacting mortar (MAPL), through the substitution of natural sand by light aggregates at percentages ranging from 0, 25, 50 and 75 percent. The mechanical and durability properties, as well as the thermal properties, of the polystyrene-based mortar and pumice stone are analysed and compared to the mortar with 100% natural sand (Witness). The results show a reduction in mechanical resistance and improved insulation criteria.

Keywords: Lightweight self-compacting mortar, polystyrene beads, pumice, durability and insulation.

Tableau 1.1: Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité . [44] ……..26

Tableau 2.1. Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé……..30

Tableau 2.2. Caractéristiques physiques du sable utilisé…….....31

Tableau 2.3. Caractéristiques physiques de polyester et la pierre ponce ……33

Figure 1.1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP [7]…….6.

Figure 1.2 : Relation entre l'étalement et la quantité de pâte d'un béton [8]……...7

Figure 1.3: Action du super plastifiant dans un mélange de béton [10]……..8

Figure 1.4 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [11]…….9

Figure 1.5: Interaction entre l'eau et les polysaccharides (d'après [Hasni 1999]) [8]…….10

Figure1.6: Dispersions des granulats par excès de pâte [10]……..11

Figure 1.7 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant[20]……13.

Figure 1.8 : Résistance mécanique d'un béton vibré et de dix mélanges de BAP avec des additions (fillers calcaires, fine de marbre, poudre de basalte) [24]……14

Figure 1.9 : l'évolution de la résistance en fonction de l'âge d'un BAP réalisé avec différents dosages de laitier [25]……15

Figure 1.10 : le retrait endogène et le retrait total des bétons autoplaçants en variant le volume de pâte [30]……16

Figure 1.11: Effet du dosage en super plastifiant sur le retrait total [31]…….17

Figure 1.12 : Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP [32]……19

Figure.1.13 Béton caverneux , Béton cellulaire , beton de granulats légers……...20

Figure 1.14. Différents granulats légers naturels……22

Figure 1.15. Polymérisation du styrène . [37]……24

Figure 1.16. Microstructure d'une billeEPS .[40].....25

Figure 1.17. Photo au MEB montrant les Billes de polystyrène et la matrice cimentaire (photo Berthelot : PCM - LCPC), .[39]……25

Figure 2.1. Ciment MATINE utilisé ……30

Figure 2.2. Sable d'Oued-souf utilisé ……31

Figure 2.3. Les billes de polystyrène PSE ……..…32

Figure 2.4. La pierre ponce ……. ……33

Figure 2.5. Le super plastifiant VISCO 625 utilisé……..……34

Figure 2.6. Malaxeur utilisé ……..…36

Figure 2.7. Séquence de malaxage du mortier autoplaçant…… 37

Figure 2.8. Essai d'étalement au mini cone …….……39

Figure 2.9. Essai d'écoulement dans l'entonnoir en V(V6funnel test)…….....40

Figure 2.10. Mesurede la densité …… 40

Figure 2.11. Protocole expérimentale a états frais ……..…41

Figure 2.12.L'essai de conductivité thermique par CT- M2TRE ……..…44

Figure 2.13. Protocole exprémentale a étatas frais st dueci……46

Figure 3.1. Densité des mortiers à l'état frais à base de la substitution en PSE……47

Figure 3.2. Densité des mortiers à l'état frais à base de la substitution en PP…….48

Figure 3. 3: Etalement des mortiers à base de la substitution en PSE…….49

Figure 3.4: Etalement des mortiers à base de la substitution en PP……49

Figure 3.5: Temps V-funnel des mortiers à base de la substitution en PSE…….50

Figure 3.6: Temps V-funnel des mortiers à base de la substitution en PP……51.

Figure 3.7 : Résistance à la compression des mortiers MAPPSE……..52

Figure 3.8 : Résistance à la compression des mortiers MAPPP……52

Figure 3.9 : Résistance à la traction par flexion des mortiers MAPPSE…….53

Figure 3.10 : Résistance à la traction par flexion des mortiers MAPPP……..54.

Figure 3.11: Absorption d'eau des mortiers MAPPSE……55

figure.3.12 : Absorption d'eau des mortiers MAPPP……55

Figure 3.13 : variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en PSE……..56

Figure 3.14 : variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en PP……..57

Figure 3.15 : variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en PSE…….58.

Figure 3.16 : variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en PP……58

Figure 3.17 : Résistance à compression des mortiers MAPPSE……..59

Figure 3.18 : Résistance à compression des mortiers MAPPP……..60

Figure 3.19 : Résistance à la traction par flexion des mortiers MAPPSE……61.

Figure 3.20 : Résistance à la traction par flexion des mortiers MAPPP…….61

Figure 3.21 : variation de la porosité des mortiers a base de PSE……..62

Figure 3.22 variation de la porosité des mortiers à base de PP……63.

Introduction générales

Le confortement et la protection de la nature étaient et restent pour toujours le grand souci pour l'homme, depuis longtemps l'être humain a utilisé toutes les ressources et les matériaux que la nature lui offert, quelque soit a leurs état brut ou après une transformation et traitement qu'il peut être chimique, physiques, mécaniques ou complexes, pour qu'il atteint une vie plus facile et lui permet de combattre les obstacles de sa vie courante.

Le béton léger se caractérise essentiellement par sa faible masse volumique, adaptable aux exigences de développement durable, par son excellent rapport poids/résistance et par sa bonne isolation thermique, sa résistance à la chaleur et au feu, sa résistance au gel ainsi que par son insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction. Toutes ces performances changent avec le type de matrice et la qualité du granulat.

L'objectif de ce travail, c'est de formuler des bétons de sable auto-plaçant lèges avec deux granulats légers, de polystyrènes (PSE) et de la pierre ponce (PP) d'une part, et d'évaluer expérimentalement son effet sur les propriétés du composite élaboré (physiques, résistances mécaniques et durabilité ainsi thermique) d'autre part. Dans ce contexte trois pourcentages de polystyrène expansé sont utilisés : 25, 50 75% et trois pourcentages de la pierre ponce 25, 50 75% par le remplacement volumique des granulats naturels.

Pour atteindre ces objectifs, le travail présenté poursuit une démarche progressive s'articulant autour des trois chapitres suivants :

Nous présentons tout d'abord dans le premier chapitre, une synthèse bibliographie regroupant en général le béton auto-plaçant et la valorisation de déchets

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les caractéristiques des matériaux de base, la formulation du béton de sable auto-plaçant, et les techniques expérimentales utilisées durant

cette étude pour évaluer les propriétés à l'état frais (étalement, temps de passage, densité, les propriétés mécaniques (résistance à la compression), la durabilité (absorption d'eau, variations dimensionnelles (retrait et gonflement) .

Le troisième chapitre présente l'analyse et la discussion des résultats obtenus.

Enfin des conclusions générales et des recommandations sont présentées pour achever ce modeste travail de recherche.

1.1. INTRODUCTION

On s'intéresse dans ce chapitre premièrement par la présentation des bétons auto-plaçant (BAP, ou SCC, en anglais, self compacting concrète), qui ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores **[1]**. Ces bétons se développent maintenant en monde entier et semblent être amenés à remplacer, à terme, les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications. Ils présentent en effet des intérêts à la fois techniques et économiques.

Dans la deuxième partie, sont principalement étudiées les bétons légers à savoir définition, types et classes ainsi les propriétés physiques et mécaniques. Mais principalement les bétons de granulats légers, leurs constitutions et leurs caractéristiques du point de vue technologique et économique.

1.2. BETON AUTOPLAÇANT

1.2.1. Définition

Un béton auto-plaçant est un béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuent par le seul effet gravitaire) et conférant à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration.

Les BAP sont encore à l'heure actuelle qualifiés de « nouveaux bétons » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement. Ces bétons constituent dans de nombreux domaines une alternative intéressante au béton conventionnel vibré. Ces domaines comprennent le bâtiment, le génie civil, les tunnels, la préfabrication et les travaux d'assainissement et de réhabilitation **[2]**.

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles. La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine **[3]**. En effet, la qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire **[4]**.

- **Avantages techniques**

Avec l'apparition des BAP, les opérations traditionnelles de coulage, d'étalement, de talochage et de surfaçage se réduisent à une étape de coulage suivie d'un déballage dans le cas des applications horizontales. Pour les opérations verticales, les divers déplacements sur les banches, à travers des trappes et échelles, sont réduits de manière significative.

On peut résumer ses avantages techniques dans les points suivants:

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé) ;
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés ;
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers ;
- Réalisation d'éléments de forme plus complexe.

- **Avantages socio-économiques**

Nous avons vu que la fluidité des BAP est telle qu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique :

- Une diminution du bruit sur site
- Une diminution de la pénibilité des tâches
- Une réduction des risques d'accident
- Réduction du coût de la main d'œuvre.
- Absence de systèmes de vibration (intérieurs ou extérieurs) réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.
- Réduction du temps de bétonnage et des besoins de ragréage.

Toutefois, certains points restent à surveiller dans l'utilisation du béton autoplaçant

- Augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, et des différentes additions minérales ;
- Compatibilité des matériaux ;

- Etanchéité des coffrages.

1.2.2. Particularité de la composition des BAP

Les BAP sont des bétons à quatre composants : les granulats, le liant, l'eau et les ajouts. Les granulats et le ciment utilisés pour un BAP sont les mêmes que ceux utilisés pour la fabrication d'un béton ordinaire. Ce qui particularise la composition des BAP, c'est la proportion des différents constituants et non pas leurs propriétés. En plus des granulats, la formulation d'un BAP se distingue par la présence d'un ajout chimique et /ou minéral.

Les BAP se différencient des bétons traditionnels vibrés, notamment par leurs propriétés à l'état frais. Ces propriétés se caractérisent principalement par :

- Une mobilité en milieu confiné ou non ;
- Une stabilité une fois mise en place.

Pour pouvoir assurer ces caractéristiques, la composition d'un BAP diffère de celle des bétons classiques. Elle se caractérise par un volume de pâte (ciment + additions minérale et chimique + eau + air) élevé, et un volume plus faible de granulats, ce qui limite les frottements inter granulaires. Le rapport granulat/sable exprimé en masse est généralement de l'ordre de 1 pour un BAP. De plus, pour limiter le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé, la taille maximale des granulats est comprise entre 10 et 20 mm.

L'avantage des bétons autoplaçant est d'améliorer la déformabilité du mélange pour faciliter sa mise en place (sans apport de vibration), tout en gardant une bonne stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage). Pour cela il est nécessaire d'ajouter un agent de viscosité, d'augmenter la quantité des ajouts minéraux, et de choisir des teneurs appropriées de sable et de granulats [5].

- ❖ Un volume de pâte élevée ;
- ❖ Une quantité de fines élevée ;
- ❖ L'utilisation de super plastifiant ;
- ❖ Un faible volume de gravillons ;

- Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau dit agent de viscosité.

A-**Un volume de pâte élevé**

En considérant le béton comme un mélange de pâte et de granulats, il existe une quantité de pâte minimum nécessaire au remplissage des interstices entre les granulats. La quantité de pâte supplémentaire provoque une certaine dispersion des granulats, limitant ainsi les frottements sinter granulaires, et confère au matériau sa fluidité (figure1.1) [6].

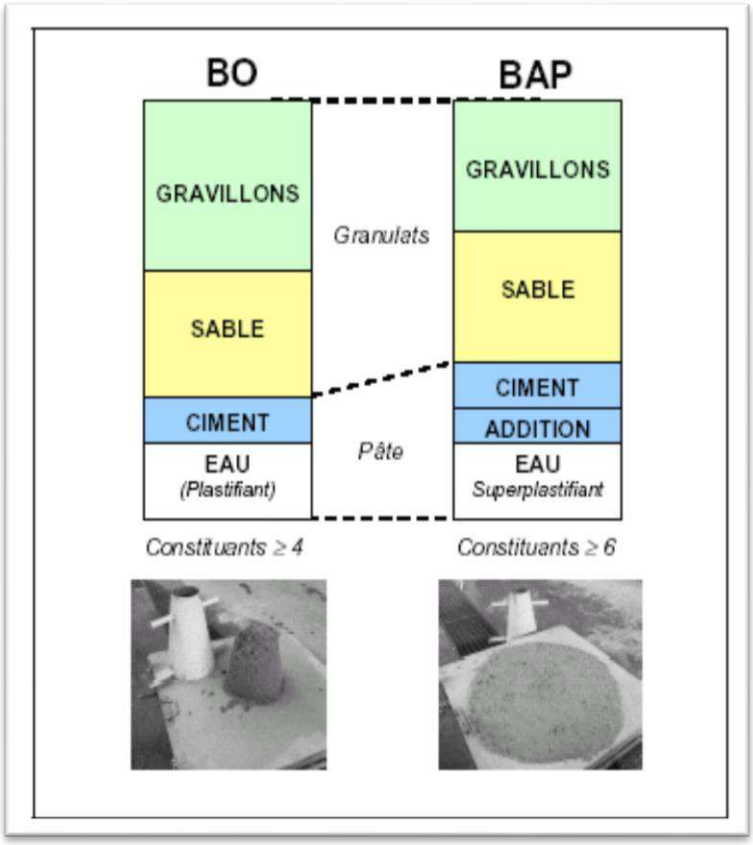


Figure 1.1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP [7].

Certains auteurs ont effectivement mis en évidence l'existence d'une relation entre la quantité de pâte de ciment et l'étalement du béton (figure 1.2) [8].

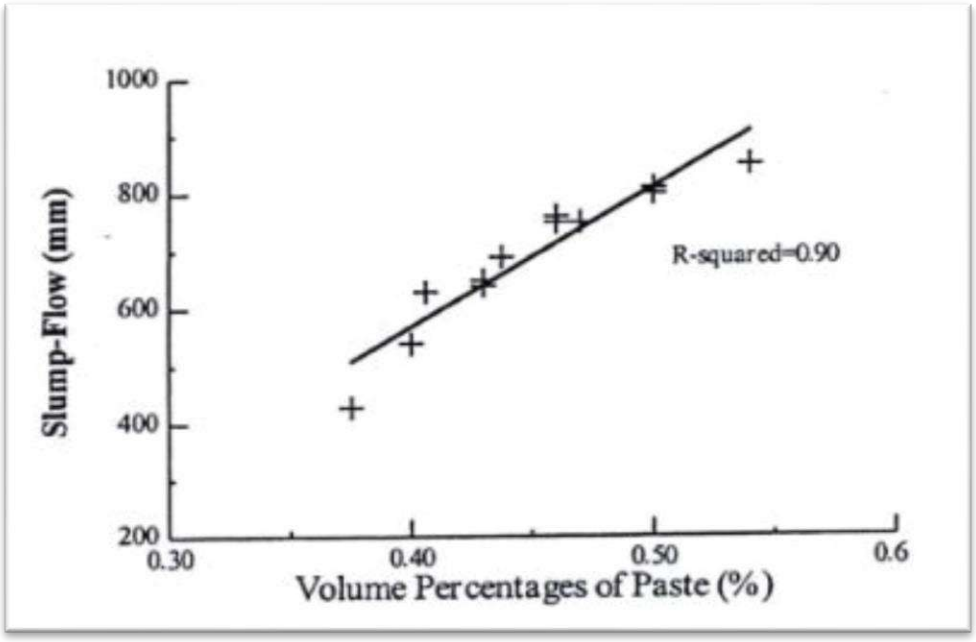


Figure 1.2 : Relation entre l'étalement et la quantité de pâte d'un béton [8].

A- Une quantité de fines élevée

Le but de l'augmentation de la quantité de fines (qui peut atteindre environ 500kg/m^3) est d'assurer la maniabilité, de limiter les risques de ressuage et de ségrégation.

Les plus utilisées sont [9] :

- les fillers calcaires (calcite, dolomite) : qui agissent comme des accélérateurs de prise, par la formation d'hydrates.
- les fillers siliceux.
- les fumées de silice.
- les cendres volantes.
- les laitiers de haut fourneau.

Ces deux derniers permettent d'obtenir un maintien d'ouvrabilité plus long.

B- L'utilisation de super plastifiants

Afin de modifier la fluidité d'un BAP il est nécessaire d'utiliser un super plastifiant, ce dernier augmente l'ouvrabilité du béton mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage [6].

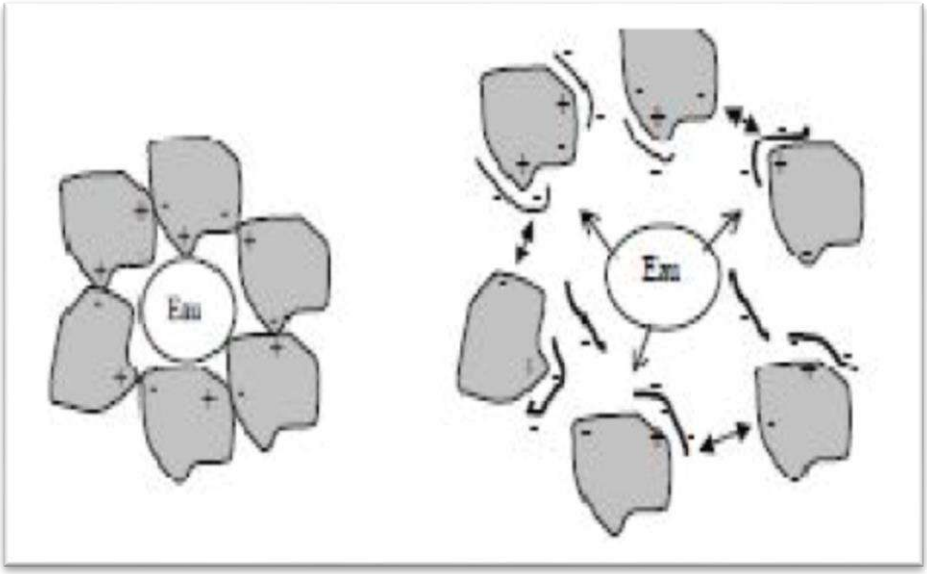


Figure 1.3: Action du super plastifiant dans un mélange de béton [10].

C- Un faible volume de gravillons

Lors de l'écoulement du béton dans des zones confinées, les gros granulats ont tendance à bloquer le passage et à interrompre l'écoulement du béton .Pour minimiser les risques de blocage, on opte pour des granulats de diamètre inférieur à 20mm (le diamètre maximal doit être compris entre 10 et 20 mm).

Pour les BAP le rapport massique gravier /sable est proche de 1 [6].

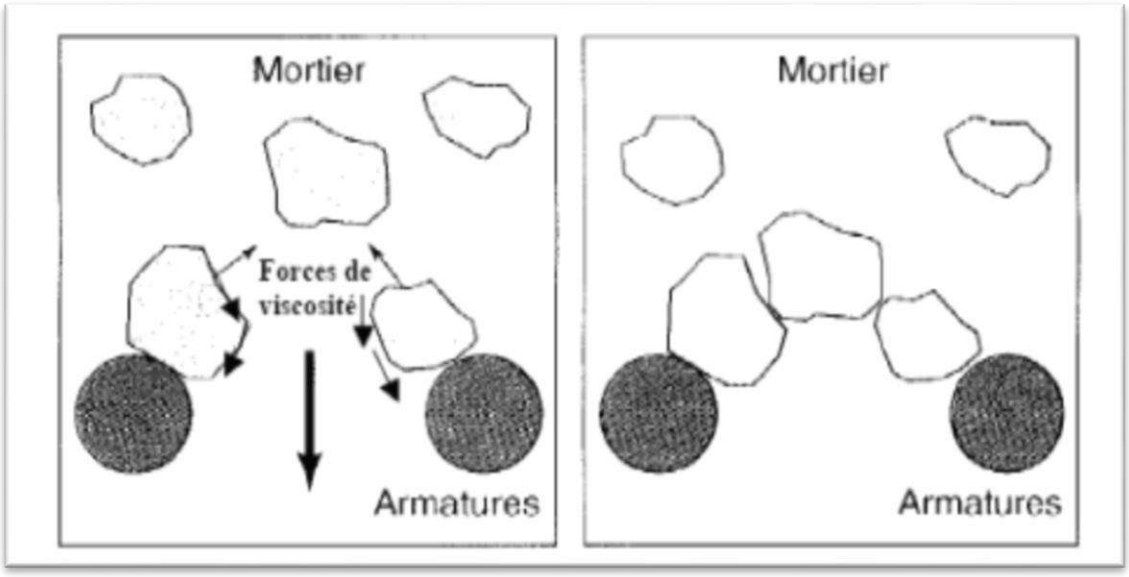


Figure 1.4 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [11].

Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée. Le diamètre maximal des gravillons (DMAX) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec DMAX, cela conduit à diminuer le volume de gravillon [12].

D- Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau dit agent de viscosité

Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, Qui augmentent la viscosité de l'eau (figure 1.5). Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse [13].

Ces adjuvants semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau /liant élevés, mais leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant le rapport eau/liant faibles [14].

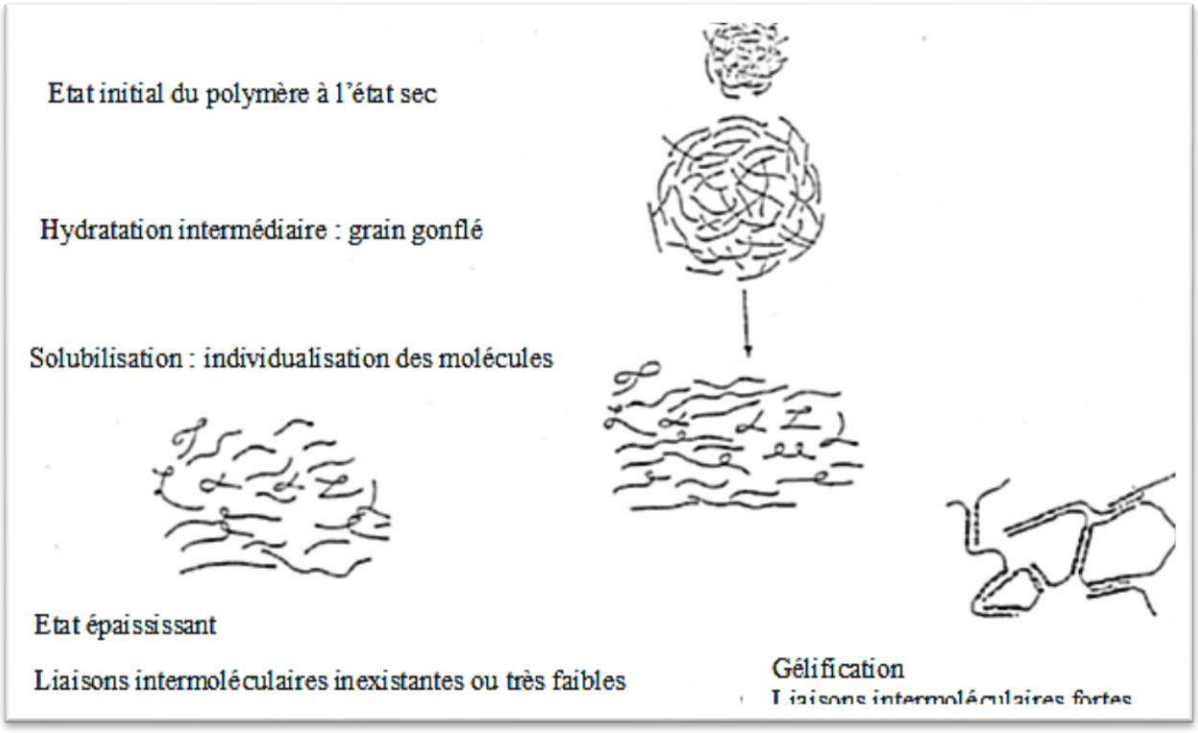


Figure 1.5: Interaction entre l'eau et les polysaccharides (d'après [Hasni 1999]) [8].

