

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**



**UNIVERSITE AMMAR TELIDJI DE LAGHOUAT**



**MEMOIRE DE MAGISTER**

**Faculté de technologie**  
**Département de génie civil**  
**L'obtention du diplôme de**

**MAGISTER**

**Option : Matériaux composites et calcul des structures**

**Thème**

---

**Durabilité des bétons autoplaçants à base  
de poudre de marbre**

---

**Présenté par**

**Ammar BENGUIT**

**Devant le jury composé de**

<b>Mr. Kaddour MOUATTAH</b>	Maître de conférences, Université de Laghouat	Président
<b>Mr. Benchaa BENABED</b>	Maître de conférences, Université de Laghouat	Examineur
<b>Melle. Amina DJOUDI</b>	Maître de conférences, Université de Laghouat	Examinatrice
<b>Mr. Lakhdar AZZOUZ</b>	Professeur, Université de Laghouat	Encadreur

---

Laghouat, Juin 2016

---

## Résumé

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides qui s'écoulent et se mettent en place sous leur propre poids sans apport d'énergie interne ou externe. En raison des enjeux économiques liés à la teneur élevée en liant et à l'utilisation des adjuvants chimiques, l'utilisation de cette catégorie de béton reste limitée à des applications bien spécifiques. En effet, l'utilisation des déchets industriels et des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour palier au déficit dans la fabrication du béton autoplaçant.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet d'addition de la poudre de marbre sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et sur la durabilité des BAP, à travers la substitution partielle du ciment par la poudre de marbre.

L'étude menée a montré que la méthode Okamura pouvait être utilisée avec les matériaux locaux avec quelques modifications concernant l'optimisation de la teneur en sable et en superplastifiant.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de la poudre de marbre améliore les propriétés des BAP à l'état frais jusqu'à un taux de substitution de 20%. À l'état durci, l'incorporation de la poudre de marbre dans les BAP conduit à une diminution des résistances mécaniques.

Les résultats des essais de durabilité ont montré que l'utilisation de la poudre de marbre est bénéfique pour améliorer la résistance des BAP à l'attaque des sulfates ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et des acides ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{HCl}$ ). Par contre l'incorporation de la poudre de marbre semble accélérer la carbonatation.

**Mots clés** : béton autoplaçant (BAP), poudre de marbre (PM), durabilité, attaque des sulfates, attaques des acides, carbonatation accélérée.

## Abstract

Self-compacting concrete (SCC) are highly fluid concrete that can flow and be placed under the effect of its weight without the need of compaction, and for economic reasons that have relation to the content of the cement and the superplasticizer, the use of this type of concrete is still limited. That is why it is necessary to use the industrial and natural remains to make a self-compacting concrete.

The main objective of this work is to study the effect of marble powder on rheological and mechanical properties and the durability of self-compacting concrete through a partial replacement of cement with marble powder.

The study showed that the Okamura method can be used with the local materials through making small changes of the percentage of the sand and the superplasticizer.

The results obtained have shown that the use of marble powder is useful to improve the properties of SCC to the percentage of 20%. In another way, it leads to a decrease of the resistance when pressing. The experiments of the durability of the concrete showed that the use of marble powder leads to improve the resistance of sodium sulfate direction and sulfuric acid and sodium acid solutions. Except that, the use of marble powder leads to accelerate the carbonation

.

**Key words:** Self-compacting concrete (SCC), marble powder (MP), durability, sulfate attack, acid attack, accelerated carbonation.

## المخلص

الخرسانة ذاتية التوضع او الرص هي عبارة عن خرسانة سائلة قادرة على الجريان والتموضع تحت تأثير ثقلها بدون الحاجة الى الرص او الدمك، ولأسباب اقتصادية متعلقة بمحتوى الاسمنت والملدن، يبقى استعمال هذا النوع من الخرسانة محدودا. لذلك أصبح من الضروري استعمال البقايا الصناعية والطبيعية لصناعة خرسانة ذاتية التوضع.

ان الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير بقايا حجر الرخام على الخصائص الريولوجية، الميكانيكية وديمومة الخرسانة ذاتية التوضع وذلك عن طريق استبدال جزئي للاسمنت ببقايا حجر الرخام.

اظهرت الدراسة انه يمكن استخدام طريقة Okamura مع المواد المحلية مع اجراء بعض التغيرات الطفيفة فيما يخص نسبتي الرمل و الملدن.

بينت النتائج المتحصل عليها ان استعمال بقايا حجر الرخام مفيد من اجل تحسين خصائص الخرسانة الطازجة حتى 20%. و لكنها من جهة أخرى تؤدي الى تناقص المقاومة عند الضغط والشد. وقد بينت التجارب الخاصة بديمومة الخرسانة أن استعمال بقايا حجر الرخام يؤدي الى تحسين المقاومة اتجاه كبريتات الصوديوم ومحلولي حمض الكبريت وحمض الكلور، إلا ان استعمال بقايا حجر الرخام يؤدي الى تسريع تكربن.

**كلمات مفتاحية:** خرسانة ذاتية التوضع، بقايا حجر الرخام، ديمومة، تأثيرات الكبريتات، تأثيرات الاحماض

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## إهداء

الحمد لله حمدا كثيرا يليق بجلاله وعظيم سلطانه و الصلاة والسلام على اشرف المرسلين  
وعلى آله وصحبه أجمعين أما بعد:

أهدي ثمرة عملي هذا إلى أسطورة الحب والحنان ، إلى من حملتني وهنا على وهن ....

إلى من كانت لأجلي... إلى من كانت الأم و الأخ، الأخت...

إلى ... مهما قلت ومهما وصفت يعجز اللسان عن الكلام و يتوقف القلم عن الكتابة

إلى الأم الغالية و الحبيبة و الحنونة أطل الله في عمرها و حفظها وجزاها خيرا .

إلى رمز العطاء الأبدي ، أبي أطل الله في عمره إلى أعلى ما لدي في الوجود

إخوتي ،محمد، مراد ، بن عمر ، سارة ، أميرة، جدلة

أحلام وإكرام ، وإلى الكتكوتين أحميدة وعبد النور دون إن أنسى

إلى من يسري في عروقهم دم الأخوة: أبو بكر ، بلعربي أحميدة، عواي عيسى.

إلى جميع الأصدقاء و الأقارب وكل من ساهم في إنجاح هذا العمل من

قريب أو من بعيد..

إلى كل الذين عرفتهم في الحياة الجامعية وخاصة دفعة تخرجي

...إلى كل الذين حواهم قلبي و لن تستطيع الأوراق أن تحويهم

بن قيط عمار

## Remerciements

Le présent travail s'est déroulé au Laboratoire de Recherches de Génie Civil (LRGC) de l'Université de Laghouat, et a été mené sous la direction de Mr. Azzouz Lakhdar, Professeur à l'Université de Laghouat. Je tiens à le remercier pour ses aides efficaces, sa disponibilité, et ses conseils précieux qui m'ont permis d'achever ce travail. Tous qui m'aident dans ce travail.

Je remercie Mr. Mouattah Kadour, Maître de conférences à l'Université de Laghouat, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Je remercie aussi Mr. Benabed Benchaa, Maître de conférences à l'Université de Laghouat, et Melle. Djoudi Amina, Maître de conférences à l'Université de Laghouat, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de participer au jury.

Je tiens à remercier Mr. Boukhelkhal Aboubakeur, enseignant à l'Université de Laghouat pour ses conseils utiles et remarques pertinentes qui m'ont permis d'améliorer le présent travail.

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

Je suis très reconnaissant à toutes les personnes avec lesquelles j'ai pu entretenir des discussions et échanger des idées, qui m'ont fait avancer dans ce travail de recherche.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude à toute ma famille pour son soutien indéfectible durant la préparation de cette thèse.

# Table des matières

<b>Résumé.....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>II</b>
<b>المخلص .....</b>	<b>III</b>
<b>إهداء.....</b>	<b>IV</b>
<b>Remerciements.....</b>	<b>V</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>VI</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>IX</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>XII</b>
<b>Nomenclature .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Etude bibliographique .....</b>	<b>4</b>
I.1) Introduction :.....	4
I.2) Avantages des bétons autoplaçants :.....	4
I.2.1) Avantages techniques : .....	5
I.2.2) Avantages socio-économiques :.....	5
I.3) Constituants du béton autoplaçant : .....	5
I.3.1) Liant (poudre) : .....	6
I.3.2) Additions minérales : .....	6
I.3.3) Granulats:.....	7
I.3.4) L'eau: .....	7
I.3.5) Adjuvant (superplastifiant): .....	8
I.3.6) Agents de viscosité : .....	9
I.4) Formulation des bétons autoplaçants :.....	9
I.4.1) Approche japonaise :.....	11
I.4.2) Méthode Suédoise (CBI) : .....	12
I.4.3) Méthode Française (LCPC) : .....	13
I.5) Constituants et leur influence dans la formulation des BAP : .....	14
I.6) Propriétés du béton autoplaçant à l'état frais :.....	15
I.6.1) Déformabilité ou capacité au remplissage :.....	15
I.6.2) Résistance à la ségrégation (stabilité) :.....	16
I.6.3) Capacité de passage : .....	17
I.6.3) Bilan :.....	18

I.7) Propriétés du béton autoplaçant à l'état durci : .....	20
I.7.1) Propriétés mécaniques : .....	20
I.8) Durabilité des bétons autoplaçants : .....	23
I.8.1) Perméabilité aux gaz : .....	24
I.8.2) Diffusion des ions chlore : .....	25
I.8.3) Absorption d'eau par capillarité : .....	26
I.8.4) Absorption d'eau par immersion : .....	27
I.8.5) Résistance à l'effet gel-dégel : .....	27
I.8.6) Résistance aux attaques sulfatiques : .....	28
I.8.7) Résistance aux acides : .....	36
I.8.8) Carbonatation : .....	42
I.8.9) Corrosion des armatures : .....	50
I.9) Synthèse bibliographique : .....	52
<b>Chapitre II :Caractérisation des matériaux, formulation et méthodes d'essais .....</b>	<b>53</b>
II.1) Introduction : .....	53
II.2) Caractéristiques des matériaux utilisés : .....	54
II.2.1) Ciment (CPA) : .....	54
II.2.2) Poudre de marbre (PM) : .....	54
II.2.3) Granulats : .....	55
II.2.4) Superplastifiant : .....	56
II.2.4) L'eau de gâchage : .....	57
II.3) Formulation : .....	57
II.3.1) Formulation du mortier autoplaçant : .....	57
II.3.2) Formulation du béton autoplaçant : .....	60
II.4) Méthodes d'essais : .....	62
II.4.1) Essais sur mortier à l'état frais : .....	62
II.4.2) Essais sur BAP à l'état frais : .....	64
II.4.3) Essais sur BAP à l'état durci : .....	69
II.4.4) Récapitulatif du programme des essais réalisés : .....	80
II.5) Synthèse : .....	80
<b>Chapitre III : Présentation et analyse des résultats .....</b>	<b>85</b>
III.1) Introduction : .....	85
III.2) Optimisation du rapport Sable/Mortier (S/M) et Sp/L : .....	85
III.3) Effet du superplastifiant sur les mortiers frais : .....	87

III.3.1) Etalement au mini-cône : .....	87
III.3.2) Temps d'écoulement à travers le mini-entonnoir en V : .....	88
III.4) effet de la poudre de marbre sur les propriétés du mortier frais : .....	89
III.4.1) Effet de la poudre de marbre sur l'étalement : .....	91
III.4.2) Effet de la poudre de marbre sur le temps d'écoulement : .....	91
III.5) Effet de la poudre de marbre sur les propriétés des BAP : .....	92
III.5.1) Effet de la poudre de marbre sur l'étalement : .....	94
III.5.2) Effet de la poudre de marbre sur la Résistance à la compression : .....	94
III.5.3) Effet de la poudre de marbre sur la Résistance à la traction : .....	95
III.5.4) Effet de la poudre de marbre sur la masse volumique (densité) : .....	96
III.6) Effet de la poudre de marbre sur la durabilité du BAP et MAP : .....	97
III.6.1) Introduction : .....	97
III.6.2) Absorption d'eau : .....	97
III.6.3) Durabilité vis-à-vis de l'attaque des sulfates ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) : .....	99
III.6.4) Durabilité vis-à-vis de l'attaque des acides : .....	106
III.6.5) Carbonatation accélérée : .....	113
IV.7) Synthèse des résultats : .....	118
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>121</b>
<b>Recommandations et Perspectives .....</b>	<b>123</b>
<b>ANNEXE (A) : Exemple de calcul de formulation du mortier autoplaçant .....</b>	<b>125</b>
<b>ANNEXE (B) : Exemple de calcul de formulation du béton autoplaçant .....</b>	<b>129</b>
<b>ANNEXE (C).....</b>	<b>134</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>140</b>

## Liste des figures

Figure I-1 - Mise en place du BAP par un seul ouvrier.....	4
Figure I-2 - Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. ....	6
Figure I-3 - Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [6]. ....	7
Figure I-4 – Action des superplastifiants – Déflocculation des grains de ciment.....	8
Figure I-5 – Influence de l'agent de viscosité sur le ressuage du béton pour différents .....	9
Figure I-6 – Proportions du gravillon et du sable d'un béton autoplaçant selon la.....	12
Figure I-7 - Propriétés du béton autoplaçant à l'état frais. ....	15
Figure I-8 - Diminution du seuil de cisaillement et augmentation de la viscosité plastique du béton [27].....	16
Figure I-9 - Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures [32]. ....	17
Figure I-10 - Approche générale pour aboutir à un béton caractère autoplaçant [36].....	18
Figure I-11 - Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) [38]. ....	20
Figure I-12 - Comparaison des modules d'élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [49]. ....	21
Figure I-13 - Influence du type de béton sur le retrait [51]. ....	22
Figure I-14 - Influence du type de béton sur le fluage [51].....	23
Figure I-15 - Coefficient de perméabilité à l'oxygène de trois BAP (SCC) et deux bétons .....	24
Figure I-16 - Coefficient de migration des ions chlore de trois BAP (SCC) et de deux .....	26
Figure I-17 - Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux .....	27
Figure I-18 - Perte de masse de deux BAP et d'un BV pendant un test d'écaillage [63]. ....	28
Figure I-19 - Effet de la quantité du ciment et de la teneur en C <sub>3</sub> A sur la vitesse de.....	32
Figure I-20 - Influence des cendres volantes sur l'expansion du béton [85].....	33
Figure I-21 - Temps avant détérioration du béton en fonction du rapport Eau/Ciment et .....	34
Figure I-22 - Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans la solution d'acide .....	39
Figure I-23 - Variation de la masse des BAP avec granulats siliceux après 12 semaines.....	40
Figure I-24 - Variation de la masse des BAP avec granulats calcaires après 12 semaines .....	40
Figure I-25 - Perte en masse en fonction de la porosité capillaire pour un BAP et BV .....	41
Figure I-26 - Mécanisme de carbonatation de Ca(OH) <sub>2</sub> .....	43
Figure I-27 - Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée du .....	46
Figure I-28 - Relation entre épaisseur carbonatée et dosage en ciment [101].....	47
Figure I-29 - Degré de carbonatation en fonction de l'humidité relative à 25° pour béton durci [99].....	48
Figure I-30 - Formation de la calcite lors d'une carbonatation accélérée de la portlandite (CO <sub>2</sub> =50 %), en fonction de la température [106].....	50