1.2.3. PROPRIETES DES BAP A L'ETAT FRAIS

1.2.3.1. Fluidité

Le remplissage du béton, ou 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 confiné, en se déformant sous l'effet de son poids propre, et sans sollicitations (vibrations internes ou externes).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 de 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 [15].

La présence d'une quantité de pâte supplémentaire provoque une certaine dispersion des granulats, limitant ainsi les frottements inter granulaires, et confère au matériau sa fluidité (figure 1.6).

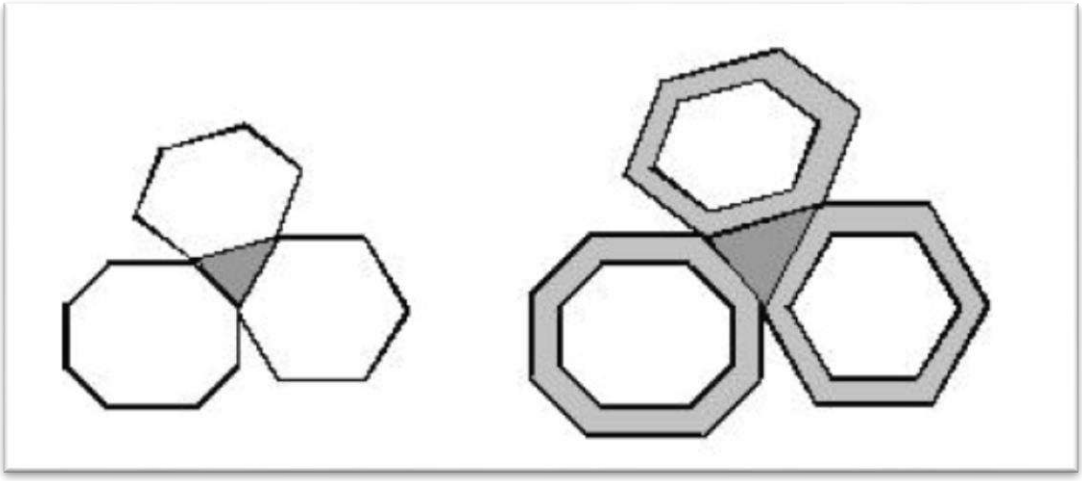


Figure1.6: Dispersions des granulats par excès de pâte [10].

L'AFGC [16] ne donne pas de recommandations particulières sur ce sujet et déclare que des granulats roulés ou concassés peuvent être utilisés dans les BAP. Il est généralement admis que les granulats ronds confèrent au béton une plus grande ouvrabilité.

Ouchi et Edamatsu[17] observent que moins il y a de frottements entre les grains de sable, plus le mortier s'écoule facilement et donc plus le béton lui-même s'écoule facilement. D'après eux, la résistance au cisaillement du mortier augmenterait en fonction de l'effort normal engendré par le rapprochement entre les grains du sable et serait dépendante de la quantité de particules fines contenues dans le mortier. En d'autres termes, Yen et al. [18] mettent en évidence un phénomène similaire. Pour un même dosage en gros granulat (pour un rapport eau sur liant (E/l) et un dosage en super plastifiant constants) plus la quantité de sable est faible, plus l'étalement du béton est important.

L'ajout d'un super plastifiant permet ainsi d'augmenter significativement la fluidité des BAP. Donc ils permettent d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Leur utilisation n'est pas suffisante dans le cas des BAP. Nous avons vu que la fluidité de la pâte avait une certaine influence sur le comportement du matériau mais que la quantité de pâte jouait également un rôle vis-à-vis la fluidité du mélange. Les interactions entre les plus gros grains doivent aussi être réduites, il est donc nécessaire de les remplacer avec des fines pour assurer une bonne fluidité.

1.2.3.2. Homogénéité

Lors de leur mise en œuvre, les BAP sont soumis à différentes sollicitations. Dans un premier temps, le matériau doit s'écouler et passer à travers des armatures plus ou moins denses. Une fois le remplissage effectué, le matériau est soumis à la gravité jusqu'à la prise. Afin de rester homogène tout au long de ces différentes étapes, le matériau doit répondre à ces sollicitations de différentes manières.

- ***Ségrégation dynamique***

Afin de vérifier la capacité de béton à s'écouler à travers des armatures, l'essai le plus répandu pour caractériser la ségrégation dynamique des BAP est l'essai de la boite en L.

Pour limiter le risque de blocage, et d'après l'AFGC, le diamètre maximal des gravillons est compris entre 10 et 20 mm. Moins il y a d'interaction entre les particules, plus le béton s'écoule facilement quelle que soit la configuration d'essai [10].

Pour limiter le risque du blocage, on doit réduire la quantité des gros granulats en prenant en considération que l'augmentation de la quantité du sable en détriment des gros granulats ne soit pas trop élevée parce que cela augmente la résistance à l'écoulement et la viscosité. Par ailleurs, la viscosité doit être relativement faible pour que le BAP s'écoule avec un débit important. Mais nous avons vu qu'elle doit être suffisante pour résister au cisaillement généré par le déplacement des granulats lors de l'écoulement. L'intérêt d'utiliser une quantité de fines élevée apparaît donc de nouveau puisque la viscosité du matériau peut être augmentée (en augmentant la fraction volumique du fluide) tout en limitant le volume de sable.

1.2.4. Propriétés des BAP à l'état durci

Comme tous les bétons, le BAP peut être proportionne pour avoir des propriétés a l'état durci considérablement variable [19]. Les différences de ces propriétés entre le BAP et le béton traditionnel peuvent être attribuées à trois sources principales : proportion modifiée du mélange, microstructure et homogénéité améliorées et manque de vibration ce qui élimine les défauts et assure la distribution uniforme des granulats. Afin d'évaluer les caractéristiques des BAP, plusieurs travaux de recherches ont été introduits. Les différentes approches de formulation, varient les propriétés durcies associes au BAP d'une taude a une autre.

1.2.4.1. Résistance mécanique

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges. Les particules fines du filler, lorsqu' elles sont bien de floculées par les super plastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu''a 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite [14]. Différentes données ont été publiées sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibres et soutiennent les affirmations précédentes montre dans la (figure 1.7).

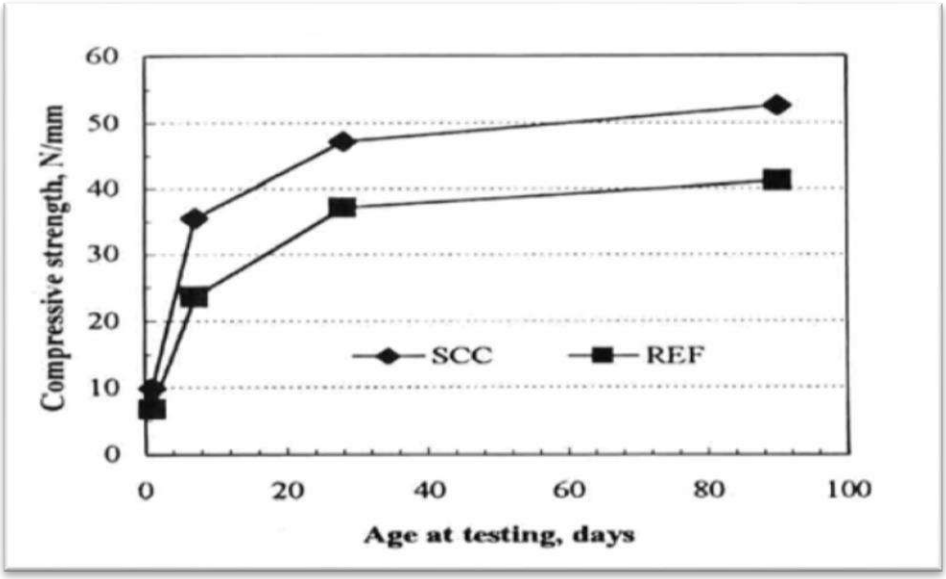


Figure 1.7 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant[20].

Un autre élément influençant la résistance à la compression est le volume de la pâte. Turcry et al. [21] montre que le volume de pate a un effet réel mais limité sur la résistance en compression. Une diminution de 12% de la résistance est observée pour une augmentation de volume de pâte à 57%. De même, Pineaud[22] constate que le volume de pate a une faible influence sur la résistance en compression.

Du moment que le BAP est formulé avec un faible rapport E/P (0,28 à 0,42) et une teneur en poudre élevée (450 à 600 kg/m3), sa résistance à la compression est plus grande que celle du béton vibre [14].

Uysal et al. [23] et Zhu et al. [24] affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande . Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours. Uysal et al. [23] ont montré que les BAP avec des poudres de marbre présente une grande résistance cause de sa finesse réduit par rapport aux autres additions utilisées. De même le pourcentage d'addition comme le laitier diminue la résistance de BAP (figure 1.8) [25].

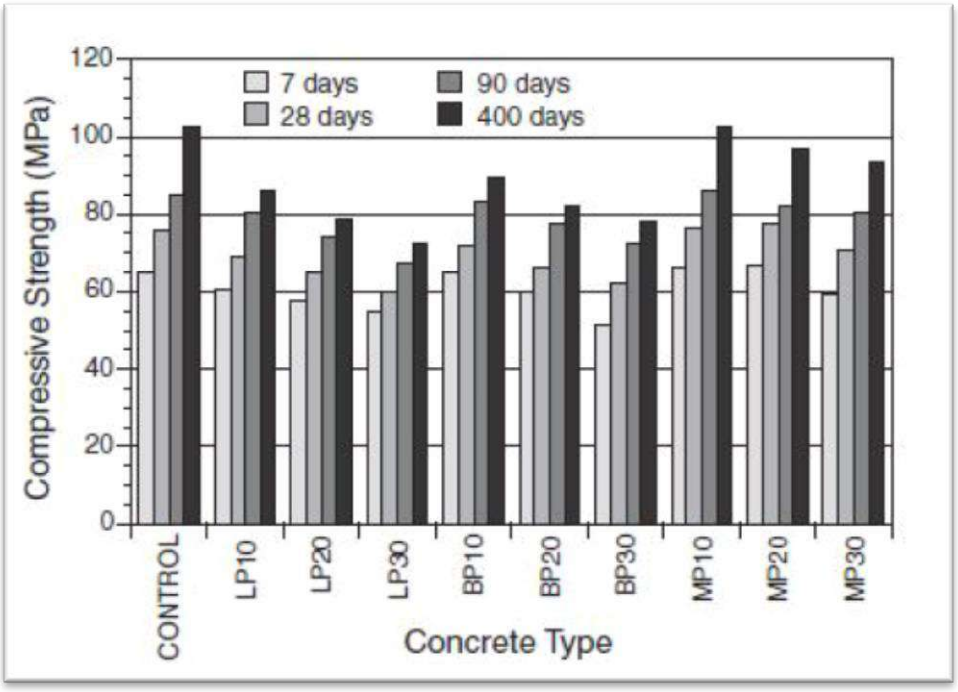


Figure 1.8 : Résistance mécanique d'un béton vibré et de dix mélanges de BAP avec des additions (fillers calcaires, fine de marbre, poudre de basalte) [24].

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. De même, certains super plastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets

secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique Shi et al. cité par [14]. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

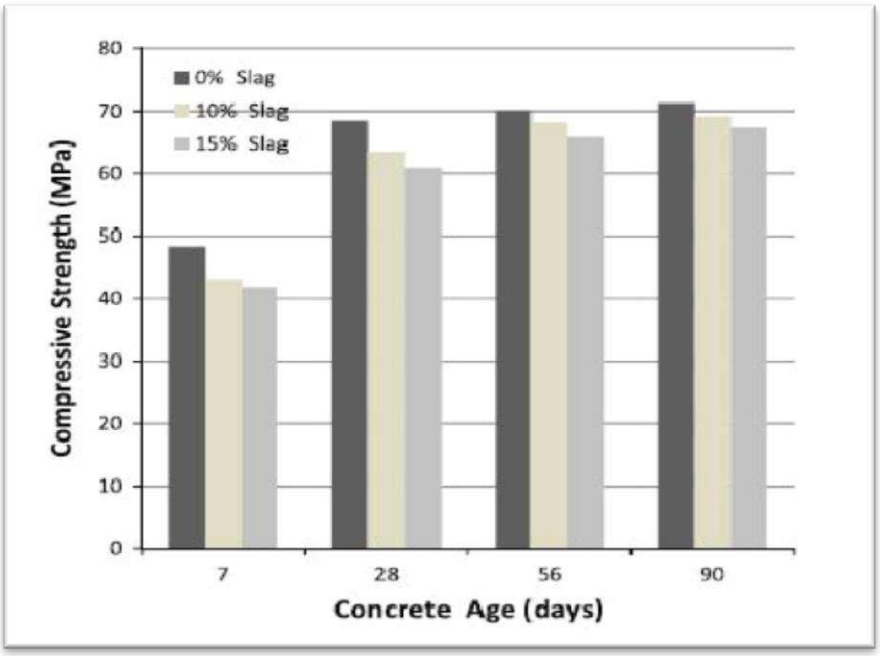


Figure 1.9 : l'évolution de la résistance en fonction de l'âge d'un BAP réalisé avec différents dosages de laitier [25].

1.2.4.2. Absorption d'eau

La formulation particulière des BAP (volume de pâte plus important, additions minérales) pourrait les entraîner à posséder une absorption d'eau inferieur à celles des bétons vibrés. Selon Kapoor et al. [26], la valeur d'absorption d'eau par immersion des BAP est 1% contre 2% pour les bétons vibres. Et même pour l'absorption capillaire [27], présente des valeurs inferieurs à celles des bétons vibrés et elles sont d'autant plus faibles qu'ils contiennent des fillers calcaires ou des cendres volantes.

Contrairement, Assie[14] a cité des résultats donnés par Boel[28] qui prouvent que l'absorption par immersion et par capillarité des BAP est analogue à celle des bétons vibrés

correspondants (SCC1 et TC1). Ces deux grandeurs augmentent avec le rapport E/C (SCC4 a un rapport E/C de 0,36 et SCC2-SCC7 de 0,55) par suite de l'augmentation du nombre de ports et de leur taille. L'influence du filler calcaire est bénéfique pour l'absorption capillaire et néanmoins néfaste pour l'absorption par immersion (SCC5 et SCC7).

1.2.4.3. Retrait

Persson[29] montre aussi que les BAP sont sujets à des déformations libres (retraits endogène et de dessiccation) équivalentes à celles des bétons vibrés pour un grand domaine de résistance. L'augmentation de volume de pâte produit une augmentation de retrait [30] (figure 1.10).

Concernant le retrait, les résultats divergent. Pour certains, les entraîneurs d'air n'ont pas d'effet sur le retrait, ce qui est a priori paradoxal. A l'opposé, ces adjuvants semblent augmenter le retrait, par augmentation de la diffusivité du matériau.

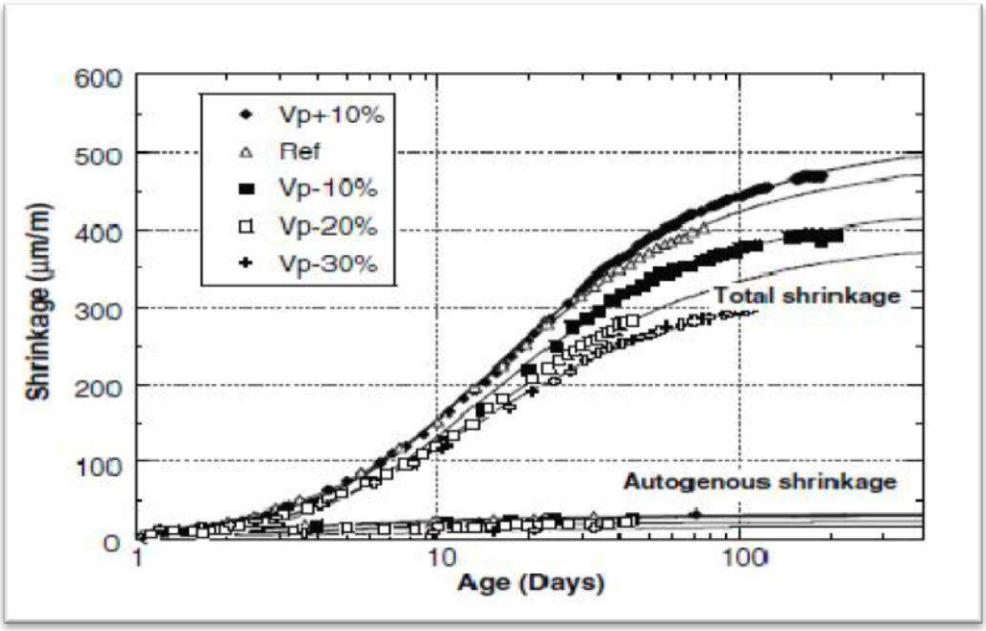


Figure 1.10 : le retrait endogène et le retrait total des bétons autoplaçants en variant le volume de pâte [30].

Le retrait total est sensiblement le même pour les mortiers contenant de l'adjuvant ; il est environ 10% plus grand pour le mortier sans adjuvant (figure 1.11). On peut d'abord

suspecter le super plastifiant d'être un produit tensio-actif et donc de diminuer la pression capillaire. Mais, dans cette hypothèse, son effet ne doit pas être très important, puisqu'entre 0,5 et 1% le retrait n'évolue pas [31].

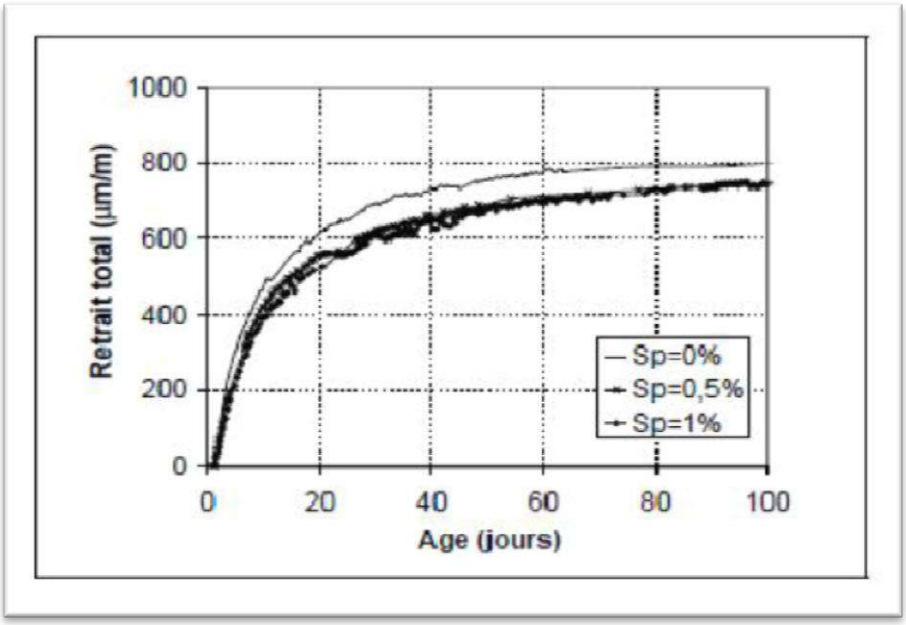


Figure 1.11: Effet du dosage en super plastifiant sur le retrait total [31].

1.2.4.4. Vitesse ultrasonique

La vitesse de propagation d'ondes est une mesure non destructive qui vise à examiner la structure interne du béton, c'est-à-dire la présence des vides et fissures. En effet, la présence des vides et fissures réduit la vitesse ultrasonique et par conséquent la qualité du béton.En général, les BAP présentent des vitesses ultrasonique élevées allant dans certains cas à 5000m/s, ce qui peut être dû au fait que les BAP sont formulés avec une teneur en fines élevée qui rend leur microstructure plus danse et leurs pores plus petites. C'est pour cette raison que les BAP possèdent d'excellentes qualités

1.2.5. Domaine d'emploi des BAP

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité :

- ✓ Possibilité de coulage de zones fortement ferraillées ;
- ✓ Possibilité de coulage de zones d'architecture complexe et difficilement accessibles ;
- ✓ Obtention de très bonnes qualités de parement.

L'un des avantages majeurs du BAP est de permettre la réalisation de parements de haute qualité. Leur composition, riche en éléments fins, permet d'obtenir une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrant utilisée. Les aspects satinés, lisses ou très structurés recherchés par les architectes sont alors plus facilement réalisables. Des teintes homogènes et régulières peuvent être obtenues si les conditions de mise en œuvre évoquées précédemment sont respectées, notamment du point de vue de la propreté des coffrages.

L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de forme complexe.

Les BAP constituent donc une alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction : bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation, etc.

Walravens[32] précise cependant, que les BAP sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent. Globalement, leur utilisation permet de réduire les coûts de production et, parallèlement, d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis. Leur utilisation est plus délicate sur site car les BAP sont particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau. Or, bien que la production soit contrôlée, les lots de matériaux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes.

En effet, la formulation des BAP est particulière : utilisation d'adjuvants et d'additions minérales. Leur sensibilité en ce qui concerne le dosage et la teneur en eau, la qualité et la régularité des composants ainsi que les conditions de malaxage, nécessite donc la mise en place d'un suivi plus important. Nous verrons que les différentes précautions à prendre sur chantier et que la composition même du matériau peuvent entraîner un surcoût.

Par ailleurs, Walraven[32] rappelle à juste titre que la réglementation n'est pas encore adaptée au cas des BAP. En effet, la norme NF EN 206 ne définit que cinq classes de consistance (ferme → fluide). Actuellement, tous les BAP sont donc regroupés dans la classe 5 (fluide).

L'expérience acquise aux Pays-Bas a permis d'étendre la classification en fonction des différences existant entre les BAP et de déterminer différents domaines d'emploi, selon leurs propriétés, comme le montre la figure (figure 1.12).