Figure I-31 Schéma de dégradation des armatures au cours du temps, d'après Tuutti (1982) [177]. .....	51
Figure II-1 - Analyse minéralogique de la poudre de marbre [4].....	55
Figure II-2 - Courbes granulométriques des granulats. ....	56
Figure II-3 - Séquence de malaxage du mortier autoplaçant [126]. ....	59
Figure II-4 - Malaxage du mortier autoplaçant. ....	60
Figure II-5 - Séquence de malaxage du béton autoplaçant [126]. ....	62
Figure II-6 - Malaxage du béton autoplaçant. ....	62
Figure II-7 - Essai d'étalement pour mortier. ....	63
Figure II-8 - Essai d'entonnoir (V-funnel) pour mortier. ....	63
Figure II-9 - Mesure du diamètre d'étalement.....	64
Figure II-10 - L'entonnoir en V (V-Funnel).....	66
Figure II-11 - Dimensions du J-ring et positions pour mesure de différence des hauteurs. ....	67
Figure II-12 - Mesure d'étalement et des hauteurs à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring. ....	68
Figure II-13 - Boîte en L (L-box). ....	68
Figure II-14 - Essai de stabilité au tamis. ....	69
Figure II-15 - Détermination de la résistance à la compression. ....	70
Figure II-16 - Détermination de la résistance à la traction par flexion trois point. ....	71
Figure II-17 - Détermination de la densité du béton-pesé de l'éprouvette-.....	71
Figure II-18 - Essai d'absorption d'eau par capillarité. ....	72
. Figure II-19 - Immersion totale des éprouvettes. ....	73
Figure II-20 - conservation des éprouvettes dans solution. ....	74
Figure II-21 - l'enceinte de carbonatation accélérée. ....	77
Figure II-22 – recouvrements des échantillons par de papier aluminium adhésif.....	78
Figure II-23 – Schéma illustrant le principe des mesures. ....	78
Figure II-24 – Diagramme des essais réalisés sur mortier de référence. ....	81
Figure II-25 – Diagrammes des essais réalisés sur mortier avec ajouts (PM).....	82
Figure II-26 – Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état frais. ....	83
Figure II-27 – Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état durci. ....	84
Figure III-1 – Schéma illustrant le principe des mesures. ....	86
Figure III-2 – Etalement en fonction du dosage en superplastifiant.....	88
Figure III-3 – Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant. ....	89
Figure III-4 – Etalement des mortiers en fonction du dosage en poudre de marbre (PM). ....	91
Figure III-5 – Temps d'écoulement des mortiers en fonction du dosage en poudre de marbre (PM). .....	92
Figure III-6 – Etalement des bétons autoplaçant à base de PM.....	94

Figure III-7 – Variation de la résistance à la compression aux différents âges.....	95
Figure III-8 – Variation de la résistance à la traction aux différents âges.....	96
Figure III-9 – Variation de la masse volumique (ou densité) en fonction de la teneur en PM.....	96
Figure III-10 – Effet de la poudre de marbre sur l’absorption d’eau par capillarité. ....	98
Figure III-11 – Influence de la poudre de marbre sur l’absorption par immersion. ....	99
Figure III-12 – Variation en masse des mortiers en fonction de la période d’immersion dans.....	100
Figure III-13 – Variation de la résistance à la compression des mortiers en fonction de la période d’immersion dans Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	101
Figure III-14 – Examen visuel des mortiers exposés à 5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	103
Figure III-15 – DRX des mortiers conservés dans l’eau.....	105
Figure III-16 – DRX des mortiers 20% PM conservés dans les sulfates Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	105
Figure III-17 – Variation en masse des mortiers en fonction de la période d’immersion.....	107
Figure III-18 – Photos des éprouvettes après 336 jours d’immersion dans la solution de.....	107
Figure III-19 – Photos des éprouvettes après 336 jours d’immersion dans la solution de.....	108
Figure III-20 – Variation en masse des mortiers en fonction de la période d’immersion.....	108
Figure III-21 – Photos des éprouvettes après 336 jours d’immersion dans la solution de.....	109
Figure III-22 – Photos des éprouvettes après 336 jours d’immersion dans la solution de.....	110
Figure III-23 – DRX des mortiers conservés dans l’eau.....	111
Figure III-24 – DRX des mortiers 20% PM conservés dans l’acide H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	111
Figure III-25 – DRX des mortiers 20% PM conservés dans l’acide Hcl .....	112
Figure III-26 – Réalisation de l’essai Carbonatation accélérée. ....	113
Figure III-27 – Test à la phénolphtaléine et mesure du front de carbonatation (7x7x28 cm). ....	114
Figure III-28 – : Profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée.....	115
Figure III-29 – DRX des BAP 5% PM carbonatés.....	116
Figure III-30 – DRX des BAP 20% PM carbonatés.....	116
Figure III-31 – : Gain de masse en fonction du temps de conservation des éprouvettes (7x7x28 cm). ....	117

## Liste des tableaux

Tableau I-1 - Rôles des principaux paramètres dans l'écoulement et la formulation des BAP [52]. .....	14
Tableau I-2 - Propriétés des BAP à l'état frais, les moyens de les obtenir et essais de caractérisation. ....	19
Tableau II-1 - Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CPA CEM I 42.5.....	54
Tableau II-2 - Propriétés physiques du ciment CPA CEM I 42.5. ....	54
Tableau II-3 - Propriétés physico-chimique de la poudre de marbre. ....	55
Tableau II-4 - Propriétés physiques des granulats. ....	56
Tableau II-5 - Caractéristiques du superplastifiant. ....	57
Tableau II-6 - Classes des BAP selon l'étalement et le domaine d'utilisation [136]. ....	65
Tableau II-7 – Calcul de la profondeur de carbonatation (exemple). ....	79
Tableau II-8 – Récapitulation des essais de carbonatation effectués. ....	79
Tableau III-1 – Compositions et résultats des essais sur mortiers pour différentes valeurs du rapport Sable/Mortier (S/M). ....	86
Tableau III-2 – Compositions (en poids pour $1\text{m}^3$ ) et résultats de l'étalements et du temps d'écoulement des mélanges étudiés. ....	90
Tableau III-3 – Compositions (en poids pour $1\text{m}^3$ ) des mélanges étudiés. ....	93
Tableau III-4 – Résultats des essais à l'état frais pour les BAP à poudre de marbre. ....	93
Tableau III-5 – Volumes molaires de la portlandite et la carbonate de calcium. ....	118

# Nomenclature

BAP : Béton autoplaçant

SCC : Self-compacting concrete

BO : Béton Ordinaire

BHP : Béton à haute performance

BTHP : Béton à très haute performance

BFM : Béton de fibre métallique

BPR : Béton de poudre réactive

BV : Béton vibré

C : Ciment

PM : Poudre de marbre

L : Laitier

SP : Superplastifiant

E/C : Rapport eau sur ciment

E/L : Rapport eau sur liant

S/M : Rapport Sable sur mortier

Sp/L : Rapport Superplastifiant sur Liant

MAP : Mortier autoplaçant.

# Introduction

## Généralités :

Actuellement, le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. Plusieurs types de bétons sont apparus ces dernières années ; les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM), les bétons de poudre réactive (BPR) et les bétons autoplaçants (BAP).

Beaucoup de structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle. Le besoin en bétons de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité s'est fait alors ressentir de plus en plus.

Les recherches menées ont abouti à la confection de bétons très fluides, homogènes, stables et placés sans intervention (auto placé) avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité, connus aujourd'hui sous l'appellation de béton autoplaçant (BAP).

Les BAP ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon. Leur objectif était d'augmenter la cadence de travail en réduisant l'effectif du personnel sur chantier et le temps de mise en œuvre. Ce sont des bétons très spéciaux, ils sont très fluides, très déformables, homogènes et stables. Ils se mettent en place par l'unique effet de la gravité, sans l'utilisation de moyen de vibration. Ce type de béton est destiné spécialement à la réalisation des structures fortement ferraillées, de forme complexe ou comportant plusieurs ouvertures.

Par contre l'inconvénient majeur du béton autoplaçant est son coût élevé par rapport au béton ordinaire, il est plus élevé de 20 % à 50 %. L'augmentation du coût du BAP est due principalement à l'utilisation d'une teneur en ciment élevée (450 à 600 kg/m<sup>3</sup>). Par ailleurs, l'utilisation du ciment seul comme poudre (liant) dans le BAP conduit à une chaleur d'hydratation importante, suivi par un retrait et des fissures d'origine thermique, ce qui réduit les performances du béton durci (résistance et durabilité). Etant donné que les BAP contiennent un volume du ciment important, la production du ciment est donc aussi importante, cette matière primordiale dans la fabrication du béton se classe au troisième rang de tous les matériaux, devancé seulement par l'acier et l'aluminium. Selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne

de CO<sub>2</sub>. Il est responsable d'environ 5 % des émissions de ce gaz sur la planète. Cette situation doit être prise au sérieux car le béton est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine.