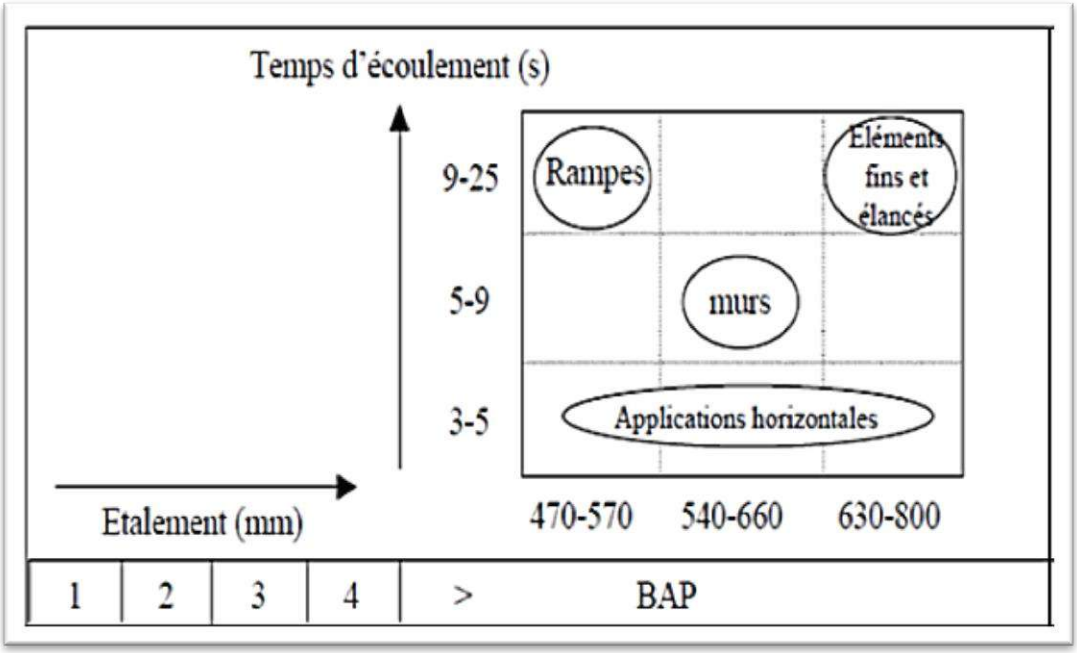


Figure 1.12 : Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP [32].

1.3. Bétons légers

Les bétons légers sont des bétons à haute porosité et dont la masse volumique se situe dans les limites de 500 à 1800 kg/m^3. Suivant le mode de création de la porosité artificielle les bétons légers se subdivisent selon les groupes suivants : bétons légers à agrégats légers et poreux ; bétons à gros (béton caverneux), préparation avec un gros agrégat compact ou poreux d'une seule fraction sans sable; bétons cellulaires dont la structure est représentée par des cellules crées artificiellement et remplaçant les grains des agrégats. **[33]**

1.3.1. Types de bétons légers

Suivant le mode de création de la porosité artificielle les bétons légers se subdivisent selon les types suivants :

1- les bétons cellulaires ;

2- les bétons sans fines (caverneux) ;

3- les bétons de granulats légers (argile expansé ……;

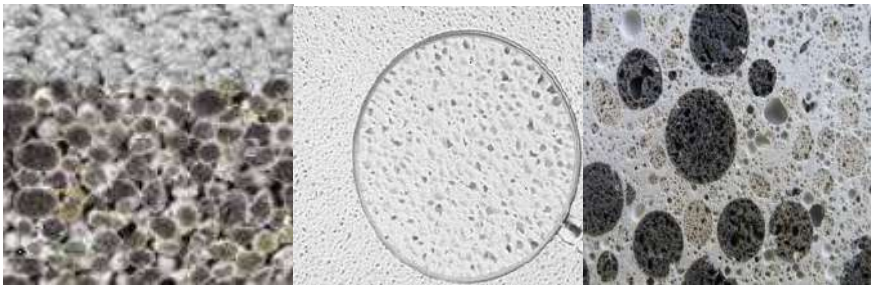


Figure.1.13 Béton caverneux, Béton cellulaire, béton de granulats légers

1.3.2. Classification des bétons légers

Un béton léger est défini par deux caractères de base, dont dépendent les autres caractères ou données nécessaires au calcul. Il s'agit :

— de la masse volumique sèche, désignée par γbs ;

— de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours.

La masse volumique et la résistance sont étroitement liées, ce qui explique pourquoi la norme ACI 213R -8713.141 classifie les bétons en fonction de la masse volumique (est comprise entre 1350 et 1900 kg/m3) en trois catégories :

1- le béton léger de structure: Dont la masse volumique est comprise entre 1350 et 1900, ce béton est utilisé pour des applications structurales avec une résistance à la compression minimale de 17 MPa.

2- le béton léger de faible masse volumique : A une masse volumique comprise entre 300 et 800 kg/m3 n'est pas utilisé pour des applications structurales, mais surtout comme isolant thermique et pour les remplissages, Rc< 7 MPa.

3- le béton de résistance moyenne se situe entre les deux : Sa résistance à la compression est comprise entre 7 et 17 MPa.

1.3.3. Avantages et inconvénients des bétons légers

Le béton léger est utilisé pour plusieurs avantages, on peut les classés en trois catégories qui sont :

1.3.3.1. Avantages techniques

- Légèreté : plus léger qu'un béton classique, le béton léger a une densité de 0,4 à 1 ,8 en comparaison de 2 ,2 à 2,5 pour un béton classique.
- Isolant : Le béton léger a un pouvoir isolant thermique et phonique beaucoup plus important qu'un béton classique.
- Non inflammable : La chape en béton léger est classées M_0 au test de réaction au feu à partir d'un certain dosage en ciment.
- Les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger ;

1.3.3.2. Avantages de Mises En Œuvre

- Maniabilité : pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs, il est facile à mettre en œuvre, notamment en forte épaisseur.
- Coffrages plus légers ;
- Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et à déplacer, en raison de leur relative légèreté (transport possible de pièces plus grandes);

1.3.3.3. Avantages Economiques

- Une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau . **[34]**
- Le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations . **[34]**
- Economie sur le ferraillage des éléments ;
- Le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les quantités de ciment par rapport au béton ordinaire ;

1.3.4- Les inconvénients des bétons légers

- Résistance mécanique plus faible en général,
- Sensibilité aux variations hygrothermiques plus grandes,
- Un dosage en ciment plus élevé, ce qui explique un surcoût.
- L'économie réside alors dans une recherche d'équilibre entre le prix du mètre cube du béton, sa densité et ses qualités mécaniques.

1.3.5. Les constituants du béton de granulats légers

A. Granulats naturels

Certaines roches, comme la pierre ponce, ont à l'état naturel des densités faibles (inférieures à 2) ; en les concassant, on obtient donc des granulats légers. Il existe également d'autres matériaux naturels dans certains pays qui peuvent être utilisés comme granulats légers pour d es utilisations locales. (figure 1 .14) présente quelques exemples de granulats naturels : Pierre ponce, la diatomite et le laitier volcanique. **[36]**



Pierre ponce Diatomite Laitier volcanique

Figure 1.14. Différents granulats légers naturels

B. Granulats artificiels

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, ou des matières spéciales dans certains régions, comme la vase à Taiwan et NYT (Tuff) (Napolitain YellowTuff) en Italie ;

soit à partir de sous -produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore l'EPS (Polystyrène Expansé). **[36]**

Les granulats légers artificiels fabriqués à partir de matières premières naturelles sont produits en formant tout d'abord une pâte dense par mélange d'une poudre avec de l'eau.

Cette pâte est ensuite fractionnée en petits agrégats de quelques millimètres de taille, puis passée dans un four à très haute température (1000°C à 1250°C environ), (Figure I-3). L'expansion de l'eau et la vitrification du minéral aboutissent à la formation de granulats plus ou moins sphériques, constitués d'une coque renfermant des bulles gazeuses dispersées dans une matrice. En jouant sur la marche des fours, on favorise plus ou moins l'expansion. Il apparaît alors une corrélation entre la taille moyenne des grains et leur densité absolue, les plus gros étant les moins denses.

Les granulats artificiels sont généralement assez ronds ; les argiles expansées sont lisses et les schistes sont parfois plus rugueux. Leur masse volumique en vrac varie entre 300 et 800 kg/m3.

C. Matériaux organiques

Produits organique, naturels ou artificiels, tels que liège, copeaux de bois, balle de riz, polystyrène expansé, matériaux dont l'utilisation rentre dans le cadre de valorisation des déchets qui a un effet positif sur l'aspect environnemental et l'apport économique de ce type de granulats.

Le polystyrène expansé (PSE) est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et l'emballage des produits industriels ou alimentaires, c'est le granulat choisi pour alléger notre béton. Le PSE est obtenu à partir d'un polystyrène cristal auquel on a ajouté en Cours de polymérisation, un agent d'expansion (le pentane, C5H12). **[37]**

1.5. Les Billes de polystyrène expansé

1.5.1. Origine et composition chimique

Le polystyrène expansé (PSE) est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et emballage des produits industriels ou alimentaires. **[38]**

Le polystyrène est un thermoplastique dur, c'est un polymère vinylique. Structurellement c'est une longue chaîne d'hydrocarbonés avec un groupe phényle attaché sur certains atomes de carbone, le polystyrène est fabriqué par polymérisation radicalaire à partir d'un monomère de styrène C8H8.

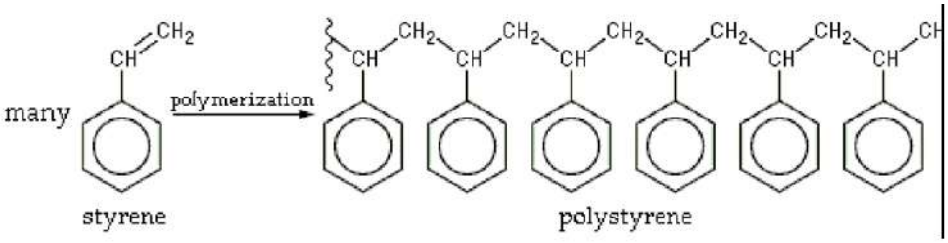


Figure 1.15. Polymérisation du styrène **. [39]**

1.5.2. Fabrication du polystyrène expansé

Le polystyrène brute est un matériau plus on moins lourds il se présente sous forme de perles. L'expansion de ces perles est réalisée par polymérisation du styrène (perles de polystyrène cristal) additionnée d'agent porogène (pentane,C5H12) **. [39]**

Les propriétés les plus remarquables du polystyrène expansé sont :

-Faible masse volumique ;
-Pouvoir isolant thermique ;
-Ses excellentes propriétés mécaniques (capacité d'amortissement des chocs) ;
-Insensibilité à l'eau ;
- Recyclable.

1.5.3. Caractéristiques physiques et mécaniques du polystyrène

- **Densité**

La densité du polystyrène à l'état brut voisine les 1000 kg/m3 [**40].** Cette densité chute considérablement lorsque le polystyrène est expansé, elle est comprise entre 8 et 80 kg/m3.Il faut noter que cette différence remarquable est due à la présence de l'air dans le polystyrène expansé. Le volume de polymère reste toujours très faible devant le volume d'air. Par exemple pour une densité de 32 kg/m3, le polystyrène occupe 2.5% du volume total, mais représente 92% de la masse totale du polystyrène expansé**. [41]**

Généralement leur densité sèche est inférieure à 50 kg/m3.En outre, pour les granulats expansés, la densité dépend de la taille de billes : plus les billes sont grosses, plus leur densité est faible. A titre d'exemple pour ϕ =1mm la densité est de 33kg/m3, 19kg/m3pour ϕ = 2,5 mm et 17kg/m3 pour ϕ= 6,3kg/m3**.[42]**

- **Propriétés morphologique**

Les billes de polystyrène sont parfaitement sphériques. Cela permet d'être en accord avec les modèles d'empilement classiques**.[43]**La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau. En effet, des essais réalisés par Yamura et al d'après **,[43]**ont montré que des billes de polystyrène immergées dans l'eau pendant, un mois n'ont pas absorbé d'eau. Enfin, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface.

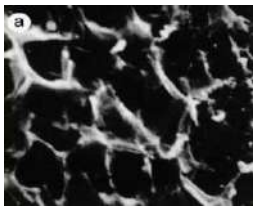


Figure 1.16 . Microstructure d'une bille

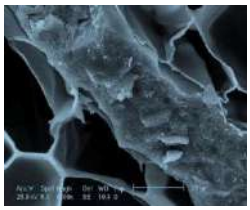


Figure 1.17. Photo au MEB montrant les Billes de polystyrène et la matrice cimentaire (photo Berthelot : PCM - LCPC)**.[43]**

- **Résistance à la chaleur**

Le polystyrène expansé connaît un début de ramollissement et de déformation à une température de 100°c.

- **Résistance en compression du polystyrène**

La résistance à la compression du polystyrène dépend essentiellement de sa densité, plus il est dense plus sa résistance est grande, mais à cause de sa flexibilité le polystyrène se comporte d'une manière assez complexe. **[44]**

Le tableau 1.1donne quelques valeurs de la résistance en compression du polystyrène expansé selon sa densité et pour une déformation de 10% selon la norme NF-T56-201 . **[44]**

Tableau 1.1: Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité . **[44]**

Référence	ClasseQ1	ClasseQ2	ClasseQ3	ClasseQ4	ClasseQ5
Masse volumique (kg/m3)	9	13	16	20	25
Contrainte (MPa)	0.03	0.6	0.9	0.12	0.15

Les propriétés mécaniques des billes de polystyrène expansé sont négligeables devant celles de la matrice cimentaires. En effet, ces billes ont un module d'Young compris entre 4 et 8 MPa et une résistance en de compression de l'ordre de 80 kPa. **[44]**

- **Conductivité thermique**

Le polystyrène est un matériau très réputé par ces performances thermiques, il est très utilisé dans l'isolation thermique des constructions sous forme de panneaux de 5cm entreposés entre deux cloisons. La conductivité thermique du polystyrène dépend de sa porosité, elle-même dépendante du procédé d'expansion. Sachant que la mousse de PSE est constituée de 98 % d'air et de 2 % de polystyrène en volume, le bon coefficient d'isolation thermique est dû à la présence d'air emprisonné dans les cellules . **[45]** En général elle varie entre 0.027 à 0.037 W.m-1.K-1 Ces valeurs leurs sont considérées parmi les valeurs les plus faibles de la conductivité thermique des matériaux . **[46]**

1.5.3. Les liants hydrauliques

Les liants hydrauliques sont des poudres minérales qui ont la propriété de réagir au contact de l'eau et de former des hydrates. Déjà il y a deux mille ans, les Romains avaient découvert le ciment lorsqu'ils s'aperçurent que la chaux résultant de la décarbonatation des calcaires, mélangée avec l'eau et des pouzzolanes (terres volcaniques faites de silice et d'alumine) donnait un mortier qui durcissait. **[42]**

Le ciment Portland demeure le liant hydraulique le plus utilisé au monde. Est composé de chaux (Cao), de fer (Fe203), de silice (SiO3, d'alumine (A1203), de gypse (CaS042H20) et de magnésie (MgO). En plus du gypse, le ciment Portland est constitué de quatre principales

composantes : l'alite (C3S) et la bélite (C2S) combinées à une phase interstitielle de (C3A) et de (C4AF) appelée autrefois célite. Au contact de l'eau le ciment s'hydrate : c'est l'hydratation.

Le processus d'hydratation, lent et progressif, est accompagné d'une perte progressive de plasticité jusqu'au durcissement complet de la pâte de ciment. Depuis quelques années, d'autres types de liants sont de plus en plus utilisés tels les ajouts minéraux. Ces ajouts sont employés en complément au ciment Portland, puisqu'ils confèrent au béton une bonification de certaines de ses propriétés.

Tous les genres de liants sont employés pour la préparation des bétons légers. Le choix d'un liant convenable dépond des facteurs suivants :

- Résistance requise du béton,
- Stabilité nécessaire dans les conditions données de l'ambiance,
- Régime de durcissement et autres.

1.5.4. Ajouts minéraux

Dans le domaine de génie civil, le terme ***ajout*** fait référence à n'importe quel élément autre que l'eau, les agrégats et le ciment, utilisé comme constituant du béton et ajouté à la gâchée immédiatement avant ou pendant le malaxage . **[43]**

Les ajouts minéraux **[34]** également appelés : ajouts cimentaires **(Neville, 2000]**, **[44]** fines complémentaires ou additions minérales, etc. sont des poudres minérales, soit élaborées par concassage de matières premières (naturelles) ou de sous-produits industriels, soit directement récupérées dans des dépoussiéreurs industriels. Ces fines sont de granulométrie voisine de celle du ciment, voire plus fines. Elles peuvent soit avoir un caractère hydraulique latent, soit avoir un caractère pouzzolanique, soit être inertes chimiquement. Dans tous les cas, du fait de leur finesse, ces fines vont jouer un rôle actif vis-à-vis de la compacité du squelette, c'est le rôle de remplissage. [**39]** Leurs particules très finement divisées peuvent être déjà contenues dans le ciment ou simplement être rajoutées dans le béton lors de son malaxage. **[44]** Ils sont utilisés comme remplacement du ciment et/ou les granulats (fins, fins et grossiers) dans le béton. **[43]**

Un ajout minéral qui est désigné par 'addition minérale' dans la norme européenne **EN 206-1** (NF P18-325-1) "Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et

conformité", est définit comme le "matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières". Cette norme divise les additions en deux types: additions quasiment inertes (type I) et les pouzzolanes ou additions à caractère hydraulique latent (type II). **[46]**

2.1. INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux utilisés et les techniques expérimentales réalisées dans notre étude. On présente en première partie les caractéristiques et les propriétés des matériaux utilisés dans la composition de nos mortiers auto plaçant (mortier léger), à savoir : le ciment, le polystyrène, la pierre ponce, le sable, l'adjuvant et l'eau de gâchage. Dans une seconde partie, on exposera la méthode de formulation adoptée dans les différentes compositions des mortiers autoplaçants. Nous présenterons par la suite les différents essais réalisés au cours de notre étude et leurs modes opératoires (état frais et durci).

Les différents essais effectués au laboratoire de Génie Civil de l'université de Médéa et au cours de cette étude sont les suivants :

A. l'état frais :

- Essais d'étalement au mini cône.
- Essai d'écoulement à l'entonnoir (V-funnel test).
- Essai de Densité

B. l'état durci :

- Essai de compression sur demi-prisme d'éprouvettes $4\times4\times16cm^3$ a L'âge de 7, 14 et 28jours.
- Essai de traction sur demi-prisme d'éprouvettes $4\times4\times16cm^3$ a L'âge de 7, 14 et 28jours.
- Essai d'absorption d'eau par capillarité sur demi prisme d'éprouvette $4\times4\times16cm^3$ a l'âge de 28 jours.
- Attaque des sulfates.
- La conductivité thermique
- La porosité.

2.2. MATERIAUX UTILISÉES

2.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé est un CPJ-CEM II/B 42.5 (MATINE), un ciment portland composé dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42.5MPA, produit par la cimenterie de LAFARGE (Fig. 2.1). Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3). Sa composition chimique et minéralogique est résumée dans le tableau 2.1. Ses caractéristiques sont présentées dans la fiche technique en Annexe A.



Figure 2.1. Ciment MATINE utilisé.

Tableau 2.1. Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé

Analyse chimique						
Désignation	P F	R I	SO_4	MgO	Cl	IA
%	7.5-12	0.7-2	2-2.7	1-2.2	0.01-0.05	0.3-0.75
Désignation	***Composition hypothétique du clinker***					
%	C_3S%	C_2S%	C_3A%	C_4AF %		
	58-64	12-18	6-8	10-12		

2.2.2. Le sable

Le sable utilisé est un sable de dune provient de la région de Oued-Souf. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie (Fig. 2.2). Il est séché pondant 24h à température de 105 °C. Les caractéristiques physiques de ce sable son données au tableau 2.2.



Figure 2.2. Sable d'Oued-Souf utilisé.

Tableau 2.2. Caractéristiques physiques du sable utilisé

Caractéristiques	Sable	Norme
Masse volumique absolue (g/cm ^{3})	2.63	NF EN 1097-6 **[1]**
Masse volumique apparent (g/cm ^{3})	1.56	NF EN 1097-3 **[2]**
Module de finesse MF	2.25	NF EN 933-1 **[3]**
Taux absorption (%)	0.14	NF EN 1097-6 **[1]**

2.2.3.Granulats lèges

- **Polystyrène expansé**

Les billes de polystyrènes expansés utilisés dans notre étude ont été fournies par la société L'EPE/Spa SOFATPO est une filiale du groupe EAGR (Entreprise Nationale de Génie Rural), son siège social et son unité de production sont situés au niveau de la zone industrielle de Oued Smar, Algérie.

Le polystyrène expansé est obtenu par polymérisation du produit de base qui est **le STYRENE** (granulé translucide).



Figure.2.3: Les billes de polystyrène PSE

Ces granulats se présente sous forme de billes sphériques de petit diamètre (1 à 2 mm),contenant 98% d'air et peu de consommateur de matière première, le polystyrène ne contient ni gaz CFC, ni HFC, ni HCFC.

- **La densité :** la masse volumique apparente ρ_{app} = 20 Kg/m^3 et la masse volumique absolue ρ_{abs} = 30 Kg/m^3
- **Absorption d'eau par immersion :** en raison de sa structure à cellules fermées, le polystyrène est caractérisé par sa faible absorption de l'eau.
- **Tenue à la chaleur :** le polystyrène expansé se ramollit à partir d'une température 90°C.

- **Pierre ponce :**

La pierre ponce est une pierre naturelle qui provient d'une roche volcanique, cette particularité confère au bloc des qualités isolantes et permet de limiter des ponts thermiques au niveau du plancher figure(2.4).



Figure.2.4: La pierre ponce

Tableau 2. 3. Caractéristiques physiques de polyester et la pierre ponce

Caractéristique	***Le Polyester***	***La pierre ponce***
La masse volumique absolue (g/cm ^{3})	**0 ,025**	**1 ,46**

2.2.4. L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage de nos mélanges, est une eau potable de distribution de notre laboratoire, exempte d'impuretés nuisibles au béton et conforme à la norme NF EN 1008 **[4]**.

2.2.5. Adjuvant Pour cette étude, nous avons utilisé un Super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération fabriqué par la société Granitex VISCO 625 ;il est à la base poly carboxylates d'éther, sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0, 5% à 2% du poids de ciment **(Annexe C)**



Figure. 2.5. Le super plastifiant VISCO 625 utilisé.

2.3. FORMULATION DES MORTIERS AUTOPLACANTS

2.3.1. Introduction

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 à l'état durci. 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 en balance pour obtenir un bon BAP.

Du moment que le mortier occupe un volume important dans les BAP (presque 70%), et que la rhéologie du BAP est fortement liée à celle du mortier autoplaçant (MAP), les résultats d'essais sur le MAP seront concluants et peuvent donner une grande idée sur le comportement rhéologique du BAP.

Selon JIN et DOMONE **[5]**, des tests sur les mortiers sont indispensables car :

- Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominants
- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formulation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.
- Tester un mortier est beaucoup plus commode et simple que tester un béton.

2.3.2. Formulation du mortier autoplaçant de référence (MAPT)

Afin de déterminer les quantités des matériaux : ciment, granulats, eau et adjuvant, nous sommes basés sur la méthode Japonaise (méthode générale) proposée par OKAMURA **[6]**, avec quelques modifications sont apportées au niveau de la teneur en sable dans le mortier (S/M), le rapport eau/ciment (E/C) ainsi que le rapport Super plastifiant / Liant (S_P/L) et ceci dans le but de s'adapter avec les exigences des matériaux locaux et d'obtenir de bonnes caractéristiques du mortier auto plaçant (MAP) à l'état frais.

BOUKENDAKDJI O. **[7]**, dans ses travaux de recherche a ajusté le rapport S/M (S/M=0.5) et S_P/C de manière à avoir un diamètre d'étalement de la galette du mortier compris entre 270 et 330 mm et un temps d'écoulement à l'entonnoir en V compris entre 2 et 10 s.