L'utilisation de résidus industriels récupérés et recyclés, tels que les ajouts cimentaires et les gisements de ressources naturelles tels que la pouzzolane et le calcaire, le laitier de haut fourneau comme produits de remplacement partiel du ciment Portland dans le béton, permet de réduire les émissions des gaz à effet de serre et se traduit par la fabrication d'un béton non polluant et durable sur le plan environnemental. Dans l'industrie de ciment lorsque l'un des ajouts cimentaires est ajouté au ciment, ce dernier est dit « Binaire » et s'il y'en a deux ajouts il est appelé « ternaire ».

Dans le cadre de l'exploitation des matériaux locaux, y compris les éléments d'additions, pour la préparation des bétons autoplaçants économiques. Nous allons étudier des BAP contenant un mélange binaire de poudre. En plus du ciment, L'addition minérale faisant l'objet de cette étude est la poudre de marbre. Cette dernière est disponible dans le marché algérien.

### **Objectifs de l'étude :**

Le travail présenté dans ce mémoire a deux objectifs principaux :

1. La confection de bétons autoplaçants Binaire et d'adjuvants produit localement en Algérie et surtout en utilisant addition minérale (poudre de marbre) en abondance en Algérie.
2. Étude de l'effet d'addition de la poudre de marbre sur les propriétés rhéologique, Physico-mécanique (résistance à la compression et à la flexion) et la durabilité des BAP (résistance à des agents chimiques agressifs tels que les sulfates et les acides et carbonatation accélérée).

## **Plan de travail :**

Ce travail est composé de trois chapitres.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les différents impacts des bétons autoplaçants, ainsi que les différentes formulations pour la composition d'un BAP sont exposées, l'influence des principaux constituants sur les propriétés des BAP, Ensuite nous avons abordé les différentes propriétés à l'état frais et à l'état durci des BAP. Enfin, nous présentons les propriétés de durabilité des BAP, nous intéressons à la durabilité des BAP vis-à-vis les agressions chimiques et carbonatation accélérée.

Le deuxième chapitre est destiné à la caractérisation des matériaux entrant dans la composition du BAP, et les techniques expérimentales utilisées durant cette étude pour évaluer les propriétés à l'état frais, les propriétés mécaniques (résistance à la compression et à la flexion) et la durabilité des BAP (Absorption d'eau, résistance aux sulfates et à l'attaque acide et carbonatation accélérée ).

Le troisième chapitre présente les analyses et les discussions des résultats des différents essais réalisés et en afin conclusion générale.

## Chapitre I : Etude bibliographique

### I.1) Introduction :

Les bétons auto-plaçants (B.A.P) sont des bétons très fluides, homogènes et stables, mis en œuvre sous l'effet de son poids propre et sans énergie de compactage ou de sans vibration. D'autres expressions sont aussi utilisée : béton autocompactable, béton très fluide ou des expressions anglo-saxonnes : self compacting concrete, self levelling concrete, high fluidity concrete.

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires notamment par leurs propriétés à l'état frais. Ces propriétés se caractérisent principalement par :

- déformabilité ou capacité au remplissage : capacité de remplir les vides et les espaces difficiles en milieu confiné sans vibrations externe ou interne sous l'effet de son propre poids (décrite par l'essai d'étalement) ;
- capacité de passage (décrite par la boîte en U) ;
- une stabilité (c'est-à-dire une résistance à la ségrégation et au ressuage).



Figure 0-1 - Mise en place du BAP par un seul ouvrier.

### I.2) Avantages des bétons autoplaçants :

Le développement de a commencé au Japon à la fin des années 1980 pour des raisons économiques (réduction de la main d'œuvre, rapidité de mise en place) et s'est progressivement répandu dans le reste du monde. En effet, la qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire [1] :

### I.2.1) Avantages techniques :

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

### I.2.2) Avantages socio-économiques :

- Réduction du coût de la main d'œuvre et risque d'accident.
- Absence de systèmes de vibration (intérieurs ou extérieurs) réduisant ainsi les coûts et bruit sur site.
- Réduction du temps de bétonnage et des besoins de ragréage.  
Toutefois, certains points restent à surveiller dans l'utilisation du béton autoplaçant [2] :
- Augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, et des différentes additions minérales.
- Compatibilité des matériaux.
- Etanchéité des coffrages.

## I.3) Constituants du béton autoplaçant :

Comme tout type de béton, les BAP sont composés de matériaux de base soit de ciment, de sable, de granulats et d'eau. Afin d'assurer leur fluidité et leur homogénéité. Les bétons autoplaçants nécessitent l'utilisation de superplastifiants et d'agents de viscosité, ainsi que les additions minérales.

Chaque constituant joue un rôle différent dans l'écoulement et dans le comportement rhéologique du béton, et des interactions existent entre certains composants. Nous décrivons dans ce qui suit les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (ciment, additions minérales, granulats, adjuvants et eau) [3].

La Figure 0-2 - présente la comparaison entre la composition d'un béton autoplaçant et d'un béton ordinaire.

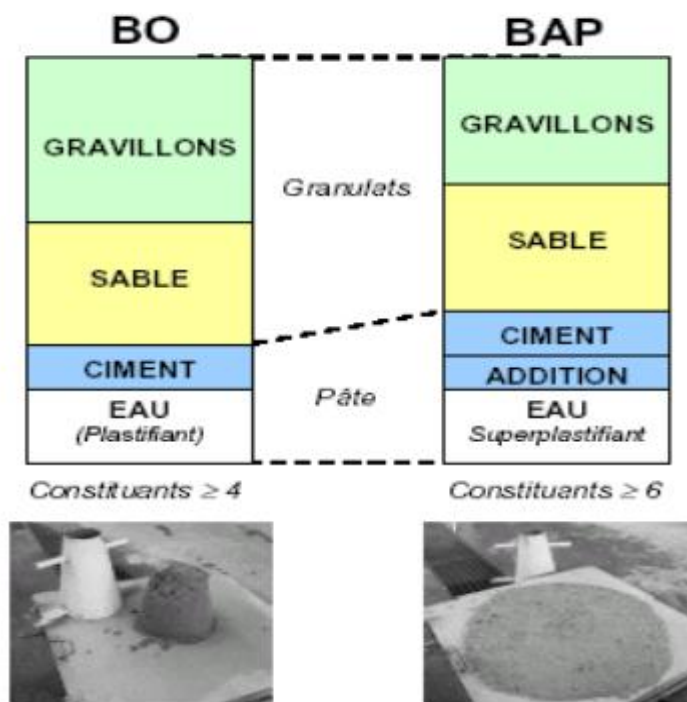


Figure 0-2 - Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.

### I.3.1) Liant (poudre) :

La poudre est la composante clé du BAP. En plus de sa fonction principale de relier les différents constituants du béton en présence de l'eau, la poudre occupe les vides intergranulaires en rendant le matériau plus dense. L'augmentation de son volume a pour but d'améliorer les propriétés du béton aussi bien à l'état frais (déformabilité, capacité de passage et résistance à la ségrégation), qu'à l'état durci (résistance et durabilité) [4].

### I.3.2) Additions minérales :

L'utilisation des additions minérales en remplacement du ciment est très importante, car en plus des économies d'énergie et de la diminution de l'émission du CO<sub>2</sub>, les additions minérales améliorent les propriétés du béton frais et durci.

La détermination du choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire etc...) et leur proportion respective est dictée par les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (DTU 21, normes XP P 18-305 ou EN 206) et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité). L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçants du béton (Figure I-3) [5].