Afin de minimiser le nombre de variables pour le mortier auto plaçant de référence, nous avons jugé judicieux de maintenir fixe les deux rapports S/M et E/C. Dans notre étude nous sommes basés sur les travaux de BOUKENDAKDJI **[7**] et le rapport S/M a été fixé à 0,5. En ce qui concerne le rapport E/C,

2.3.3. Formulation du mortier autoplaçant à base de polyester et la pierre ponce :

Notre étude est focalisée sur l'influence de type et pourcentage d'addition des déchets sur les caractéristiques d'un mortier auto plaçant. Pour cela, le sable du MAP de référence a été substitué partiellement par l'un des déchets dans cette étude (polystyrène et la pierre ponce) avec plusieurs pourcentages.

Dans ce travail expérimental les mélanges ont été préparés en remplaçant une partie de sable avec l'un des granulats légers employés à savoir : le polystyrène avec les pourcentages (MAPPSE) 25, 50 et 75%, et la pierre ponce (MAPPP) avec les pourcentages 25, 50 et 75%. Les différents mélanges préparés ainsi leurs nomenclatures sont les suivants :

- **MAPT :** mortier auto plaçant de référence sans déchets;
- **MAPPSE 25% :** mortier auto plaçant avec 25% de polystyrène ;
- **MAPPSE 50% :** mortier auto plaçant avec 50% de polystyrène ;

- **MAPPSE 75 %:** mortier auto plaçant avec 75% de polystyrène ;
- **MAPPP 25% :** mortier auto plaçant avec 25% de pierre ponce ;
- **MAPPP 50% :** mortier auto plaçant avec 50% de pierre ponce ;
- **MAPPP 75%:** mortier auto plaçant avec 75% de pierre ponce ;

2.4. CONFECTION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES

2.4.1. Procédure de malaxage

Pour la confection des mortiers autoplaçants, nous avons utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité (**Figure. 2.5**). En ce qui concerne la durée de malaxage, les MAP et BAP ont

une durée de malaxage plus longue, ce qui a pour effet d'assurer une meilleure dispersion des particules de la poudre par le super plastifiant. Certains auteurs **[10, 11]** ont proposé des durées de malaxage variant entre 3 et 4 min. Ont rapporté qu'une durée de malaxage excédant 5 min est préférée.



Figure 2.6. Malaxeur utilisé.

BOUKENDAKDJI et al. **[13]** ont rapporté que l'efficacité du SP est d'autant plus grande lorsqu'il est ajouté (avec 30% de l'eau) après l'humidification du béton (70% de l'eau de gâchage ajouté au début de malaxage). En se basant sur ces recommandations et sur les travaux cites **[7, 14]**. Apres avoir calculé la quantité de chaque élément entrant dans la

composition du MAP, on procède à un malaxage suivant la séquence présentée à la (figure 2.7)et résumée comme suit :

- Malaxer à sec le ciment, sable et addition afin d'homogénéiser le mélange pendant 30 seconde ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (w1 = 70% Eau) ;
- Ajouter pendant 1 minute le restant de l'eau de gâchage (w2 = 30% Eau) mélangé avec le super plastifiant ;
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes ;
- En laisse le mélange reposé 3 minutes ;
- Malaxer le mélange pendant 1minutes et 30secondes.

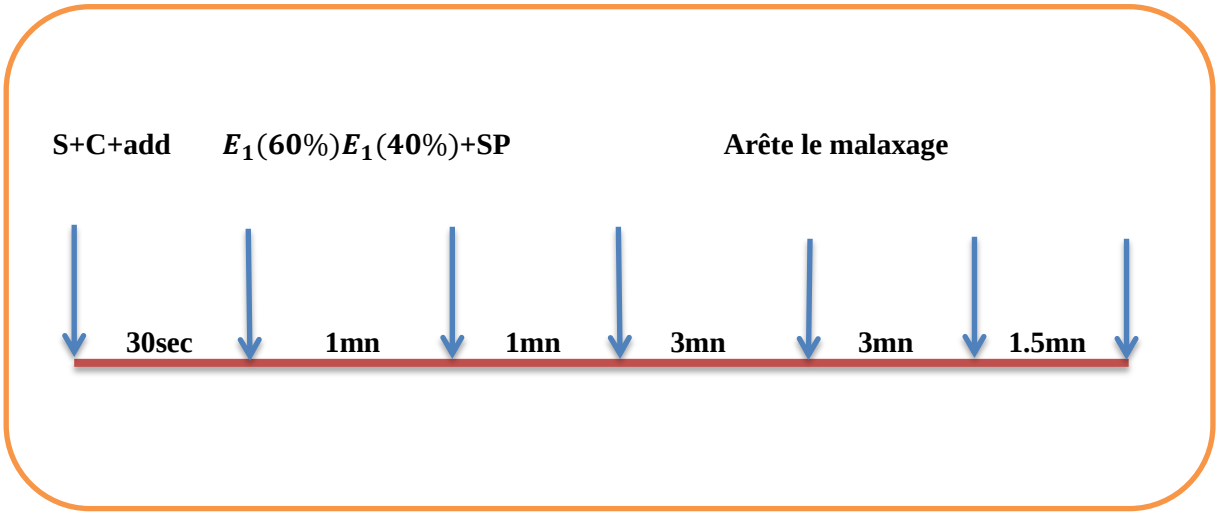


Figure 2.7. Séquence de malaxage du mortier autoplaçant.

2.4.2. Préparation et conservation des éprouvettes

Les différents types de mortiers autoplaçants sont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire. Le coulage des éprouvettes est réalisé sans vibration ni compactage dans des moules métalliques de forme prismatique 4x4x16 cm destinés aux essais à l'état durci de compression, absorption capillaire, et variation dimensionnelle, et des moules métalliques se forme carrée 10×10 ×4 cm destinés à l'essai de conductivité thermique.

Juste après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter le risque d'évaporation excessive et le retrait plastique. Après le démoulage des éprouvettes à 24h, elles sont divisées en deux groupes. Des éprouvettes ont été conservé dans l'eau à 20°C ± 2°C conformément à la norme NF EN 12390-2 **[15]** destinées au essai de compression, absorption capillaire et gonflement. Et des éprouvettes conservées à l'aire libre destinées à la mesure du retrait.

2.5. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

2.5.1. Essais effectués sur les MAP à l'état frais

Les essais effectuer sur mortier frais ont pour but en premier temps de fixer le dosage en super plastifiant afin d'avoir des mélanges fluides de caractère autoplaçant. L'essai d'étalement vise à qualifier la déformabilité du mortier en mesurant son étalement, et à contrôler la stabilité du mortier en observant sa galette après l'arrêt de l'écoulement. La viscosité du mortier est évaluée en comptant le temps d'écoulement à travers L'essai au mini-entonnoir en V.

2.5.1.1. Essai d'étalement au mini cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires, la moyenne est retenue. La figure 2.8 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

♦ ***Mode opératoire :***

- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon) ;
- Placer et centrer le mini cône sur la plaque ;
- Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône;
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées ;

- Une fois que le mortier s'est étalé sur la plaque, mesurer le diamètre final sur deux côtés perpendiculaires, Le résultat est exprimé en moyenne des deux valeurs obtenues.
- Détecter visuellement s'il y a des signes de ségrégation de mortier.



Figure 2.8. Essai d'étalement au mini cône.

2.5.1.2. Essai de l'écoulement dans l'entonnoir en V (V-funnel test)

L'entonnoir est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. L'entonnoir est rempli de mortier et le temps pour lequel le mortier prend pour couler à travers le dispositif est mesuré. Ce temps mesuré indique la fluidité et caractérise la capacité du mortier à se déformer à travers des zones confinées par son passage par l'ouverture du col du dispositif (Figure. 2.9).

♦ Mode opératoire :

- Placer l'entonnoir en V dans un endroit stable et s'assurer que le clapet est bien fermé;
- Prélever dans un seau un échantillon de mortier représentatif d'environ de 12 litres ;
- Remplir l'entonnoir avec le mortier ;

- Mettre le seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir et ouvrir le clapet ;

- Après une attente de 10 secondes, ouvrir le clapet en déclenchant le chronomètre ;

- Arrêter le chronomètre quand la première lumière est apparue à travers l'orifice de l'entonnoir, cette mesure est le temps d'écoulement T_{V-F} ;

- Refaire l'essai 3 fois et Le résultat est la moyenne des trois valeurs du temps d'écoulement obtenues.



Figure 2.9. Essai d'écoulement dans l'entonnoir en V (V-funnel test).

2.5.1.3. La densité

La masse volumique du mortier autoplaçant à l'état frais a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 **[16]** (Figure. 2.10).



Figure 2.10. Mesure de la densité.

2.5.1.4. Essais réalisé sur mortier auto plaçant à l'état frais

Les différents essais réalisés sur les mélanges du mortier autoplaçant, sont résumés dans l'organigramme représenté par la figure 2.13 suivante.

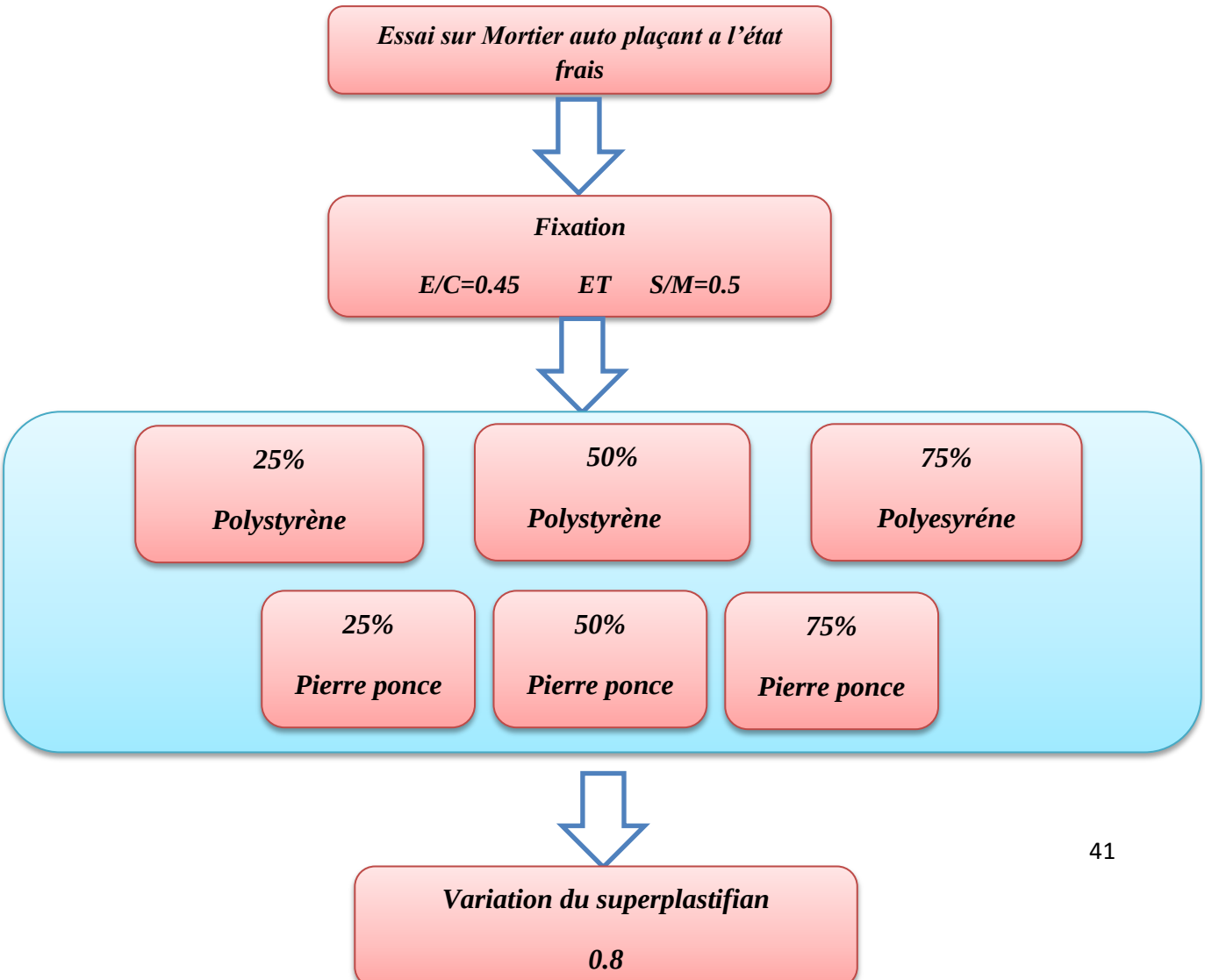


Figure 2.11. Protocole expérimentale a états frais.

2.5.2. Essais effectués sur les MAP à l'état durci

2.5.2.1. Résistance à la compression

Les essais de résistance mécanique de tous les mortiers autoplaçants étudiés ont été effectués sur des éprouvettes de forme prismatique de dimensions (4x4x16) cm^3. Pour chaque gâchée trois éprouvettes ont été confectionnés. Après démoulage. Les résistances à la compression pour chaque mélange, ont été déterminées à l'âge de 7 et 28 jours.

La résistance en compression a été mesurée par compression axiale suivant la norme en vigueur **[17]** sur demis prismes de 4×4×16 cm, à l'âge de 7 et 28 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 kN (Figure. 2.14). La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur les éprouvettes à chaque âge d'essai.

La résistance à la compression est déterminée donc par la formule suivante :

$$\sigma_C = \frac{F_c}{a^2}$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si Fc est exprimée en newtons, cette résistance exprimée en méga pascals vaut :

$$f_{c28}(MPa) = \frac{F_c(N)}{1600}$$

2.5.2.2. Résistance à la traction

À l´âge requis, les éprouvettes sont brisées par flexion en deux moitiés selon la norme [EN 196-1] **[128]**. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (par trois points), une éprouvette prismatique de coté 40 mm et de longueur de 160 mm.

La contrainte de flexion sur la fibre inférieure est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{M}{I} v \qquad \text{(équ. II.6)}$$

M : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge :

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{F_f L}}{\mathbf{4}} \qquad \text{(équ .II.7)}$$

I : Moment d'inertie de la section transversale : $\mathbf{I} = \frac{\mathbf{a^4}}{\mathbf{12}}$ (équ. II.8)

v : La distance de la fibre la plus éloignée : $\mathbf{v} = \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{2}}$ (équ. II.9)

La résistance à la traction par flexion est calculée donc par la formule suivante :

$$\boldsymbol{\sigma_t} = \frac{\mathbf{1.5 F_f L}}{\mathbf{a^3}} \qquad \text{(équ. II.10)}$$

$$\mathbf{f_{t28} = 0.9\ Ft.L\ /\ a^3} \qquad \text{(équ. II.11)}$$

2.5.2.3. Absorption d'eau par capillarité

Conformément à la norme NF EN 1015-18 **[18]**, l'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de mortier autoplaçant préalablement conditionnée par un étuvage à 80°C jusqu'à poids constatant.

A l'issue du sortir en étuvage, la surface latérale des éprouvette est alors enduite de résine (ou de papier aluminium autocollant) pour éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée durant l'essai, puis conservée environ 12 heures dans un dessiccateur à 20 ± 2°C pour permettre le durcissement complet de la résine.

L'essai d'absorption capillaire est réalisé à la suite et consiste à suivre l'évolution de masse des éprouvettes plongées de 5 mm dans de l'eau (Figure. . L'augmentation de la masse de l'échantillon a été mesurée à intervalles de temps (0 min, 12 min, 30 min, 1h, 2h, 4h et 24h) on procède à la pesée des morceaux (mx). La différence de poids entre (m_x) et (m_0) est le poids de l'eau absorbée (m_x-m_0).

Le coefficient d'absorption capillaire Ca est alors calculé par l'équation suivante :

$$C_a = \frac{M_a - M_0}{M_0} \times 100$$

Avec :

M_a : Masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg),

M_0 : Masse initiale de l'éprouvette (kg),

A : section de l'éprouvette (m²).



2.5.2.4. La conductivité thermique

De nombreuses méthodes sont utilisées pour mesurer la conductivité thermique des matériaux. Ces méthodes consistent à soumettre l'échantillon à un flux thermique et mesurer par la suite soit un profil de température soit un flux de chaleur. Dans notre cas Les propriétés thermiques des déférents mélanges ont été mesuré à l'aide d'un CT Mètre conformément la norme NF EN ISO 8894-1 **[20]** (figure. 2.12).

♦ ***Le CT METRE Norme de référence NF EN ISO 8894-1 [20]***

C'est un appareil aisément transportable, a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques de résistance thermique d'un certain nombre de matériaux tels que la brique, les roches, le bitume et le béton.

Le CT-mètre se compose de deux éléments qui sont l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester ; et la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induite.

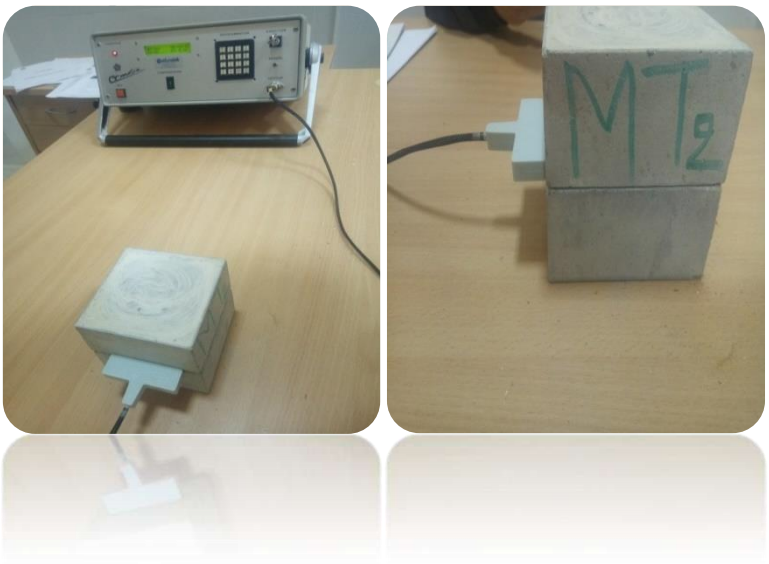


Figure 2.12. L'essai de conductivité thermique par CT-mètre.

La résistance thermique (R) des éléments est proportionnelle à l'épaisseur (e) et inversement proportionnelle à λ, elle est déterminée suivant la relation : R= e/λ.

2.5 .2.5 la porosité :

La porosité accessible à l'eau **€**, exprime en pourcentage en volume est donne par l'équation suivante :

$$€ = Vp / Vt$$

Ma : la masse d'éprouvette imbibée €€dans l'aire ;

Ms : la masse d'éprouvette sec **;**

Me : la masse d'éprouvette immergé dans l'eau ;

2.5.2.6. Essais réalisé sur mortier auto plaçant à l'état durci

L'organigramme présenté sur la figure 2.20 suivante résume les variables d'étude expérimentale réalisée au laboratoire sur les différents MAP à l'état durci. Les différents matériaux utilisés, les essais réalisés et les différents composites obtenus son

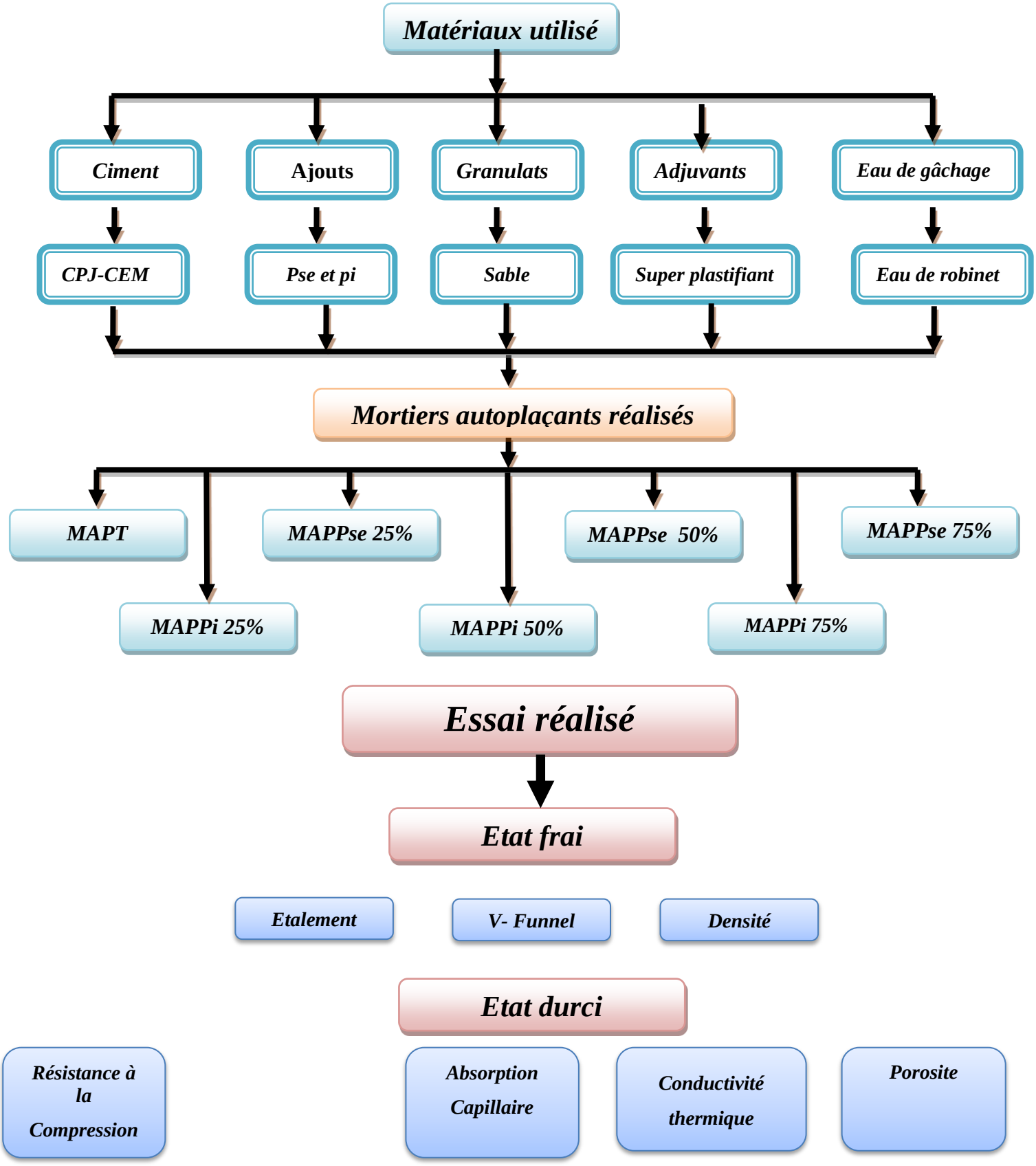




Figure 2.13. Protocole expérimentale a états frais et durci.

Références bibliographiques

[1] NF EN 1097-6, 2001, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau », AFNOR.

[2] NF EN 1097-3, 1998, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire », AFNOR.

[3] NF EN 933-1, 1997, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR.

[4] NF EN 1008, 2003, « Eau de gâchage pour bétons: spécification 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 », AFNOR.

[5] P.L. Domone, J.Jing, « Properties of Mortar for Self-Compacting Concrete », Proceedings of RILEM International Symposium on SCC, Stockholm, September 1999, RILEM Proceedins PRO 7, Paris pp109-120.

[6] OKAMURA H., OUCHI M., 2003 « Self-compacting concrete », Journal of advanced Concrete Technology, Vol. 1, N°1, pp. 5-15.

[7] BOUKENDAKDJI O., 2010, « Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires », Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb, Algérie.