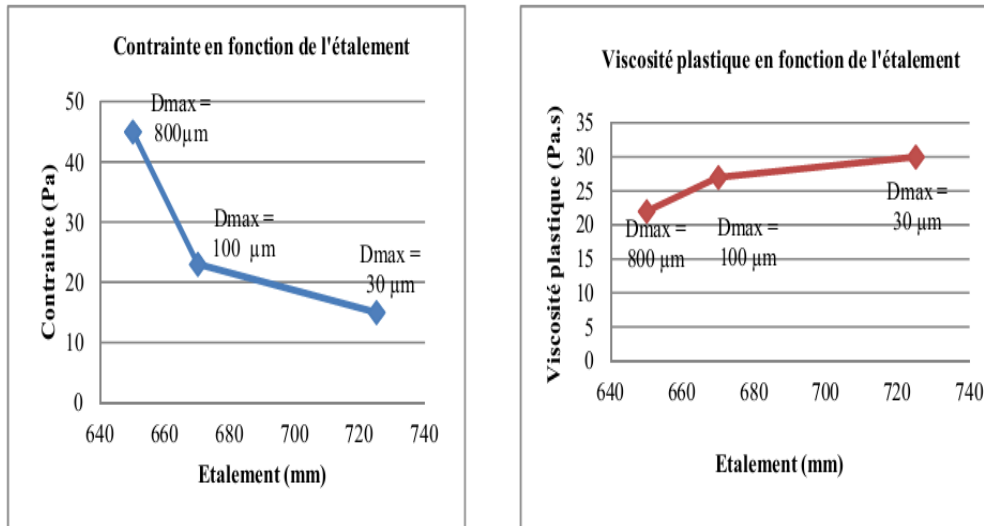


Figure 0-3 - Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [6].

### I.3.3) Granulats:

La formulation des BAP peut être obtenue en utilisant des granulats concassés ou roulés. En raison du blocage du béton en zones confinées par les gravillons, il est alors nécessaire d'en diminuer le volume. D'une part, si la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire, en revanche, il limite la quantité du liant nécessaire pour l'ouvrabilité et la résistance voulues.

En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP. Bien évidemment ce rapport peut être revu à la hausse si le confinement est faible (dans un ouvrage peu ferrailé par exemple) ou à la baisse dans le cas contraire [7].

En général le diamètre maximal  $D_{max}$  des gravillons dans un BAP est compris entre 10 et 20 [mm]. Les risques de blocage pour un confinement donné augmentent lorsque  $D_{max}$  augmente, ce qui conduit à diminuer le volume de gravillon. Le choix d'un  $D_{max}$  plus important est donc possible mais ne se justifie que lorsque le confinement est faible [8].

### I.3.4) L'eau:

L'eau potable distribuée par les services publics sert de référence pour la formulation du béton car elle répond en général aux prescriptions de la norme (NF EN 1008). Cette eau ne doit pas présenter un excès d'impuretés (NF EN 1008, 2003) qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.). Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette

dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats [9].

L'augmentation du dosage en eau entraînera une augmentation de la fluidité de la pâte de ciment en diminuant la concentration en solides, ceci est traduit par une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité.

### I.3.5 Adjuvant (superplastifiant):

Les superplastifiants sont des produits organiques qui rajoutés dans de faibles proportions (habituellement de 1 à 5% de la masse du ciment) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. Le béton étant un matériau composite poreux constitué de ciment, de granulats et d'eau, ses propriétés mécaniques finales dépendent très étroitement de la quantité d'eau introduite lors du gâchage. L'utilisation de superplastifiants permettant de modifier la quantité d'eau à ajouter au béton.

En tant qu'adjuvant, le superplastifiant peut avoir plusieurs fonctions dans un mélange cimentaire. La fonction de base est la fluidification, puisqu'il provoque un important la gain d'ouvrabilité d'un mélange. Le superplastifiant est responsable d'un effet de plastification : à même teneur en eau, il permet d'augmenter l'ouvrabilité, sans diminuer les résistances à long terme de la pâte du mortier ou du béton. La fonction « réducteur d'eau » se manifeste par la réduction du rapport E/C pour une même ouvrabilité. Ceci permet donc d'augmenter les performances mécaniques du mélange [3].

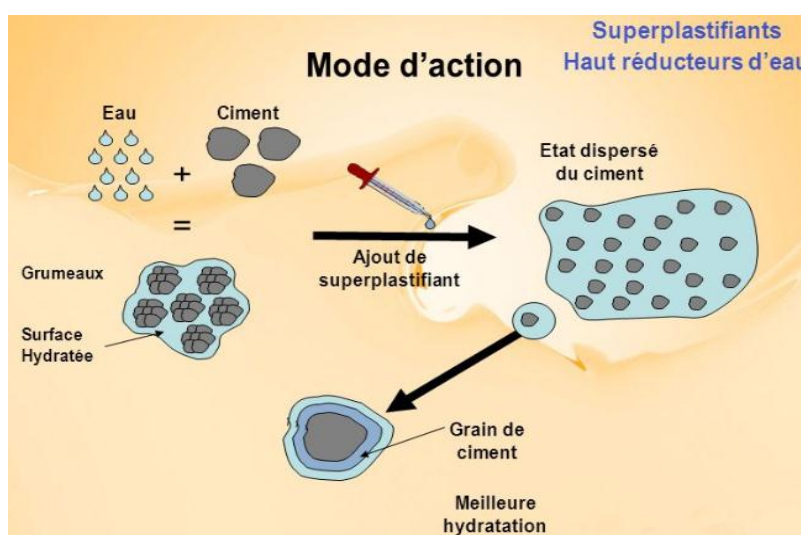


Figure 0-4 – Action des superplastifiants – Défloculation des grains de ciment.

### I.3.6) Agents de viscosité :

Ce sont généralement de dérivées cellulosiques, de polysaccharides ou de suspensions colloïdales. Leur interaction avec l'eau permet d'augmenter la viscosité de celle-ci [5], Ils empêchent le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse (Figure 0-5). Ces agents de viscosité sont utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant élevés. Par contre, leur utilisation peut conduire suivant les produits à des problèmes de dosage en centrale (cas de dosage faible), à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [8].

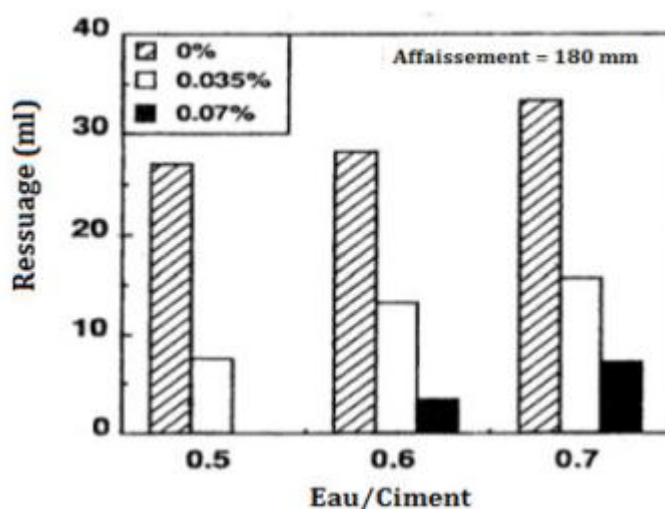


Figure 0-5 – Influence de l'agent de viscosité sur le ressuage du béton pour différents rapports Eau/Ciment [10].

### I.4) Formulation des bétons autoplaçants :

Formuler un béton autoplaçant est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux trois propriétés essentielles : déformabilité, capacité de passage et résistance à la ségrégation. La satisfaction de ces caractéristiques contradictoires en même temps complique la formulation de ce type de béton. Néanmoins, une méthode de formulation qui s'appelle "méthode générale" ou "méthode japonaise" a été développée au Japon, pour satisfaire ces trois caractéristiques à la fois [11].

Des approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences l'ouvrabilité de ce type de béton.

L'approche Japonaise [12] concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. L'importante quantité de ciment (450 à 600 [kg/m<sup>3</sup>]) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Par conséquent, ce volume important de pâte limite les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation pour des bétons de hautes performances mécaniques, est couteuse et mal adaptée à des ouvrages courants ;

L'approche suédoise de formulation repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [13]. En utilisant les fillers calcaires, on peut obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. Les résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables, sont rendues possibles à conserver par l'utilisation d'adjuvant nécessaire.

La plupart des formules des BAP sont conçues actuellement de manière empirique.

La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années. Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de BAP

Matériaux (groupe de commercialisation du BAP), est l'industrie du bâtiment, qui utilise principalement des bétons de 25 à 35 MPA [14].

Or, par expérience, on sait que ces résistances «ordinaires» sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer). En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Les compositions usuelles sont comme suit [14].

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 [l/m<sup>3</sup>].
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 [kg/m<sup>3</sup>].

En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 [kg/m<sup>3</sup>].

- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

Sur la base de ces plages, la formulation se fait par tâtonnement. Certains formulations ont développé leur propre outil. Il s'agit le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux-Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. La formule, conçue sur papier, est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton.

D'autres méthodes de formulation ont été ensuite publiées dans divers pays du monde. Dans ce qui suit, nous allons exposer trois méthodes de formulation des BAP les plus répandues.

#### **I.4.1) Approche japonaise :**

Cette méthode a été développée par Okamura et Ozawa, deux chercheurs de l'université de Kochi au Japon [11]. La méthode de formulation BAP est la suivante :

La teneur volumique en gravillons du béton est fixée à 50% du volume de solide. Selon les auteurs [15], ce pourcentage permet de prévenir le risque de blocage si le mortier est correctement formulé.

De même, le volume du sable est fixé à 40% du volume total du mortier (Figure 0-6). Les propriétés du mortier recherchées (grande déformabilité, viscosité adéquate) sont obtenues grâce à l'utilisation d'une forte teneur en poudre et d'un SP avec un dosage efficace [14,15,16]. Les étapes fondamentales de cette méthode sont résumées comme suit [4] :

- Le volume d'air est supposé égal à 1% en absence de l'adjuvant entraîneur d'air, et 4 à 7% dans le cas contraire ;
- La quantité de gravillons est fixée à 50% de leur compacité ;
- La teneur en sable est limitée à 40% du volume du mortier ;
- Le rapport Eau/poudre (E/L) est supposé égal à 0,9 à 1% par volume, tout dépend des propriétés de la poudre ;
- Le dosage en superplastifiant et le rapport E/L final sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40%. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

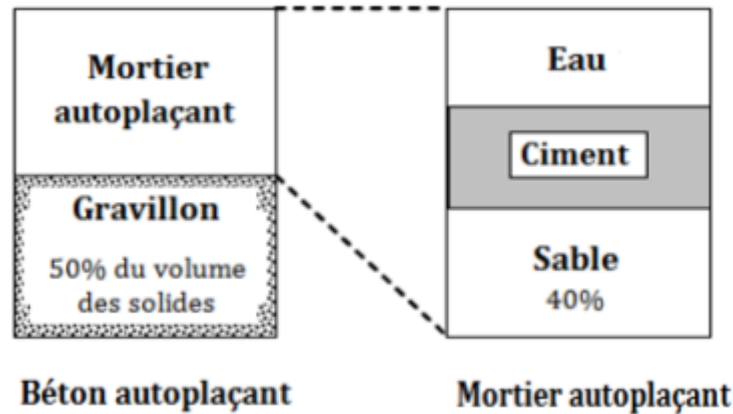


Figure 0-6 – Proportions du gravillon et du sable d'un béton autoplaçant selon la méthode générale [16].

Les différentes propriétés des bétons autoplaçants (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage etc.) rendent leur formulation relativement compliquée.

Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieux confiné, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier des charges précis [19]. Les auteurs définissent alors deux grandeurs : étalement relatif et vitesse relative d'écoulement la fluidité du mortier, donnée par :

1. L'étalement relatif : 
$$\Gamma_m = \frac{d^2 - d_0^2}{d_0^2}$$

2. Vitesse d'écoulement relative : 
$$R_m = \frac{10}{T_V}$$

Où  $\Gamma_m$ :étalement relatif ;

$d$ : diamètre d'étalement en cm ;

$d_0$ : diamètre inférieur du mini-cône en cm ;

$R_m$ : vitesse d'écoulement relative ;

$T_V$ : temps d'écoulement en seconde.

#### I.4.2) Méthode Suédoise (CBI) :

En se basant sur les travaux de Tang et Van et Petersson et al [20], l'institut suédois de ciment et de béton (CBI) a proposé une méthode de formulation des BAP. Cette méthode est basée principalement sur le critère de blocage. Son objectif est de produire un BAP économique en

cherchant le volume maximal de granulats (volume minimal de pâte) permettant d'éviter le risque de blocage [20]. L'intérêt de cette méthode est sa prise en considération des conditions de chantier telles que le diamètre des barres et l'espacement entre les armatures.

Dans cette méthode, le critère de blocage est proposé dépend du type de granulats et de leur taille d'un côté, et de diamètre des barres et de leurs espacements de l'autre côté, et le volume maximal de granulats est calculé. Le choix du rapport gravillons/granulats est fait de telle façon à avoir le volume minimum des vides dans le squelette granulaire, ce qui demande un faible volume de pâte pour les remplir.

Le rapport E/C et le type du ciment sont choisis en fonction de la résistance et la durabilité du béton recherchées. Le critère de blocage est ensuite testé au moyen de la boîte en L. pour éviter ce risque, le taux de blocage doit être entre 0,8 et 1 [21]. L'épreuve étalement est aussi faite pour mesurer la déformabilité et l'homogénéité du BAP. Un étalement supérieur à 70 [cm]. Il est recommandé pour que le BAP soit homogène et ne présente aucune tendance de ressuage ou de ségrégation. Cette méthode propose une bonne contribution granulaire, ce qui nécessite un volume de pâte moins important. Néanmoins, la courbe permettant de déterminer le critère de blocage n'est pas général, et il est difficile de la tracer pour chaque type de granulats [22].

#### **I.4.3) Méthode Française (LCPC) :**

Méthode, développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) par Sedran et De Larrard, vise à économiser la production des BAP tout en cherchant la compacité optimale des grains solides (des poudres aux gravillons) permettant d'obtenir un béton de grande ouvrabilité, de meilleure résistance en utilisant un volume de pâte moins important [23]. La méthode française est basée sur le modèle d'empilement compressible du squelette granulaire [24]. Ce modèle prédit la compacité réelle du squelette granulaire à partir des propriétés des ses constituants (poudre, sable et gravillons) telles que la granulométrie, la densité, les proportions du mélange et la compacité propre. Le comportement du béton à l'état frais est modélisé à partir de sa compacité granulaire [23].

Cette méthode nécessite de faire quelques essais pour déterminer la teneur en eau et le dosage en superplastifiant et le dosage à saturation du « SP ». Connaissant ces paramètres et ceux cités en haut et de l'effet de paroi, et grâce au logiciel Bétonlab-Pro2, les dosages des constituants sont déterminés [23].

Pour pouvoir utiliser de façon pratique le modèle d'empilement compressible, les auteurs l'ont fait intégrer dans un logiciel nommé Bétonlab-Pro2 [23]. Le comportement rhéologique du béton est

évalué en utilisant un rhéomètre appelé BTRHEO qui a été développé au LCPC. Il est difficile donc aux autres chercheurs de l'utiliser sans avoir ces deux moyens [25].

### I.5) Constituants et leur influence dans la formulation des BAP :

Toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide & solide) et de sa nature minéralogique, chimique, et morphologique. Ainsi, nous allons décrire les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (granulats, ciment, additions minérales, adjuvants et eau), et les paramètres influents.

Un bilan sur les rôles des constituants influents dans la formulation des bétons autoplaçants est représenté dans le Tableau 0-1 sous forme de synoptique général. La dernière colonne exprime l'influence de l'augmentation du dosage du constituant ou de la valeur du paramètre correspondant.

Tableau 0-1 - Rôles des principaux paramètres dans l'écoulement et la formulation des BAP [52].