[8] Hamraoui S. et Rebaia F. Z., 2017, « Etude de l'effet des additions minérales sur le comportement d'un mortier autoplaçant traité thermiquement », Mémoire de Master, Université de Médéa, Algérie.

[9] SEDRAN T., 1999, « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants », thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.

[10] KHAYATK.H., PAVATET., ASSAD J., 2003 « Analysis of Variations in Electrical Conductivity to Assess Stability of plastic Cement-Based Materials », ACI Materials Jr.,vol. 4, N°100,pp.342-350.

[11] EDAMATSU Y., NISHIDA N.,OUCHI M., 1999, « A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles », Proceedings of the FirstInternational RILEM Symposium on Self-compacting Concrete, Stockholm, Sweden, pp. 309-20.

[12] PEDERSEN B., SMEPLAS S., 2003, « The relationship between the rheological properties of SCC and the corresponding matrix phase », Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Island, pp106-16.

[13] Boukendakdji, O., Kadri, E.H. and Kenai, S. (2012), "Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete", *Cement Concrete Compos.*, **34**, 583-590.

[14] KIM K. J., SANG H. H., YOUNG C. S.,2002, « Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete. Part I. Experimental results», Cement and Concrete Research J., Vol.32, pp.1087-1094.

[15] NF EN 12390-2, 2012, « Essai pour béton durci. Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance », AFNOR.

[16] NF EN 12350-6, 1999, « Essai pour béton frais. Partie 6 : Masse volumique », AFNOR.

[17] NF EN 196-1, 2016, « Méthodes d'essais des ciments. Partie 1: Détermination des résistances mécaniques », AFNOR.

[18] NF EN 1015-18, 2003, « Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - partie 18 : détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarite du mortier durci -», AFNOR.

[19] NF P15-433**,** 1994**, «** Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement », AFNOR.

[20] NF EN ISO 8894-1 Août 2010, « Matériaux réfractaires - Détermination de la conductivité thermique - Partie 1 : Méthodes du fil chaud ("croisillon" et "thermomètre à résistance") », AFNOR.

3.1. Introduction

L'objectif de l'étude expérimentale est de caractériser l'évolution des propriétés rhéologiques, mécaniques et thermiques du matériau étudié, incorporant certains pourcentages de PSE et PP , Dans ce but, nous étudions dans un premier temps l'effet des remplacements du sable par le polyester et la pierre ponce sur la masse volumique, sur la résistance à la compression et sur le comportement hydrique.

Les résultats des différents essais qu'on a faits sur le mortier frais et durci sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques de trois résultats d'essais.

3.2. Essais effectués sur mortier

3.2.1. Etat frais

3.2.1.1. Densité

Les différentes mesures de densité faites sur les mortiers à l'état frais sont illustrées sur la figure **3.1** et **3.2** suivante :

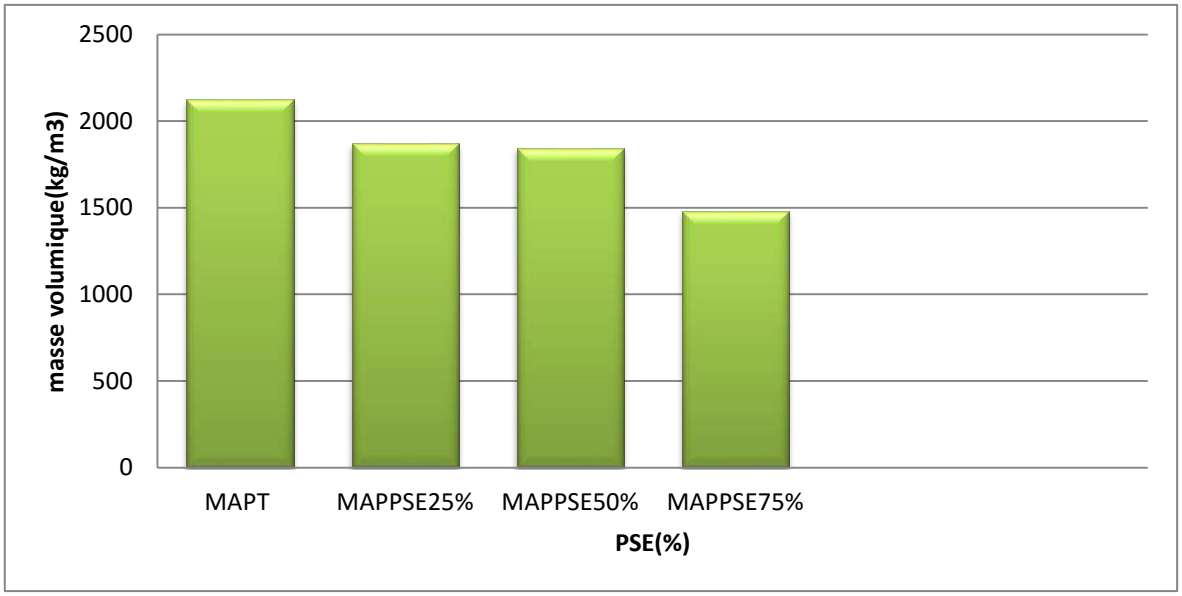


Figure 3.1. Densité des mortiers à l'état frais à base de la substitution en PSE.

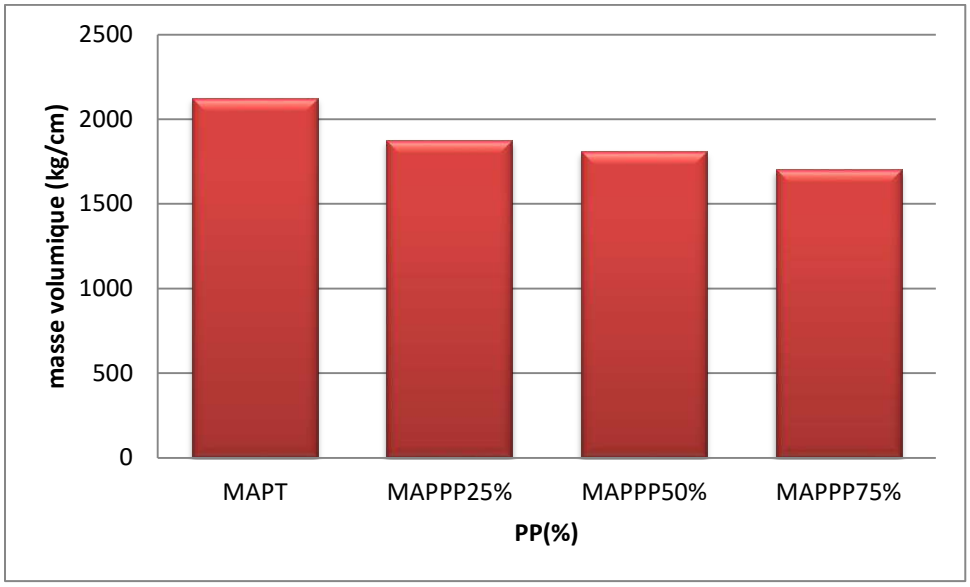


Figure 3.2. Densité des mortiers à l'état frais à base de la substitution en PP.

D'âpres les résultats de la masse volumique des différents MAP, qui sont présenté sur les figures **3.1** et **3.2**, que la densité des MAPPSE et MAPPP est inférieure à la densité du MAPT et qu'il diminue avec l'augmentation de substitution en PSE et PP. Elle est environ de 43% à base de 50% de substitution en PSE et 25% de substitution en PP à base de 75%.

cette faible densité utile dans les travaux l'allégement des structures, peut également faciliter la mise en œuvre sur les chantiers.

Donc cette chute de densité ayant une relation directe avec la masse volumique des polyesters et de la pierre ponce, et puisque la masse volumique du polyester et de la pierre ponce inférieure à la masse volumiques du sable d'el oued, alors la densité diminue avec l'augmentation du pourcentage du PSE et PP.

3.2.1.2. Etalement au mini cône

Les différentes mesures d'étalement sont illustrées sur la figure **3.3** et **3.4**, suivante :

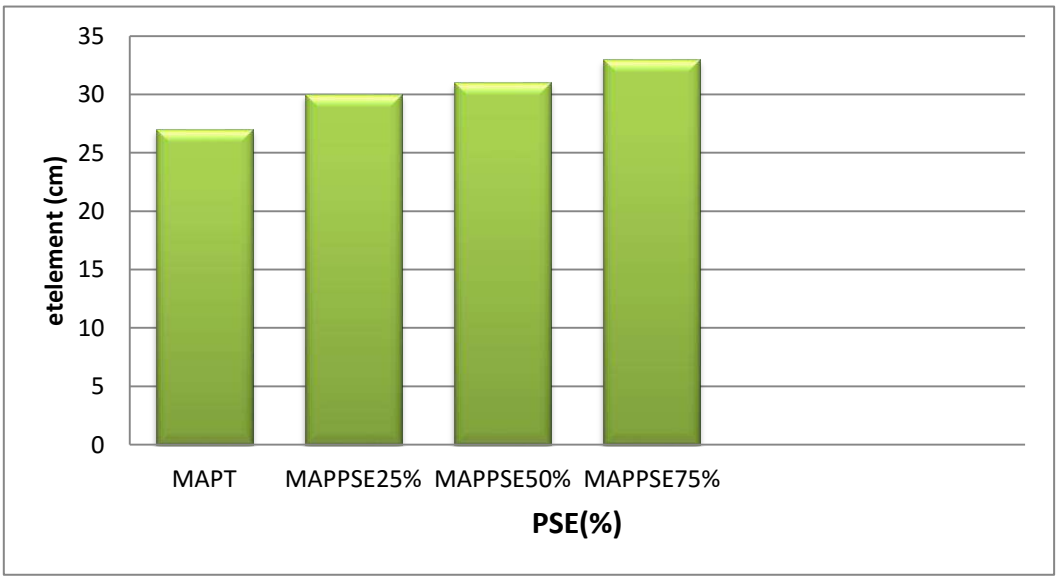


Figure 3. 3: Etalement des mortiers à base de la substitution en PSE.

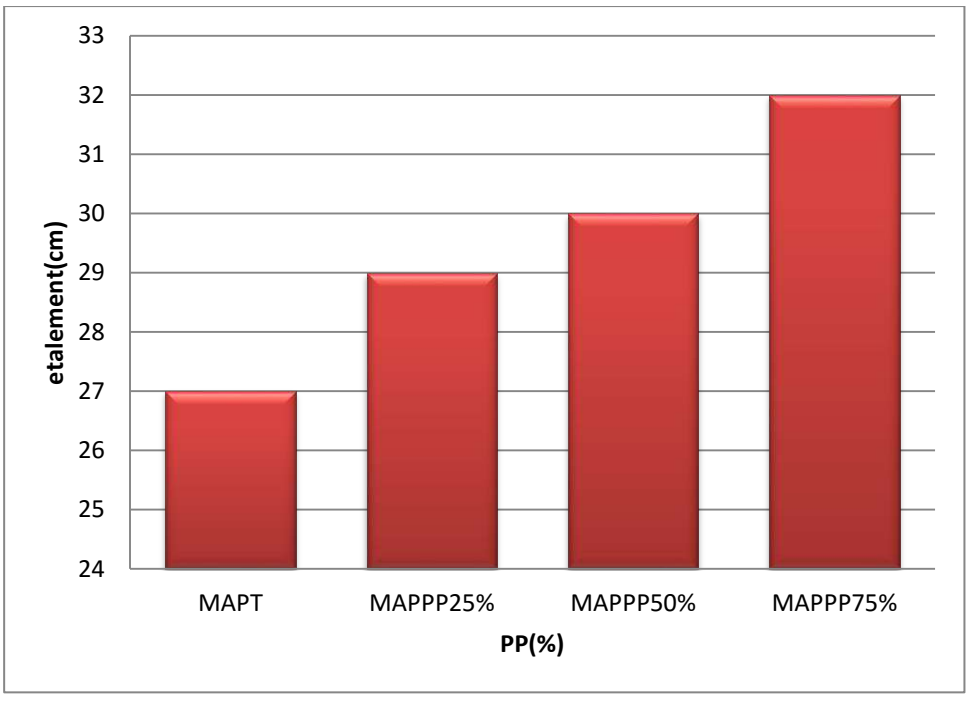


Figure 3.4: Etalement des mortiers à base de la substitution en PP.

D'âpres les résultats d'étalement des différents MAP, qui sont présenté sur les figures **3.3** et **3.4** on remarque que l'étalement des MAPPSE MAPPP augmente avec l'augmentation du pourcentage en substitution en PSE et le pourcentage de PP. Alors la substitution en PSE et PP rend le mortier autoplaçant un peu plus fluide, Cette augmentation et d'environ de 18% pour le MAPPSE et d'environ de 15% pour le MAPPP.

3.2.1.3.le temps d'écoulement (V-funnel) :

Les différentes mesures du temps d'écoulement en T-funnel sont illustrées sur la figure **3.5** et **3.6** suivante :

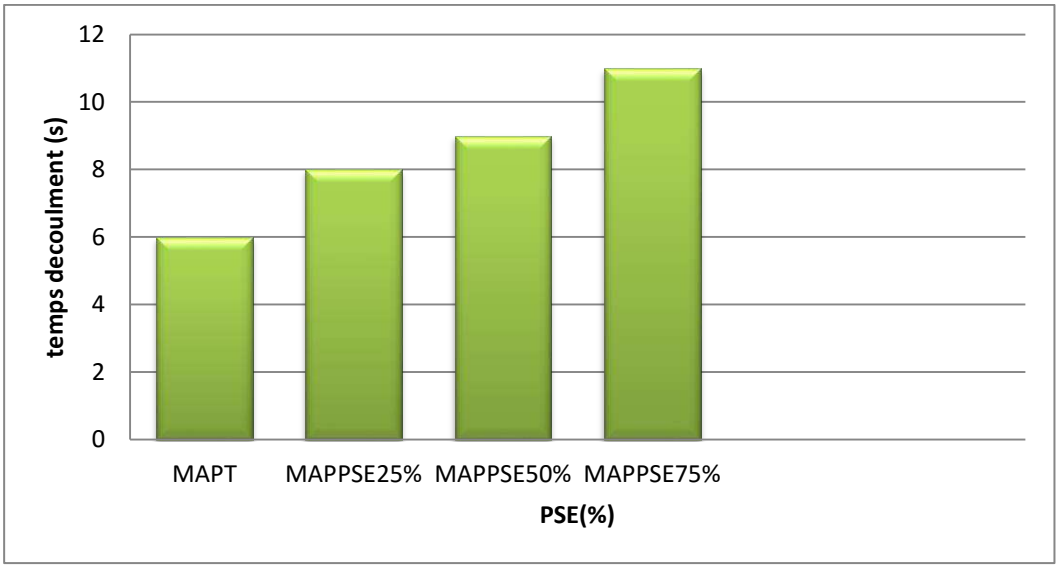


Figure 3.5: Temps V-funnel des mortiers à base de la substitution en PSE.

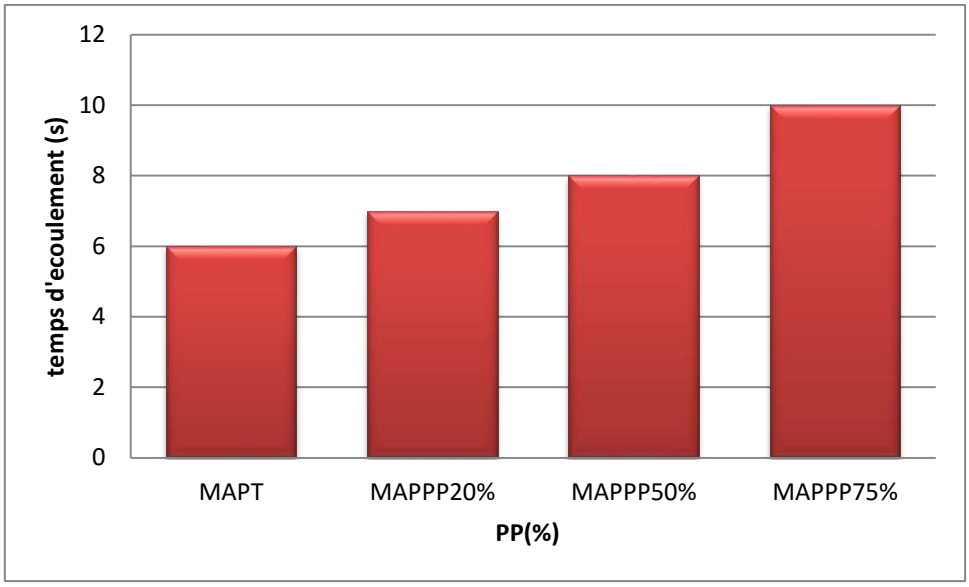


Figure 3.6: Temps V-funnel des mortiers à base de la substitution en PP.

D'après les figures **3.5** et **3.6** On remarque que le temps d'écoulement des MAPPSE et MAPPP augmente si on augmente le pourcentage en substitution en PSE et en PP. Nous pouvons conclure que les compositions choisies assurent une bonne fluidité des bétons quel que soit le type de granulat incorporé et sont pourcentage.

Remarque :

Mortiers autoplaçants à base de polyester avec pourcentage 75%



3.2.2. Etat durci

3.2.2.1. la résistance a la compression

Les résultats de la variation de la résistance à la compression des mortiers autoplaçants à base de polyester et la pierre ponce sont présentés dans les figure **3 .7** et **3 .8** suivante.

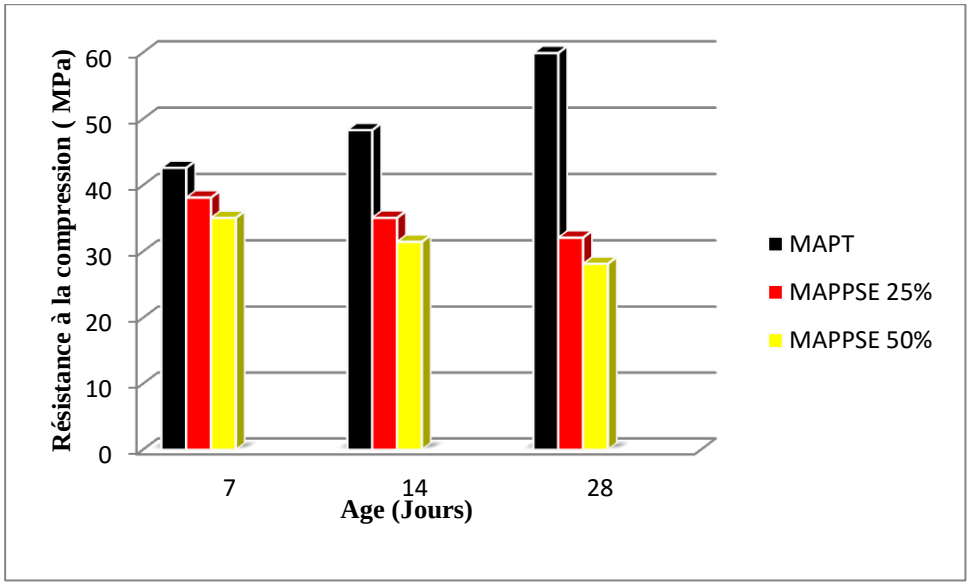


Figure 3.7 : Résistance à la compression des mortiers MAPPSE.

On remarque d'après cette figure, une diminution dans les résistances à la compression de tous les mortiers autoplaçants à base de polyester par rapport au mortier autoplacant témoin. Tel qu'une diminution de l'ordre 17 et 34 % à 7 jours et 14 jours respectivement. En outre, à l'âge de 28 jours, la diminution est de l'ordre 53 % pour le mélange de 50 % de substitution en PSE par rapport au MAPT..

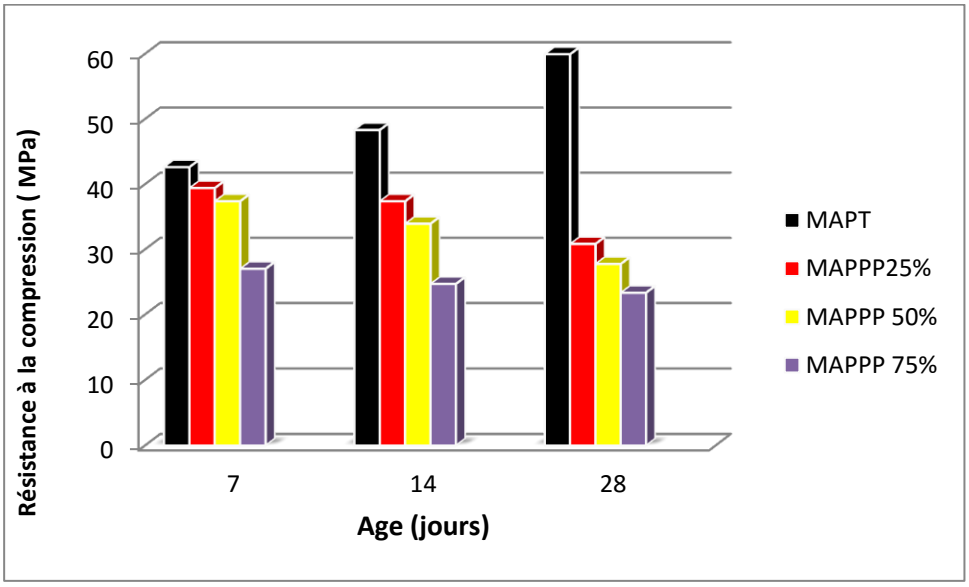


Figure 3.8 : Résistance à la compression des mortiers MAPPP .

La résistance à la compression de tous les mortiers autoplacant réalisés diminuent considérablement avec l'augmentation du pourcentage de la pierre ponce

Soit une réduction de l'ordre de 36% à l'Age de 7 jour et de 48% à 14 jour ,La chute de résistance à la compression à 28 jours est d'environ de 61% pour le MAPPP réalisé avec 75% de la pierre ponce.

Donc, nous constatons la diminution de la résistance en fonction du temps et aussi l'augmentation du pourcentage de PP.

D'après les résultats obtenus dans les figures précédents, on remarque que l'addition des granulats légers à la formulation de tous les types des MAP influe négativement sur la résistance à la compression.

3.3.2.3. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion sur des éprouvettes prismatiques (40x40x160 mm^3) est présentée dans les figures **3.9** et **3.10** suivantes :

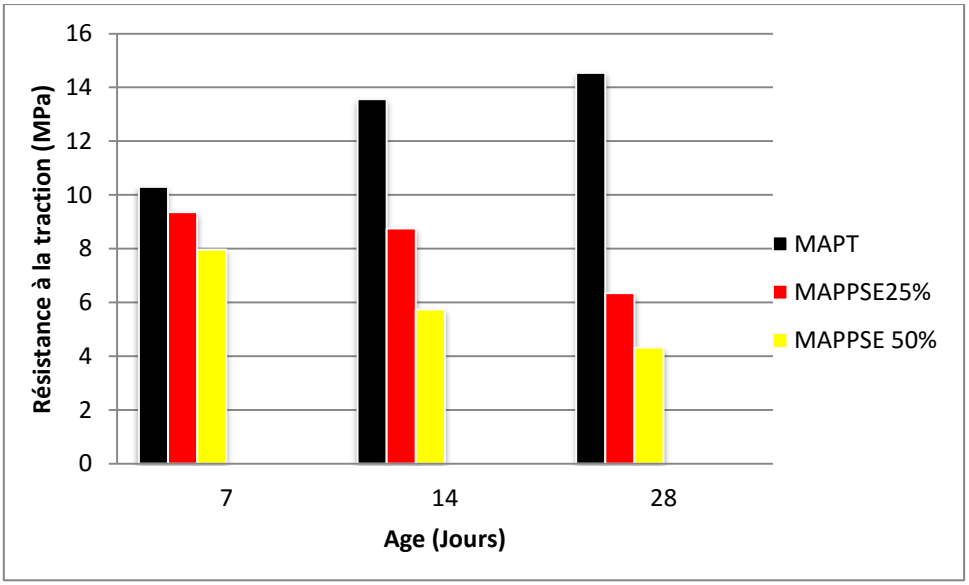


Figure 3.9 : Résistance à la traction par flexion des mortiers MAPPSE.

les résultats de la variation de la résistance à la traction des mortiers autoplaçants à base de polyester sont présentés dans figure **3.9** suivante. On remarque d'après cette figure, une diminution dans les résistances à la traction de tous les mortiers autoplaçants par rapport au mortier autoplacant témoin cette chute est environ de 61 % à 28 jour à base de 50% de substitution de polyester. La chute est de l'ordre de 22 et 57 % à l'âge de 7 et 14 jours respectivement.

On remarque que la résistance à la traction des MAPPSE diminue en fonction de l'âge et de l'augmentation du pourcentage en substitution en PSE.

D'après les résultats obtenus dans les figures précédents, on remarque que l'addition des granulats leger à la formulation de tous les types des MAP influe négativement sur la résistance à la compression.

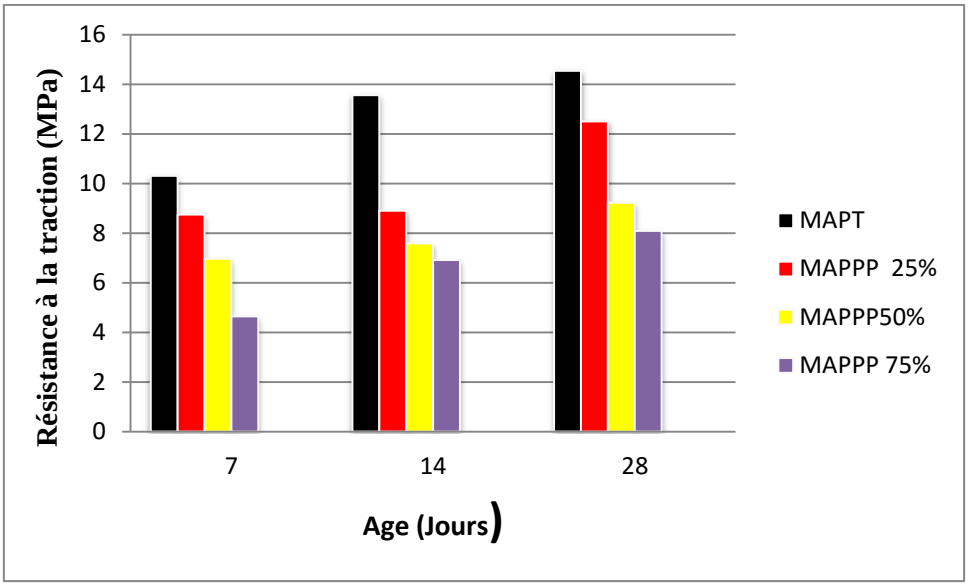


Figure 3.10 : Résistance à la traction par flexion des mortiers MAPPP.

La résistance à la traction par flexion des MAPPP présente une amélioration avec le temps et une diminution avec l'augmentation du pourcentage de la pierre ponce

Cette chute est environ de 44% à l'âge de 28 % pour la substitution de 75% de la pierre ponce.

L'amélioration de la résistance a la traction est en fonction de temps cette augmentation est environ de 74 % pour le mélange de 75% en PP.

3.3.2.4. Absorption d'eau par capillarité

L'évolution de l'absorption d'eau par capillarité dans le temps des différents MAP réalisés, est représentée dans les figures **3.12** et **3.13 :**

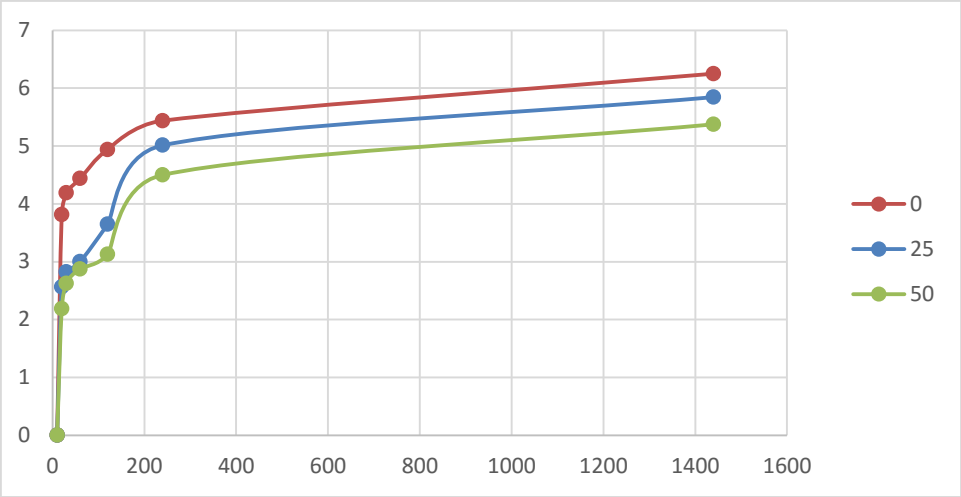


Figure 3.11: Absorption d'eau des mortiers MAPPSE.

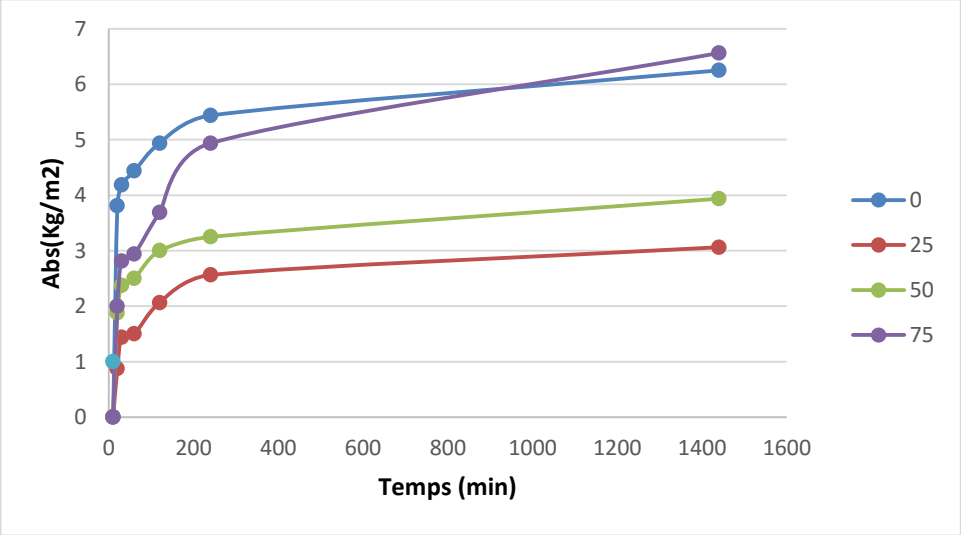


figure.3.12 : Absorption d'eau des mortiers MAPPP.

Les résultats d'absorption qui sont présentés ici, obtenus sur des demi-prismes des éprouvettes (40x40x160 mm^3) en contact avec une nappe d'eau de 5 mm, représentent effectivement l'état pyrométrique des premiers millimètres de l'éprouvette, sachant que la porosité du MAP est proportionnelle à la vitesse d'absorption d'eau.

On constate en premier lieu que l'absorption initiale est nettement plus grande pour l'ensemble des MAPPSE et MAPPP. Ce résultat confirme aussi l'importance de l'absorption d'eau durant les premiers instants pour évaluer la porosité de surface du

mortier autoplaçant à base de polyester et de la pierre ponce par rapport au mortier autoplaçant témoin.

Après l'observation des résultats de la figure **3.11**, et **3.12** on remarque que les mortiers temoin présentent un taux absorption d'eau moins élevé que celui des mortiers de pourcentage de 25 e50% de substitution de polyester et de 25 ,50 et 75% de la pierre ponce .

3.3.2.5. Conductivité thermique

A. état humide

Les variations de la conductivité thermique des MAPPSE et MAPPP a l'Etat humide sont représentées sur la figure **3.13** et **3.14 :**

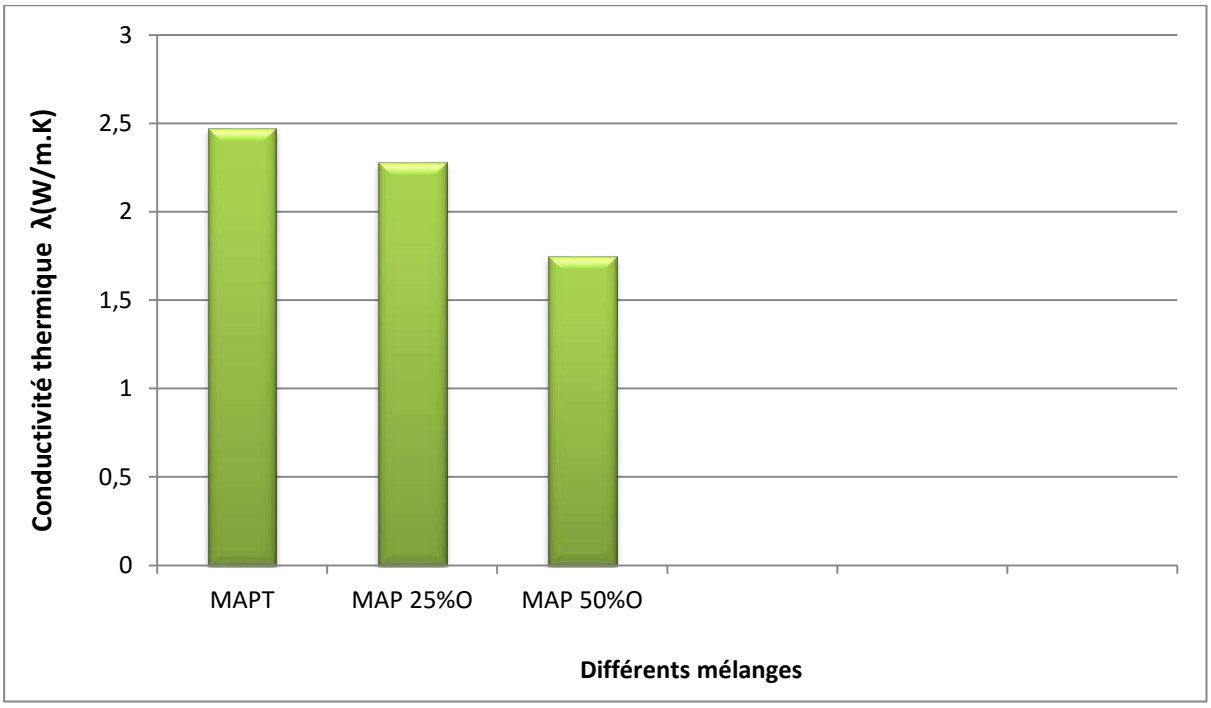


Figure 3.13 : variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en PSE.

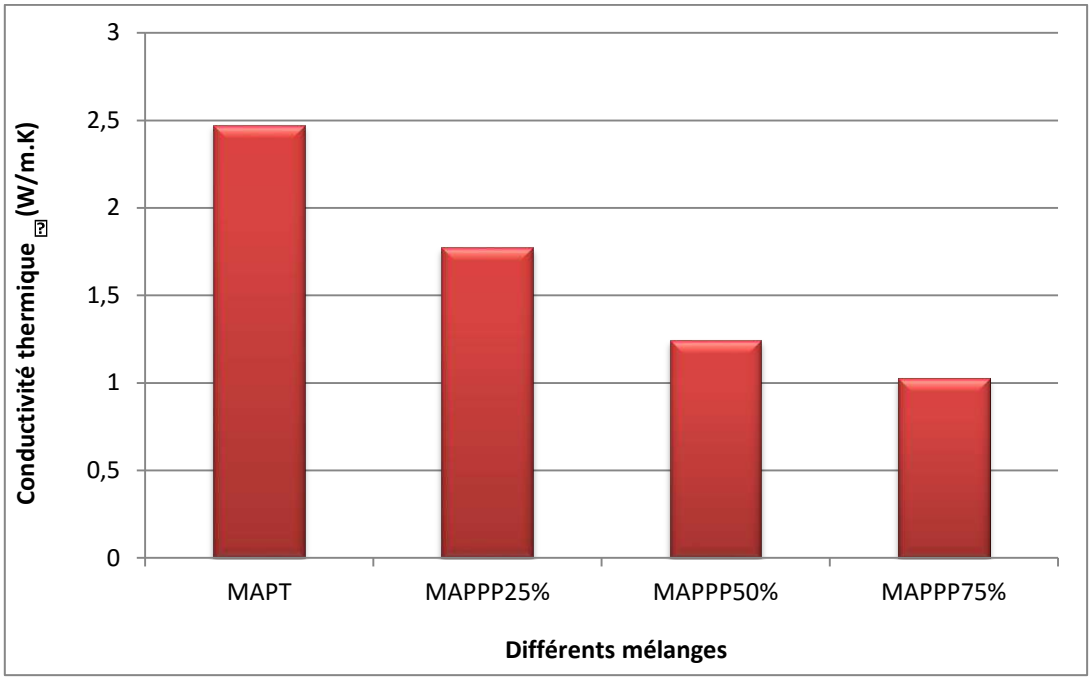


Figure 3.14 : variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en PP.

Les résultats obtenus dans la figure ci-dessus montrent que la conductivité thermique des MAPPSE et MAPPP a l'état humide diminue avec l'augmentation du pourcentage de polyester et de la pierre ponce.

Soit une réduction de l'ordre de 29 % pour le pourcentage de 50% de substitution en polyester.

Pour le pourcentage 75%, de la pierre ponce la chute elle est environ de 58%, donc moins que celle d'un mortier témoin. Alors, c'est un mortier thermiquement performant.

B état sèche :

Les variations de la conductivité thermique des MAPPSE et MAPPP a l'Etat humide sont représentées sur la figure **3.15** et **3.16**

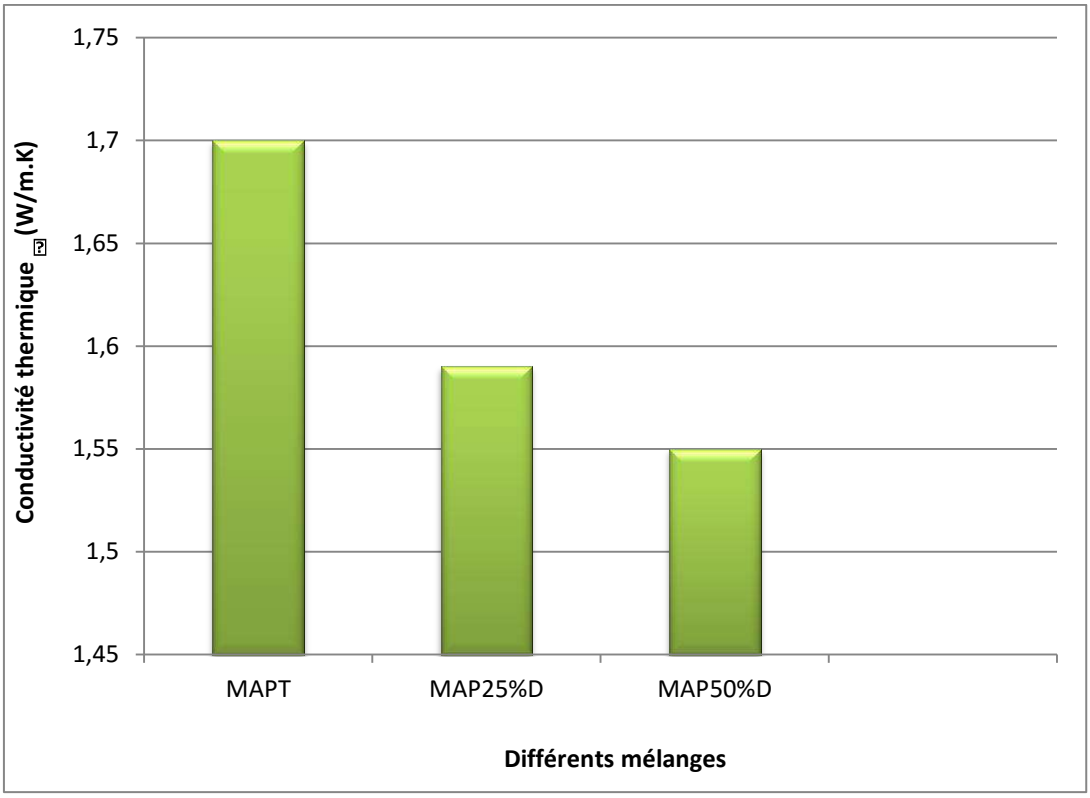


Figure 3.15 : variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en PSE.

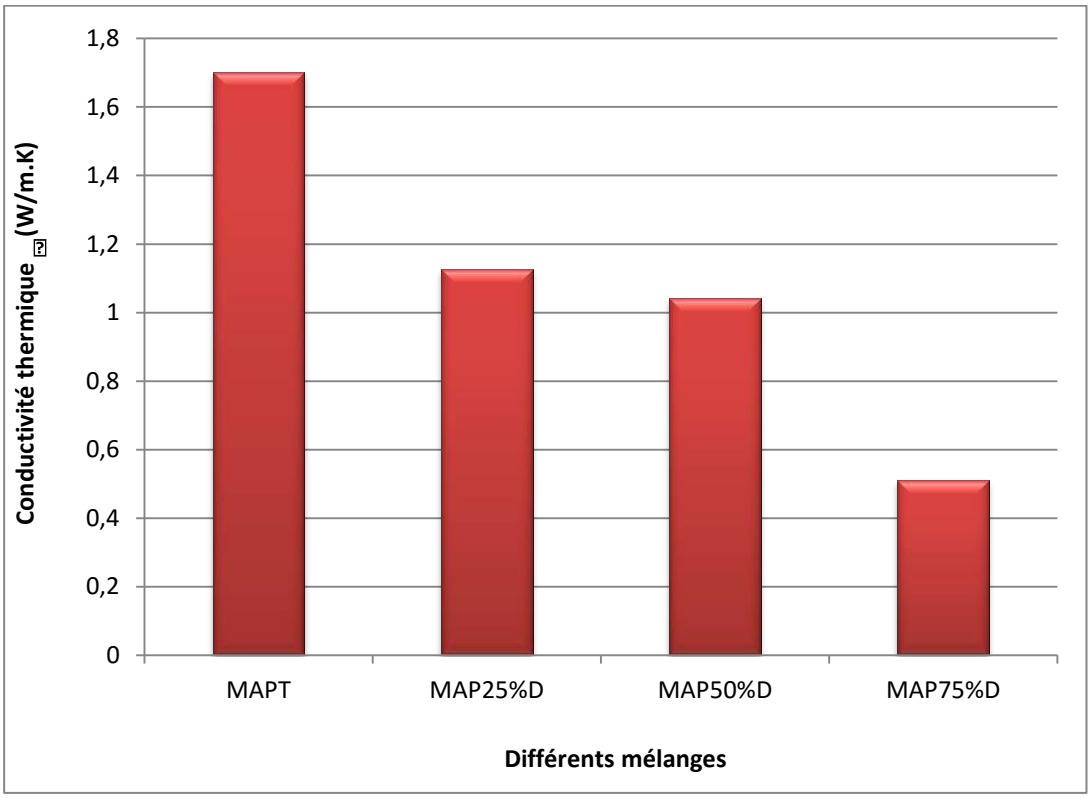


Figure 3.16 : variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en PP.

Les résultats obtenus dans la figure ci-dessus montrent que la conductivité thermique des MAPPSE et MAPPP a l'état sèche diminue avec l'augmentation du pourcentage de polyester et de la pierre ponce.

Soit une réduction de l'ordre de 9 % pour le pourcentage de 50% de substitution en polyester.

Pour le pourcentage 75% λ = 0.509 W/m.k, elle est d'environ 88 moins que celle d'un béton témoin. Alors, c'est un béton thermiquement performant.

3.3.2.6. Résistance au sulfates

- **Résistance à la compression**

  La résistance à la compression sur des éprouvettes prismatiques (40x40x160 mm^3) est présentée dans les figures **3.17** et **3 .18 :**

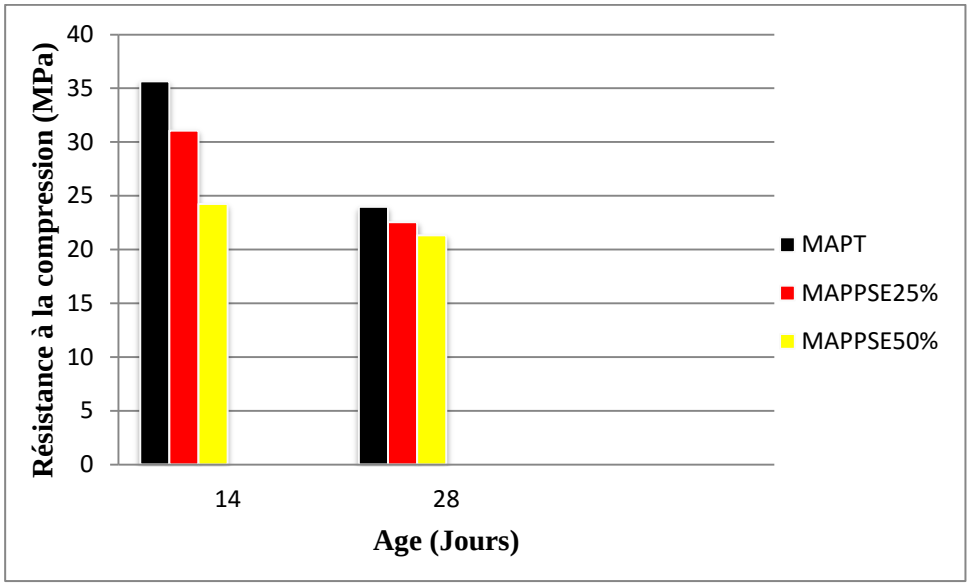


Figure 3.17 : Résistance à compression des mortiers MAPPSE.