Constituants et paramètres principaux	Rôles principaux dans la formulation	Influence sur le seuil de cisaillement et la viscosité
Eau (E)	Fluidité et hydratation (lié à la concentration volumique en solides et au rapport E/C)	Diminution
Ciment (C)	Liant (lié à la concentration volumique en solides et au rapport E/C)	Augmentation
Concentration volumique en solides	Encombrement, plus de frictions entre les particules	Augmentation
Granulats	Réduction du coût du béton, performances mécaniques variables selon le type	Selon le type
Additions minérales	Optimisation du squelette granulaire du béton, avantages environnementaux et économiques	Selon le type (demande en eau)
Filler calcaire (F)	Amélioration de l'écoulement au-dessous du dosage critique	Dépend du dosage
Superplastifiants (SP)	Défloculation, dispersion des particules de Ciment	Diminution
Agents de viscosité (AV)	Résistance à la ségrégation, cohésion	Augmentation

## I.6) Propriétés du béton autoplaçant à l'état frais :

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant à l'état frais sont : la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques. Ces critères sont : la capacité au remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité de passage [26].

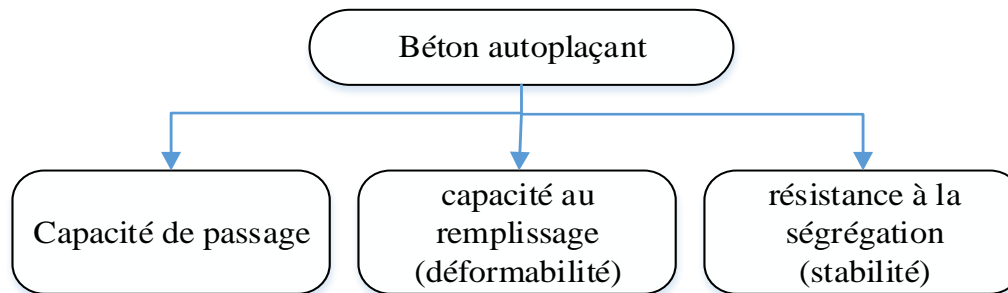


Figure 0-7 - Propriétés du béton autoplaçant à l'état frais.

### I.6.1) Déformabilité ou capacité au remplissage :

La fluidité permet d'apprécier le remplissage du béton ou sa déformabilité. En se déformant sous l'effet de son propre poids, le BAP est capable de remplir les vides et les espaces difficiles en milieu confiné, étroit sans vibrations externe ou interne. On observe le remplissage du béton sous deux aspects (capacité et vitesse de remplissage) :

- ✓ Le premier aspect (capacité de déformation du béton) traduit le % rempli ou la distance couverte dans l'espace.
- ✓ Le deuxième aspect (vitesse de déformation) exprime la vitesse d'écoulement du béton.

La fluidité du béton BAP, du point de vue rhéologique, se manifeste par un faible seuil de cisaillement et une viscosité suffisante pour maintenir les granulats dans la suspension (Figure 1-8). L'addition d'un super plastifiant assure la fluidité de la pâte en réduisant fortement le seuil de cisaillement de la pâte, et celui du béton si les frottements inter- granulaires sont minimisés par un volume suffisant de pâte.

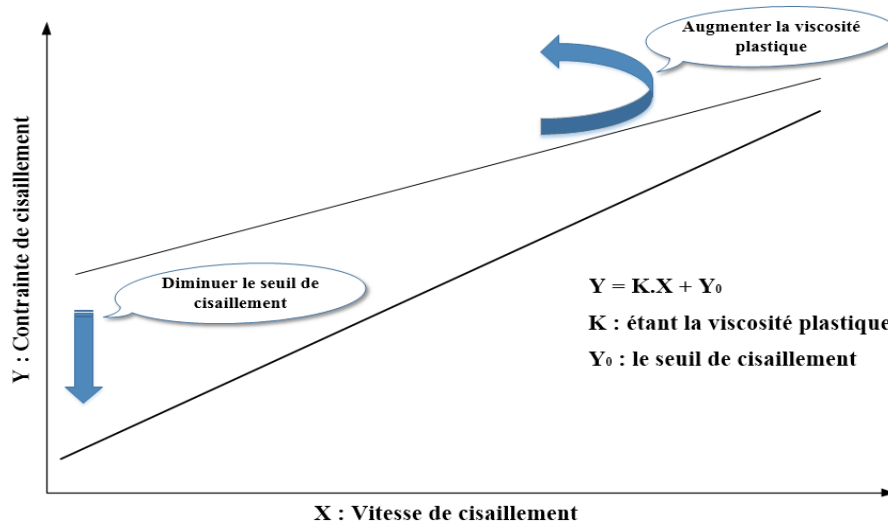


Figure 0-8 - Diminution du seuil de cisaillement et augmentation de la viscosité plastique du béton [27].

### I.6.2) Résistance à la ségrégation (stabilité) :

Cette propriété est définie comme la capacité du béton de rester uniforme et cohésif pendant et après la mise en place [28]. La résistance à la ségrégation du béton est principalement liée à sa viscosité. En fait, lorsque la viscosité est faible le ressuage se produit facilement. Peu de ressuage est acceptable, mais un ressuage excessif réduit significativement la stabilité du béton, ainsi la résistance et la durabilité du béton durci. Si la viscosité est élevée, la mise en place du béton devient difficile et les gravillons se séparent du mortier conduisant à un blocage de l'écoulement du béton auprès du ferrailage. Il est nécessaire donc de chercher une viscosité appropriée permettant d'assurer une grande résistance à la ségrégation. Ceci peut être obtenu en réduisant la quantité d'eau libre (rapport E/L), le volume et la taille maximale des gravillons, et en augmentant la quantité des fines [29,30].

Khayat et Tang [29] ont rapporté que le BAP ne doit pas présenter aucun signe de ségrégation que ce soit sous conditions dynamiques (ressuage de l'eau, ségrégation des gravillons) ou statiques (mauvaise distribution de gros granulats du béton durci).

Afin d'assurer une grande résistance à la ségrégation, il existe trois approches :

- La première approche est utilisée dans la méthode japonaise de formulation des BAP, elle consiste à utiliser un faible rapport E/L pour réduire la quantité d'eau libre, un superplastifiant, une grande teneur en poudre et un faible volume de granulats [31].

- Un agent de viscosité est utilisé (dosage modéré) pour augmenter la viscosité et la stabilité du mélange sans avoir recours à la réduction du rapport E/L. la teneur en poudre utilisée est moyenne [30].
- La dernière approche est presque similaire à la première, elle consiste à limiter la teneur en eau pour améliorer la viscosité, et à utiliser un faible dosage en agent de viscosité pour pallier le changement de la teneur en eau des granulats (notamment le sable) [31].

### I.6.3) Capacité de passage :

Pour produire un bon écoulement sur chantier, le BAP doit réunir à la fois fluidité (capacité de remplissage) et résistance à la ségrégation. Dans les zones confinées et fortement ferraiillées, il faut, cependant, que le béton puisse s'écouler facilement.

En effet, la quantité importante de granulats dans le béton et la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture en armature ou dans un confinement provoque leur blocage (Plus de gravier, plus de risques de blocage). Ceci est illustré sur la Figure 0-9. Qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.

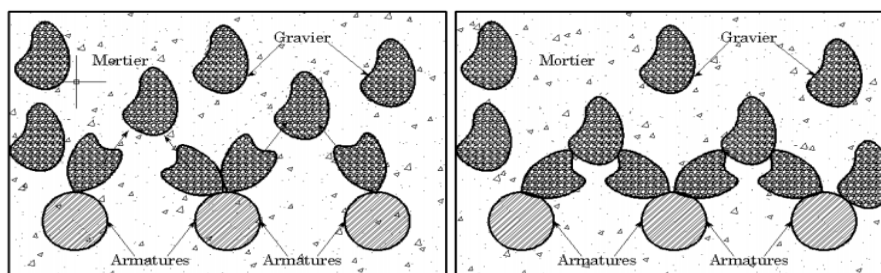


Figure 0-9 - Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures [32].

À l'approche des armatures, une différence se crée entre la vitesse des granulats et celle de la pâte. Plus rapide, la pâte précède les granulats en passant à travers les armatures [33].