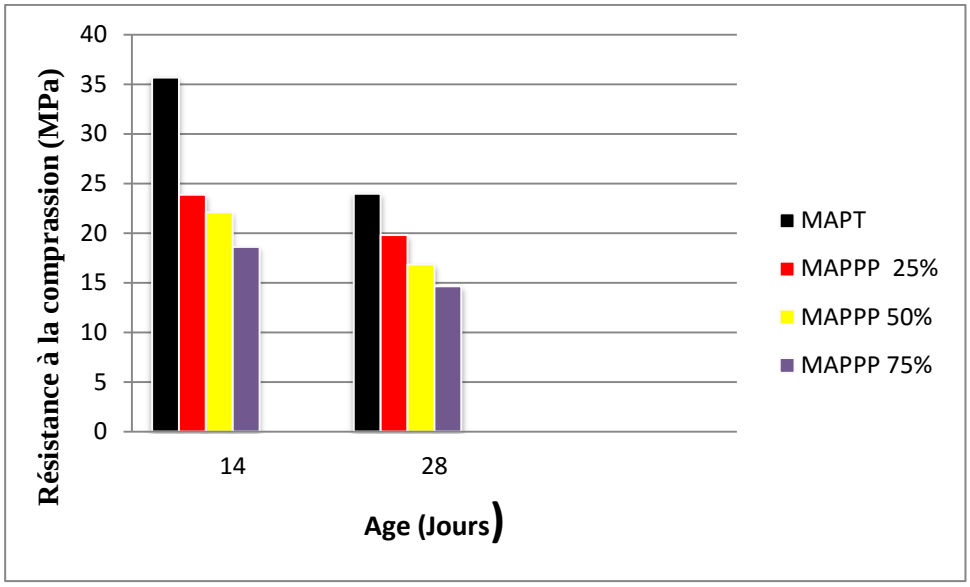


Figure 3.18 : Résistance à compression des mortiers MAPPP.

On remarque d'après cette figure, une diminution dans les résistances à la compression de tous les mortiers autoplaçants à base de polyester et de la pierre ponce par rapport au mortier autoplacant témoin.

Tel qu'une diminution de l'ordre 30 et 10 % à 14 jours et 28 jours respectivement pour le mélange de 75% de substitution en polyester.

Pour la pierre ponce la chute est environ de 47 et 39% a 14 jours et a 28 jours pour le mélange de 75% de substitution en pierre ponce.

- **Résistance à la traction par flexion**

La résistance à la traction par flexion sur des éprouvettes prismatiques (40x40x160 mm^3) est présentée dans les figures **3.19** et **3 .20** suivantes :

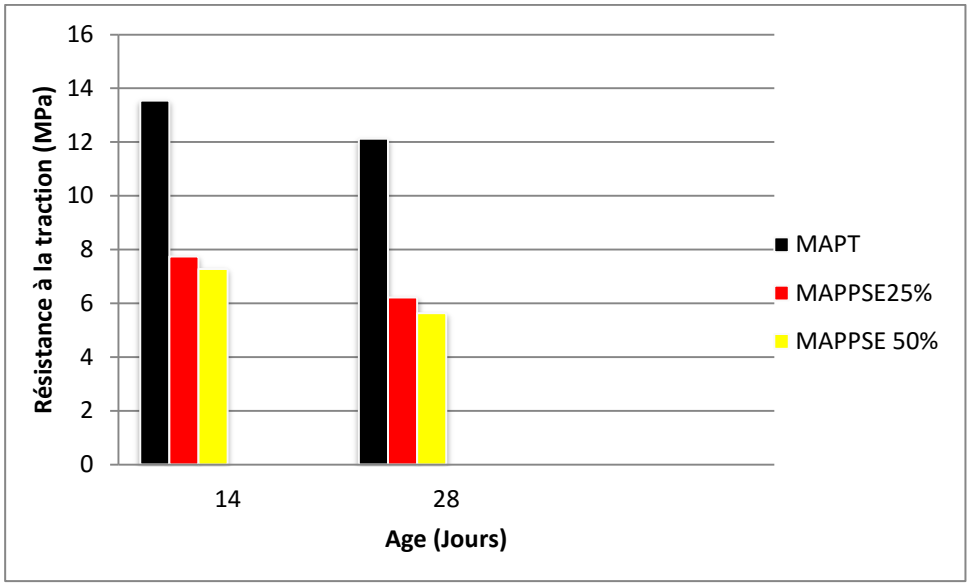


Figure 3.19 : Résistance à la traction par flexion des mortiers MAPPSE.

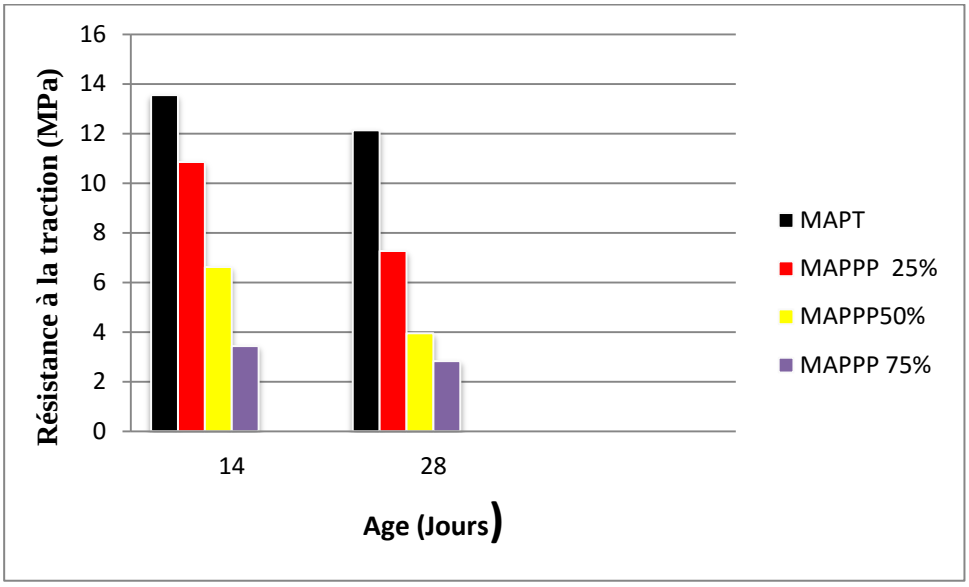


Figure 3.20 : Résistance à la traction par flexion des mortiers MAPPP

La résistance à la traction à 28 jours des MAPPSE et MAPPP ne dépasse pas 14 MPa

Les résultats de la variation de la résistance à la traction des mortiers autoplaçants à base de polyester sont présentés dans figure suivante. On remarque d'après cette figure, une diminution dans les résistances à la traction de tous les mortiers autoplaçants à base au

mortier autoplacant témoin cette chute est environ de 53 % à 28 jour à base de 50% de substitution de polyester et de 40 % à l'âge 14 jours.

Soit une réduction de l'ordre de 76% observé pour le mélange de 75% de substitution de la pierre ponce et de l'ordre de 74% à l'âge de 14 jours pour le mélangé de 75%.

On remarque que la résistance à la traction des MAPPSE diminue en fonction de l'âge et de l'augmentation du pourcentage en substitution en PSE et PP.

3.3.2.7. La porosité

Les résultats de la porosité sont présente dans les figures **3.21** et **3.22** suivantes

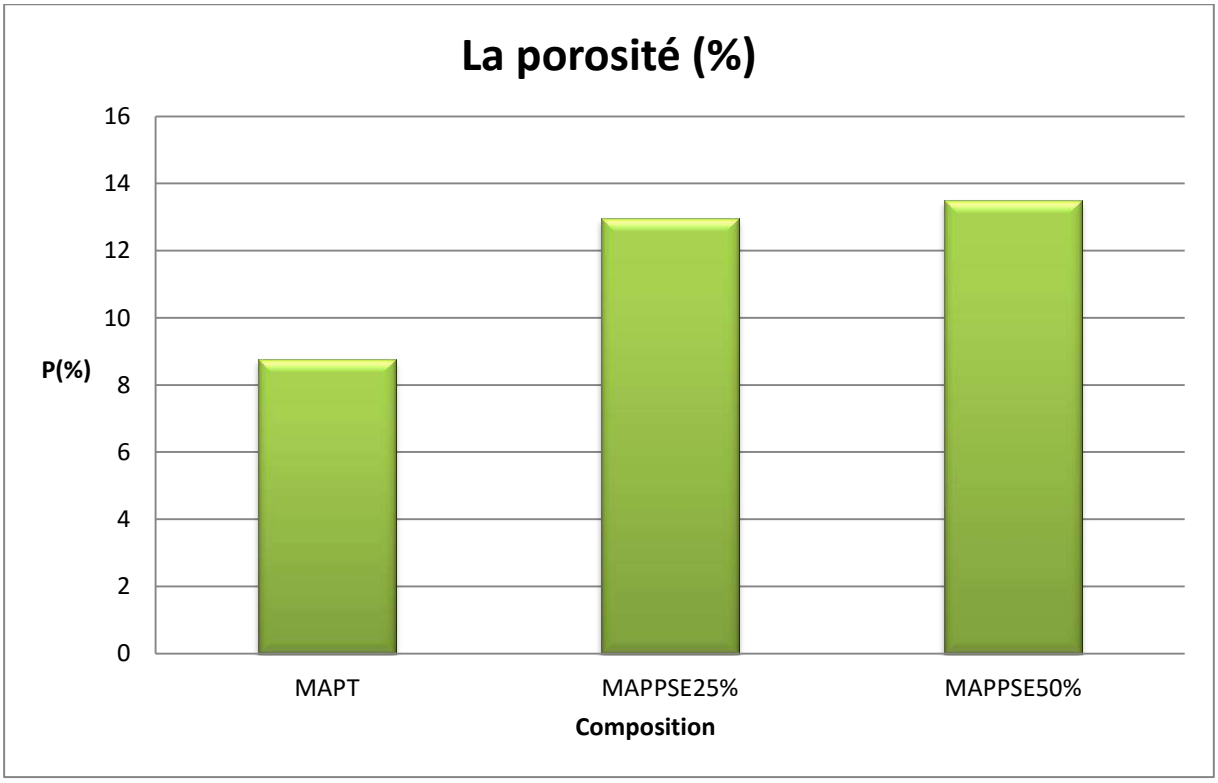


Figure 3.21 : variation de la porosité des mortiers à base de PSE.

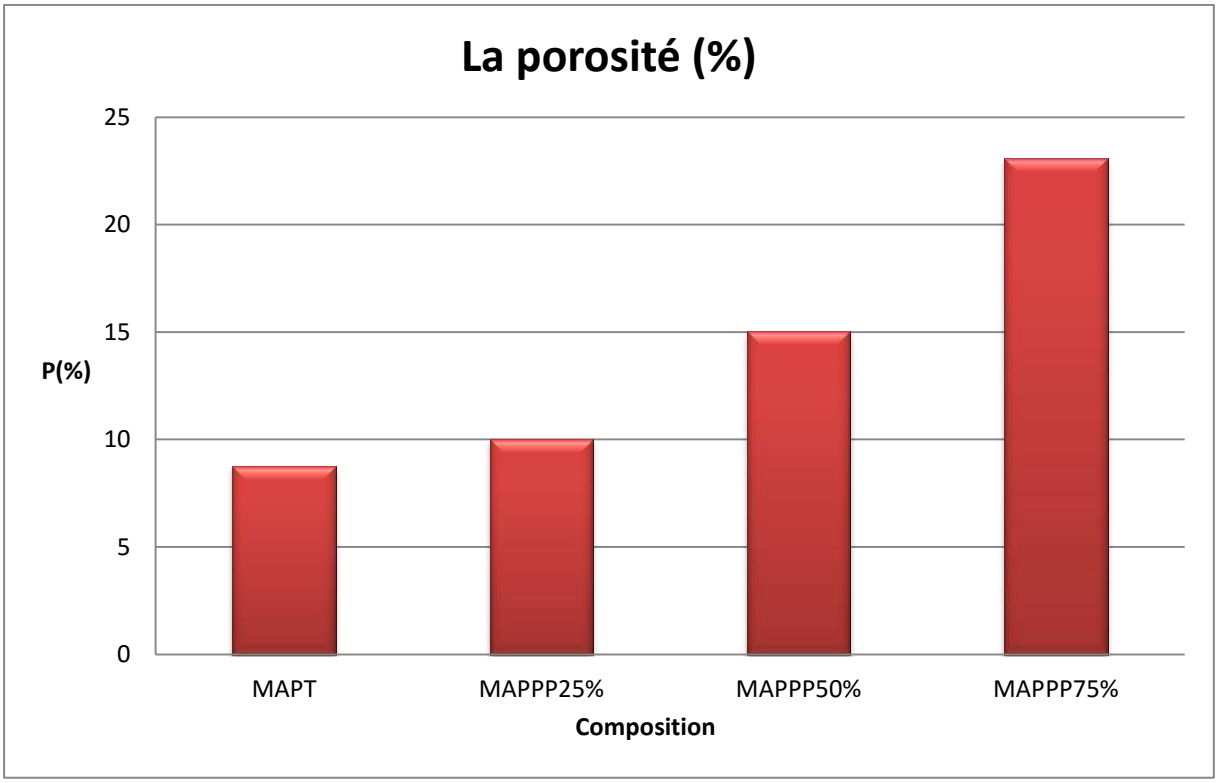


Figure 3.22 variation de la porosité des mortiers à base de PP.

Après les résultats obtenus on remarque que la porosité des mortiers avec les granulats légers (polyester et la pierre ponce) est plus élevé que celle du mortier

3.3.2.7. La vitasse des ondes soniques au sulfate

Les résultats de la porosité sont la vitasse des ondes soniques dans les figures **3.23** a **3.30** suivantes

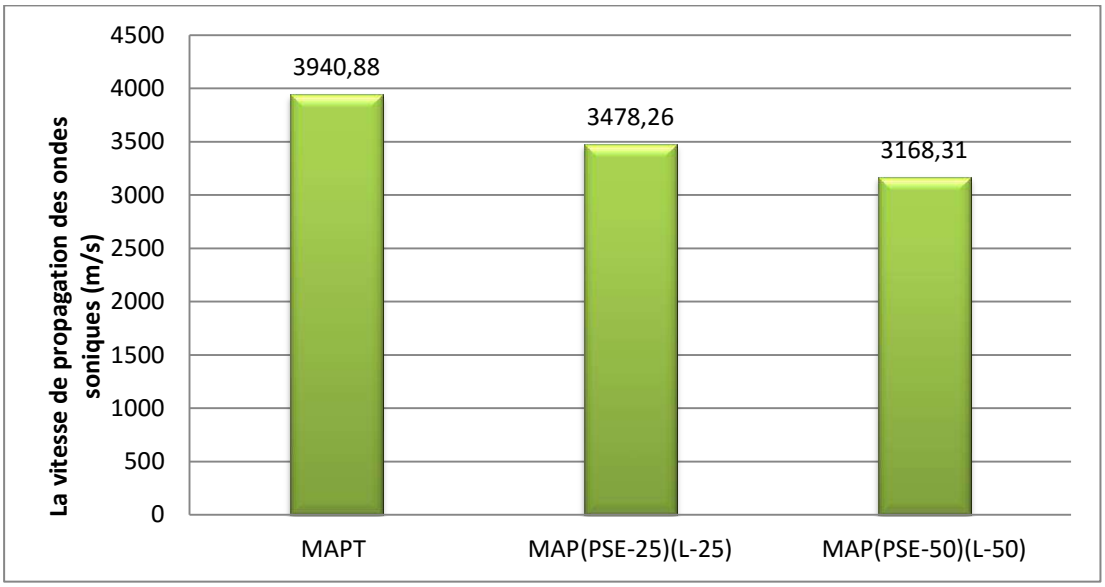


Figure 3.23 : variation de la vitasse des ondes sonique des mortiers à base de PSE(1jour).

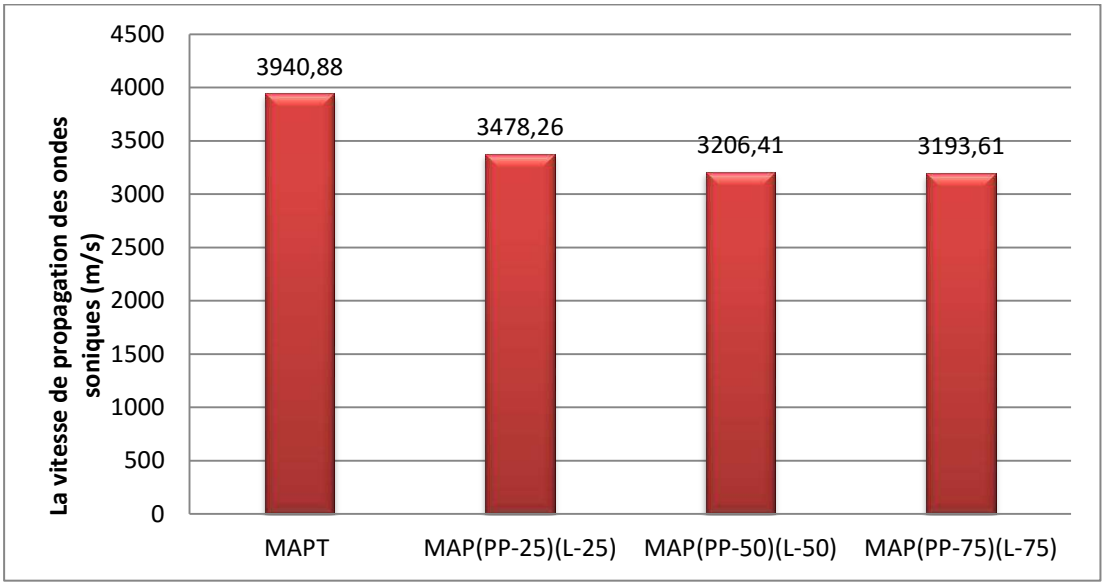


Figure 3.24 : variation de la vitasse des ondes sonique des mortiers à base de PP(1jour)

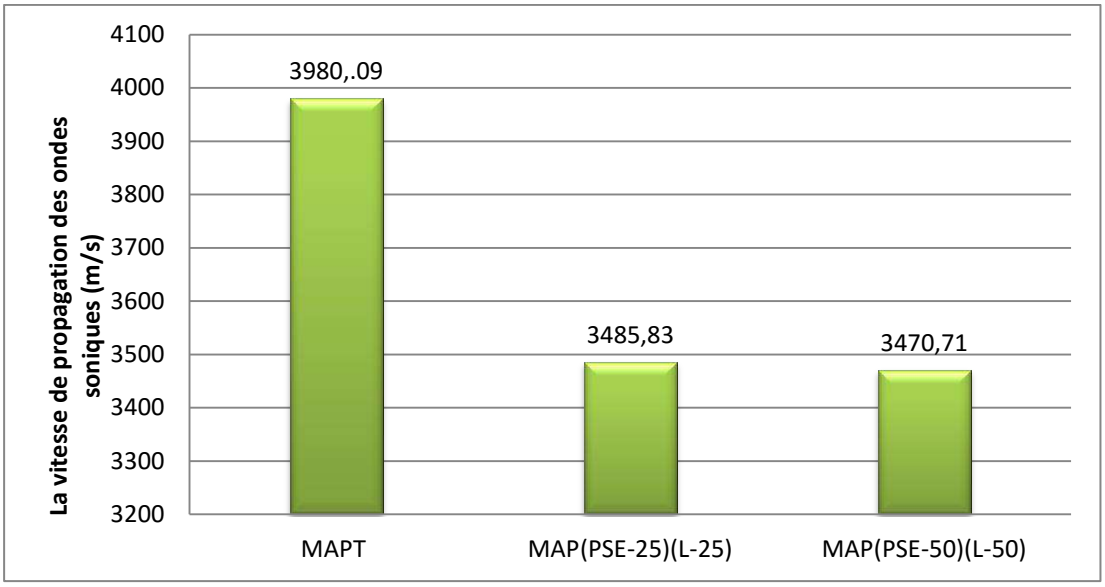


Figure 3.25 : variation de la la vitasse des ondes sonique des mortiers à base de PSE(7jour).

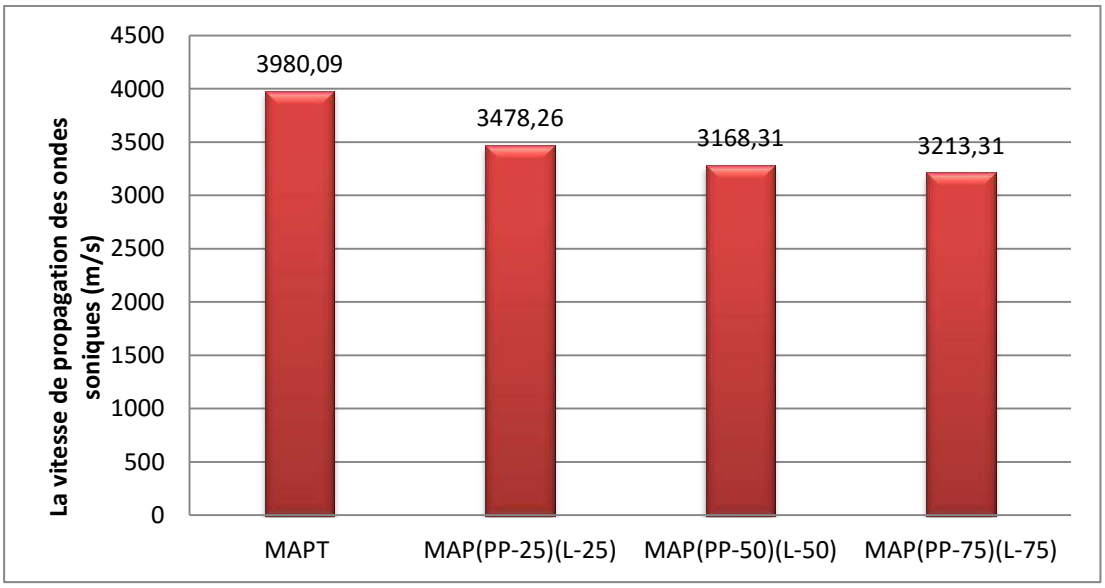


Figure 3.26 : variation de la vitasse des ondes sonique des mortiers à base de PP(7jour).

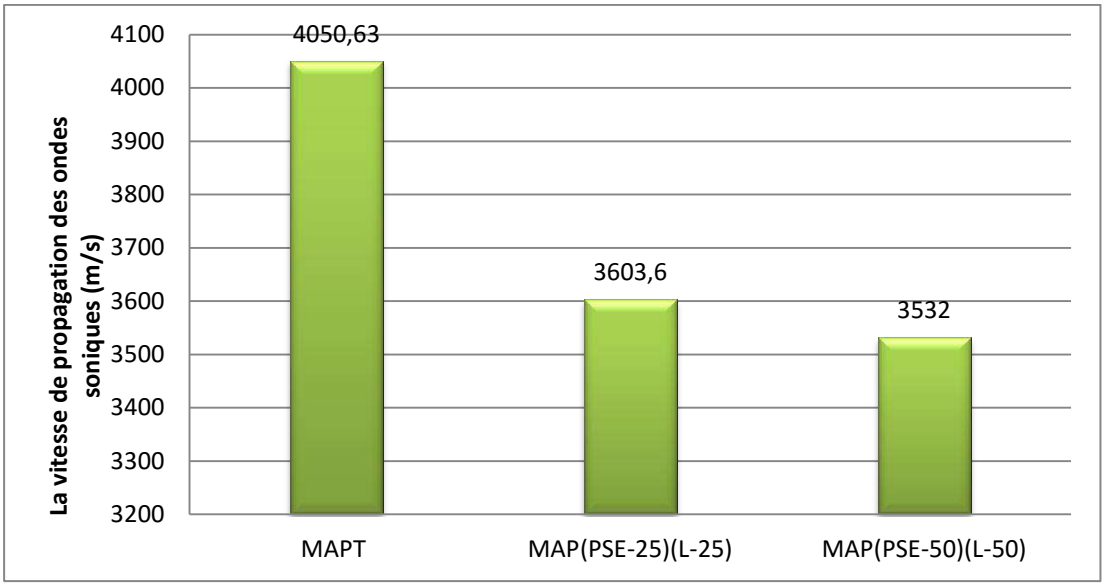


Figure 3.27 : variation de la vitasse des ondes sonique des mortiers à base de PSE(14jour).

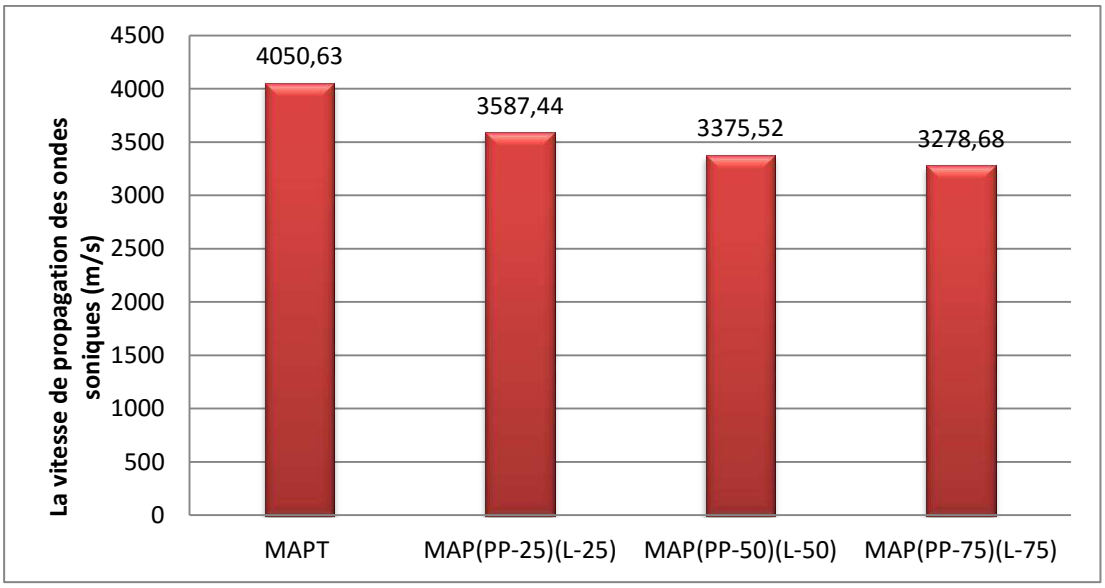


Figure 3.28 : variation de la vitasse des ondes sonique des mortiers à base de PP(14jour).

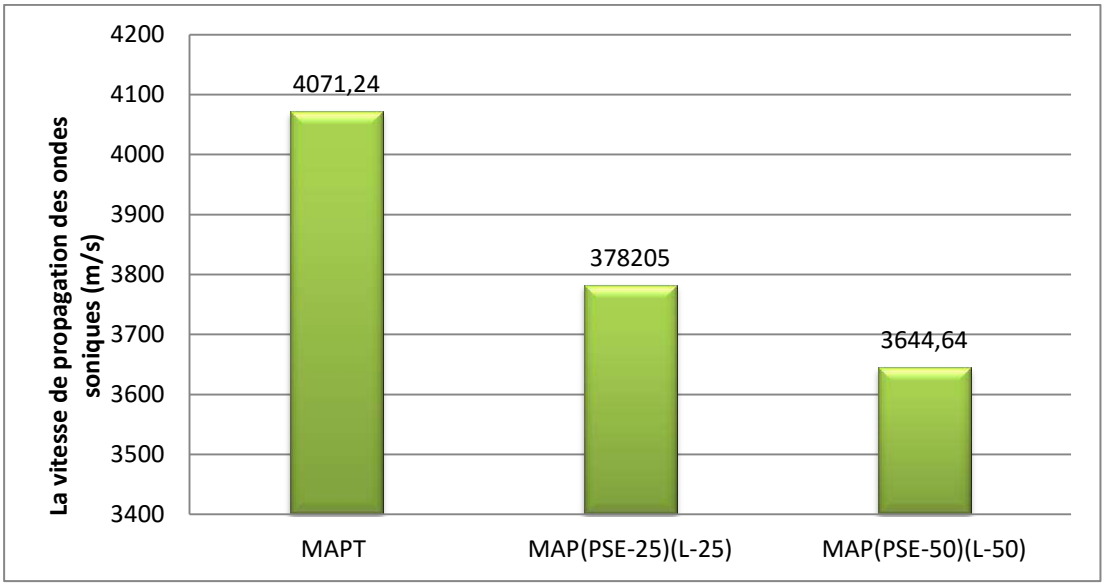


Figure 3.29 : variation de la vitasse des ondes sonique des mortiers à base de PSE(28jour).

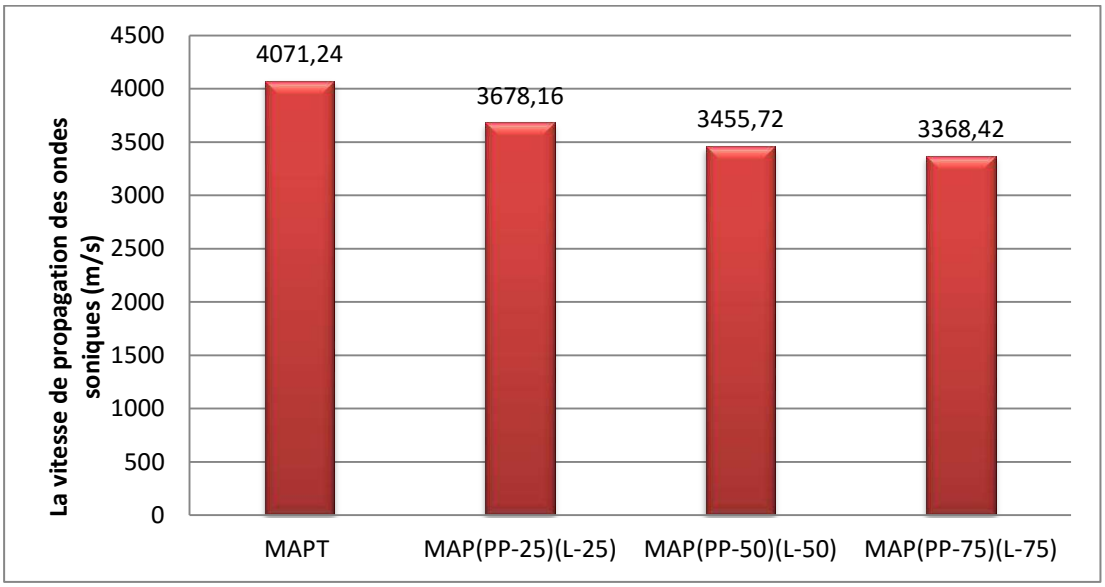


Figure 3.30 : variation de la vitasse des ondes sonique des mortiers à base de PP(28jour).

Après les résultats obtenus on remarque que la vitasse des sonique des on des mortiers avec les granulats légers (polyester et la pierre ponce) est diminue que celle du mortier

On remarque que la vitasse des ondes sonique des MAPPSE ougmente en fonction de l'âge et de diminiution du pourcentage en substitution en PSE et PP.

Conclusions générales

Notre étude a permis de mettre en évidence l'effet de la substitution de polyester et la pierre sur le comportement physico -mécanique et thermique pour les différents composite formulé.

L'analyse des résultats expérimentaux a permis de conclure que :

- ✓ une réduction de la masse volumique est de l'ordre de 43% pour la substitution de PSE et de 25% pour le PP ,cette faible densité utile dans les travaux l'al légement des structures .
- ✓ la fluidité du mortier (MAPPSE ,MAPP) est améliorée par rapport au mortier témoin.
- ✓ Pour les deux types de granulats légers , la résistance à la compression et a la traction par flexion est diminuée par rapport au mortier autoplaçant témoin.

- ✓ la capacité d'absorption d'eau de tous les MAP est diminuée en fonction de l'incorporation des granulats légers.

- ✓ Les deux granulats légers (le polyester et la pierre ponce), diminuent la conductivité thermique du mortier autoplaçant.
- ✓ - Les mortiers autoplacants à base de 75% de la pierre ponce estconsidérés comme matériaux isolants grâce à leur conductivité thermique (λ) qu'est inférieur à 1 W/m.C.

- ✓ Une amélioration de la porosité des mortiers realise à base des granulats legers .

Recommandations

Les observations et les analyses que nous avons effectuées dans le cadre de cette recherche pourraient mener à des développements futurs. Pour cela on recommande les étudiants d'approfondir dans ces recherches et surtout d'étudier:

- Etude des BAP à base de polyester et la pierre ponce ;
- Incorporation de certaines fibres pour améliorer la résistance à la traction du MAPPSE et MAPPP
- Des études restent à mener sur d'autres types de bétons (béton prêt à l'emploi, blocs de béton, BHP …etc) à base de PSE et PP ;
- Les essais de durabilité à savoir le gel dégel, doit être vérifié sur ces MAP avec des granulats légers ;
- L'étude de l'effet des sulfates ($MgSO_4$, Na_2SO_4) sur ces MAP ;
- Utilisation des ajouts minéraux comme la fumée de silice ou le laitier pour améliorer la résistance à la compression du MAP avec des granulats légers

[1] OKAMURA H.ET AL, "self-compacting high performance concrete" Proceeding of the fifth sec vol.3, pp.2381-2388, 1995.

[2] EL BARRAK M., 2005« Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais » Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, France, 228 pages.

[3] Antoine Vavel, « *Bétons Autoplaçants : la haute technologie au quotidien* », Solution Béton, Constructions Modernes n°114, pp16.

[4] Okamura H., Ouchi M., "Self-Compacting Concrete. Development, present use and future", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 1999, Stockholm, Suède pp. 3-14.

[5] BENSEBT SALAH EDDINE, Formulation et propriétés des bétons autoplaçants, thèse de doctorat,20 juillet 2008,UM.Constantine ; Algérie.

[6] Bezzi Tiziri, Souidi Fatiha, Chelouah Nacer, Influence de l'ajout d'une argile locale, cuite et broyée,
sur la résistance a la compression et le retrait d'un beton autoplaçant, Université Abderahmane MIRA, Béjaia, Algérie,

[7] Boukendakdji Othmane, *Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires*, Thèse de Doctorat d'état, Université de Blida, Algérie, 2010.

[8] YAMMINE JOUMANA., rhéologie des bétons fluides à hautes performances relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques, thèse de doctorat, l'Ecole Normale Supérieure de Cachan**,** 262 p, 2007.

[9] ADAM.M.NEVILLE ; propriétés des bétons, traduit par le CRIB, édition Eyrolles.

[10] Sandrine Bethmont, « Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçcnts (BAP) », Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.

[11]SEDRAN THIERRY ;Les bétons autonivellents, synthèse bibliographique ; thèse de doctorat d'école
national des ponts et chausses, mars 1999.

[12] « *Bétons Auto-plaçants* », Recommandations Provisoires, Document Scientifiques et Techniques, ISSNencours, Juillet 2000.

[13] BOUCHENEB YACINE : mémoire de magistère, Retrait plastique des bétons autoplaçants ,université
de Mouloud Mammeri,Tizi-Ouzou,2011.

[14] Assie, S « Durabilité des bétons autoplaçants », thèse de doctorat de L'INSA de Toulouse, 2004.

[15] MAHER EL BARRAK, thèse de doctorat contribution à l'étude de l'aptitude ç l'écoulement des
bétons autoplaçants à l'état frais, thèse de doctorat, Université de Toulouse, 12juillet 2005.

[16] Association Française de Génie Civil, « Bétons autoplaçants - Recommandationsprovisoires », Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000.

[17] M. Ouchi, Y. Edamatsu. “A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete”.In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete.RILEM, 1999.

[18] Yen et al., Flow behaviour of high strength high-performance concrete, cement and concrete composites, 1999, vol 21, pp 413-424.

[19] Eric. P., Koehler. E.P., Fowler. D.W., “ Aggregates in Self-Consolidating Concrete”,Final Report ICAR Project 108. Aggregates Foundation for Technology, Research, and Education (AFTRE). International Center for Aggregates Research (ICAR). The University of Texas at Austin,2007, 353p.

[20] GIBBS J.C. and ZHU W., “ Strength of hardened self-compacting concrete ”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 199-209, 13-15 septembre 1999.

[21]TURCRY P., ROZIERE E.,LOUKILI A.,2005« Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait des bretons autoplaçants ». XXIIIème RencontresUniversitaires de Génie-Civil, Grenoble.

[22] PINEAUDA., 2007« Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons Autoplaçants et application à l'industrie de la préfabrication ». Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise,France, page 271.

[23] UYSAL M.,YILMAZ K., 2011« Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete »,Cement and Concrete Composites J., Vol. 33,pp.771-6.

[24] Wenzhong Zhu, John C. Gibbs, "Use of different limestone and chalk powders inself-compacting concrete", Cement and Concrete Research 35 (2005) 1457– 1462.

[25] Othmane Boukendakdji, El-HadjKadri , Said Kenai "Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete".

[26] KAPOOR Y., MUNN C., CHARIF K., 2003« Self-Compacting concrete – an economic approach » Proceedings of Seventh International Conference on Concrete in Hot and Aggressive Environments,Manama, Kingdom of Bahrain, pp.509–19.

[27]KHELIFA R.,2002 «L'impact des cimenteries sur l'environnement, Cas de la cimenterie de Ain-Touta», Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d'Orléans.

[28**] BOEL V., AUDENAERT K., DE SCHUTTER G**.,2002, « Pore structure of self-compacting concrete », First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, pp. 837-843.

[29] Persson B. "Creep, Shrinkage and Elastic Modulus of Self-Compacting Concrete" Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete 1999 in Sweden, pp. 239-250.

[30] ROZIERE E., GRANGER S., TURCRY P., LOUKILI A., 2007« Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete », Cement and Concrete Composites J., Vol. 29, pp. 626–636.

[31] Philippe Turcry, « Retrait et Fissuration des Betons Autoplaçants », Influence de la Formulation. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes 2004.

[32] WALRAVEN, "Structural aspect of self-compacting concrete", Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, Reykjavik, Islande, pp 15-22, août 2003.

[33] KOMAR, 1978 « *matériaux et éléments de construction* ». Traduit du russe par Fréodor Siniaver et Oleg Partchevski Edition Mir 1978.

[34] Neville, A. M. (2000). Propriétés des bétons. Paris : Editions Eyrolles5 Y. J ANNOT (12-18/11/08): « *Métrologie thermique* » .Séminaire PER AUF, LEA Dakar,

[35] J.M Chaix ; G.Laviales ; D.Quenard(mars 1989) : structure et propriétés d'un matériau polyphasique modèle : le Béton légers isolant thermique, compte rendu de fin d'étude, CSTB Grenoble.

[36] A.Laukaitis, R.Zurauskas, J.Keiene (2005): « *The effect of foam polystyrene granules on*

cement composite properties » ;Cement concrete composite 27(2005) pp .41-47

[37] Y. J ANNOT (12-18/11/08): « *Métrologie thermique* » .Séminaire PER AUF, LEA Dakar,

[38] Chauvin, J.J, Grimaldi, G. (Sept. 1988), « *Les bétons de sable* »; Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC) ; N°157, pp.9-15.

[39] Yang Ke (2008) : *Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats*

légers (expérience et modélisation); Thèse de doctorat de l'université de cergy-pontois

https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_marbres_modernes

[40] BerraMario,Ferrara Gerardo (1984): « Propriétés des bétons réalisés avec des granulats de différentes densités » ;bulletin de l'association internationale de Géologie de l'ingénieure N°30,Paris.

[41] George dreux Jean festa (1998): « *Nouveau guide du béton et de ses constituants* » ;Eyrolles Paris.

[42]

[43] Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (1996). Pozzolanic and cementitious materials. Amsterdam : Overseas Publishers Association.

[44] Aïtcin, P.-C. (2001). Bétons haute performance. Paris : Editions Eyrolles.

[45] Chanvillard, G. (1999). Le matériau béton: connaissances générales. Lyon : Aléas Editeur

[46] Newman, J., & Choo, B. S. (2003). Advanced concrete technology : Constituent materials. Great Britain : Butterworth-Heinemann.

[1] NF EN 1097-6, 2001, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau », AFNOR.

[2] NF EN 1097-3, 1998, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire », AFNOR.

[3] NF EN 933-1, 1997, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR.

[4] NF EN 1008, 2003, « Eau de gâchage pour bétons: spécification 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 », AFNOR.

[5] P.L. Domone, J.Jing, « Properties of Mortar for Self-Compacting Concrete », Proceedings of RILEM International Symposium on SCC, Stockholm, September 1999, RILEM Proceedins PRO 7, Paris pp109-120.

[6] OKAMURA H., OUCHI M., 2003 « Self-compacting concrete », Journal of advanced Concrete Technology, Vol. 1, N°1, pp. 5-15.

[7] BOUKENDAKDJI O., 2010, « Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires », Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb, Algérie.

[8] Hamraoui S. et Rebaia F. Z., 2017, « Etude de l'effet des additions minérales sur le comportement d'un mortier autoplaçant traité thermiquement », Mémoire de Master, Université de Médéa, Algérie.

[9] SEDRAN T., 1999, « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants », thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.

[10] KHAYATK.H., PAVATET., ASSAD J., 2003 « Analysis of Variations in Electrical Conductivity to Assess Stability of plastic Cement-Based Materials », ACI Materials Jr.,vol. 4, N°100,pp.342-350.

[11] EDAMATSU Y., NISHIDA N.,OUCHI M., 1999, « A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar

particles », Proceedings of the FirstInternational RILEM Symposium on Self-compacting Concrete, Stockholm, Sweden, pp. 309-20.

[12] PEDERSEN B., SMEPLAS S., 2003, « The relationship between the rheological properties of SCC and the corresponding matrix phase », Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Island, pp106-16.

[13] Boukendakdji, O., Kadri, E.H. and Kenai, S. (2012), "Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete", *Cement Concrete Compos.*, **34**, 583-590.

[14] KIM K. J., SANG H. H., YOUNG C. S.,2002, « Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete. Part I. Experimental results», Cement and Concrete Research J., Vol.32, pp.1087-1094.

[15] NF EN 12390-2, 2012, « Essai pour béton durci. Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance », AFNOR.

[16] NF EN 12350-6, 1999, « Essai pour béton frais. Partie 6 : Masse volumique », AFNOR.

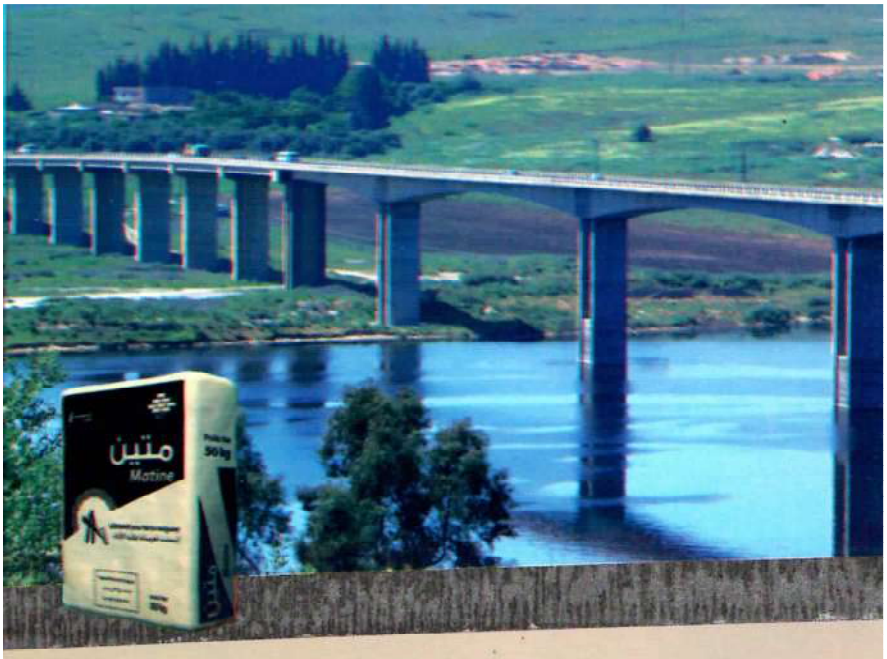
[17] NF EN 196-1, 2016, « Méthodes d'essais des ciments. Partie 1: Détermination des résistances mécaniques », AFNOR.

[18] NF EN 1015-18, 2003, « Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - partie 18 : détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarite du mortier durci -», AFNOR.

[19] NF P15-433**,** 1994**, «** Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement », AFNOR.

[20] NF EN ISO 8894-1 Août 2010, « Matériaux réfractaires - Détermination de la conductivité thermique - Partie 1 : Méthodes du fil chaud ("croisillon" et "thermomètre à résistance") », AFNOR.

Annexe A : FICHE TECHNIQUE DU CIMENT UTILISE (MATINE)



Ciment

MATINE

Ciment pour béton exigeant

- Destiné aux bétons de performances avec une résistance caractéristique à la compression Rc 28> 25 MPa
- Compatible avec les différents adjuvants et ajouts cimentaires
- Approprié à la réalisation des bâtiments élancés, tunnels, barrages et ponts

Nous pouvons utiliser les proportions moyennes mentionnées ci-dessous dans le cas de l'absence d'une formulation étudiée.

CIMENT	SABLE (sec)	GRAVILLONS (sec)	EAU (litres)
1	2	3	25 ℓ

Remarque : Ces dosages ne sont donnés qu'à titre indicatif, les résultats de ces formulations peuvent varier selon la nature des matériaux utilisés et les conditions de mise en œuvre.

≈ 10 ℓ ≈ ≈ 60 ℓ

LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A 42,5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°c. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94 .

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .ect) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de désallement,..ect) ;
- Secteur industriel.

Algerian Cement Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Annexe B : PROGRAMME DE CALCULE LES QUANTITES EXIGENCES POUR DES MAP

Essais sur Mortier					entrer data dans cellules en rouge	
					valeurs calculées dans cellules en noir	
Référence du mélange	**Essai 1**	CEM II 42,5 sans ajout			Date	04/02/2016
volume de mortier (litres)	**1,3**					
sable/mortier vol	0,45					
E/P par vol.	1,2600	poudre vol (%)	24,34	Eau volume (%)		30,66
composition Poudre(vol %)		type				
ciment portland	100					
Laitier	0					
Fumée de Silice	0					
Pouzolane	0					
superplast - MEDAFLOW 145	0,7	% (Sp/P)				
humidité sable						
		humidité (%)	absorption (%)	correction (%)		
poids humide (gms)	200	**0,0**	1,2	**-1,2**		
poids sec (gms)	200					

Materiaux/Type	vol	densité		contenance d'eau		**poid mélange**			
	litres	kg/m^3	kg	%	kg	**kg**			
ciment	0,316	3150				**0,997**			
	0,000	2857				**0,000**			
						0,000			
						0,000			
Eau	0,399	1000	0,399			0,413	**W1**		**0,248**
			total				**W2**		**0,165**
superplast - MEDAFLOW145		1065	0,007	60	0,004	**0,0070**			
			ssd				**SR**		**0,646**
Sable	0,585	2600	1,521	-1,2	-0,018	**1,503**	**SC**	0,857	**0,685**
bétume							**SB 20**		**0,171**
Total	1,300					2,919			
		w/p bt wt =	**0,4000**						
procédure de malaxation									