Ainsi, la quantité de granulats est considérée localement plus grande avant les armatures et tend à augmenter avec l'écoulement du béton. Ce phénomène s'explique par le lessivage de la pâte à travers les granulats au niveau du passage entre les armatures [34].

L'importance des frictions et des collisions entre granulats créent plusieurs contacts entre les granulats à l'amont de l'ouverture entre les armatures, ce qui entraîne une possibilité de formation d'un arc stable de granulats bloquant l'écoulement de béton.

L'approche pour réaliser ces propriétés, c'est-à-dire la capacité de remplissage, la capacité de passage ainsi que la résistance à la ségrégation, est montrée sur la Figure 0-9, un taux d'agrégats

limité augmente le volume de pâte, et par conséquent la quantité de collisions entre les particules des granulats est réduite, ce qui fournit la capacité de passage. Un volume de pâte élevé avec un faible rapport eau/poudre et l'utilisation de superplastifiant assure la fluidité et la résistance à la ségrégation [35].

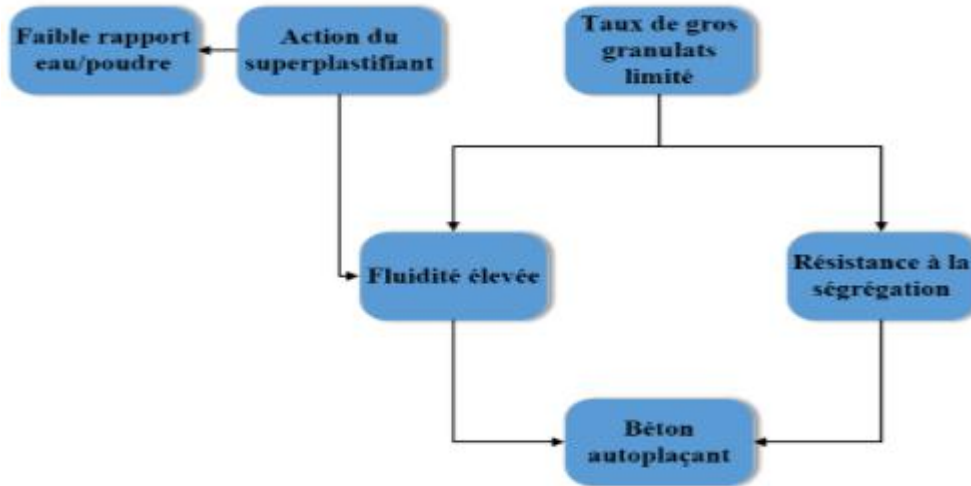


Figure 0-10 - Approche générale pour aboutir à un béton caractère autoplaçant [36].

L'existence d'une relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton a été montrée par Ozawa et Al [37]. L'écoulement, pour de faibles valeurs d'affaissement, tendrait à s'arrêter par un accroissement de la friction entre les particules de béton. Par contre pour des valeurs d'affaissement plus élevées, la séparation des granulats du mortier est rendue facile et la formation de ponts de granulats peut bloquer l'écoulement. La capacité de remplissage maximale est obtenue grâce à une déformabilité maximale et une ségrégation minimale. Figure 0-9 indique la relation entre les différentes propriétés du BAP.

### I.6.3) Bilan :

Un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoire (fluidité, résistance à la ségrégation) .Pour résumer ,nous présentons les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir , les actions entreprise pour leur mise en œuvre et les principaux tests empiriques dans le tableau 1-2 .

Tableau 0-2 - Propriétés des BAP à l'état frais, les moyens de les obtenir et essais de caractérisation.

Propriétés d'un BAP	Moyens d'obtention	Action à mener dans la formation	Essai
Remplissage	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation du volume de pâte	cône d'Abrams
	Optimisation de la pâte	Utilisation du superplastifiant	Entonnoir en V
		Optimisation du rapport E/C	
Résistance à la ségrégation	Réduction de l'eau libre dans le béton	Utilisation de matériaux de grande de surfaces granulaire	Ségrégation au tamis
		Utilisation d'agent de viscosité	
	Réduction de la séparation de phases	Réduction de la taille maximale de granulats	
		Réduction de rapport E/C	
Capacité de passage	Réduction de blocage des Granulats	Réduction de volume de de gravier	Boîte en L
		Réduction de la taille maximale de granulats	Tube en U

## I.7) Propriétés du béton autoplaçant à l'état durci :

### I.7.1) Propriétés mécaniques :

#### I.7.1.1) Résistance à la compression :

Diverses études [38, 44, 45, 46] comparent l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires à celle des bétons vibrés. Ces auteurs observent une accélération de la résistance au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours. Ceci est expliqué par une hydratation favorisée par une multiplication des sites de nucléation des fines du filler.

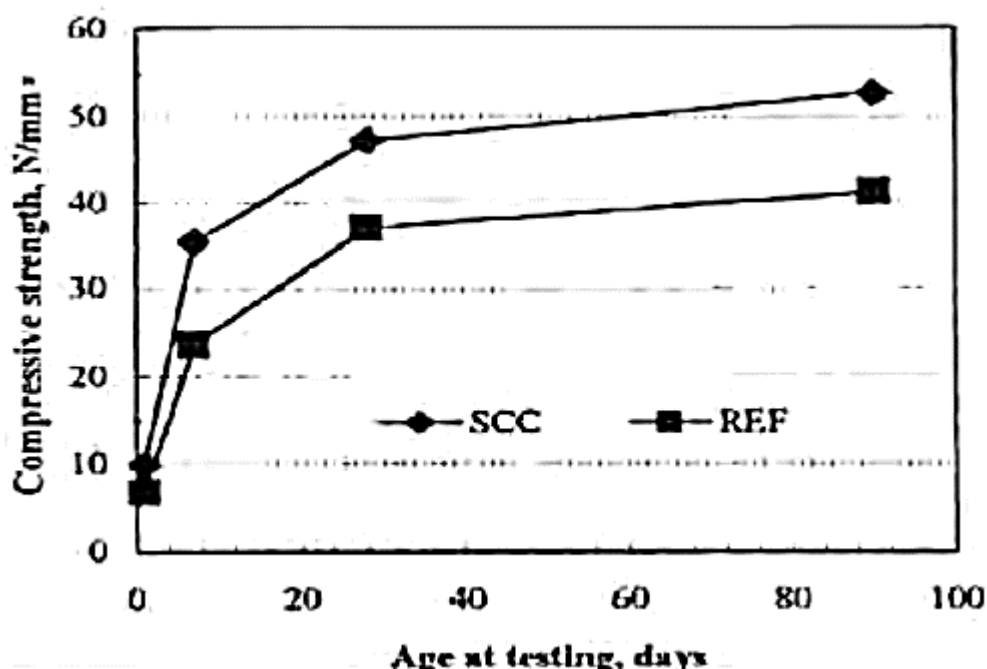


Figure 0-11 - Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) [38].

De plus, certains auteurs [39] affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse des additions minérales (exprimée en valeur Blaine) est grande.

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [40]. De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique [41]. 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.

### I.7.1.2) Résistance à la traction :

La résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. Par exemple, la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer cette résistance [42]. En effet l'augmentation de la quantité de sable et / ou du volume de fines, entraîne une élévation de la résistance en traction.

On peut noter que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont fréquemment utilisées dans la littérature pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus. Pour certains auteurs [44, 45], la porosité de l'auréole de transition des BAP est inférieure à celle des BV. Donc, la résistance en traction des BAP est supérieure à celle des BV (de l'ordre de 10%). Ces résultats sont repris par Pineaud [44]. Il suggère que la qualité de l'interface pâte-granulats est meilleure dans les BAP et la faible proportion de granulats diminue le risque de propagation des premières fissures.

### I.7.1.3) Module d'élasticité :

Si on se réfère à la formule réglementaire du module ( $E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$ ), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré. Or, si ceci est vrai dans certains cas à la précision des mesures près [47] (Figure 0-12), d'autres auteurs indiquent que les modules des BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés [48].

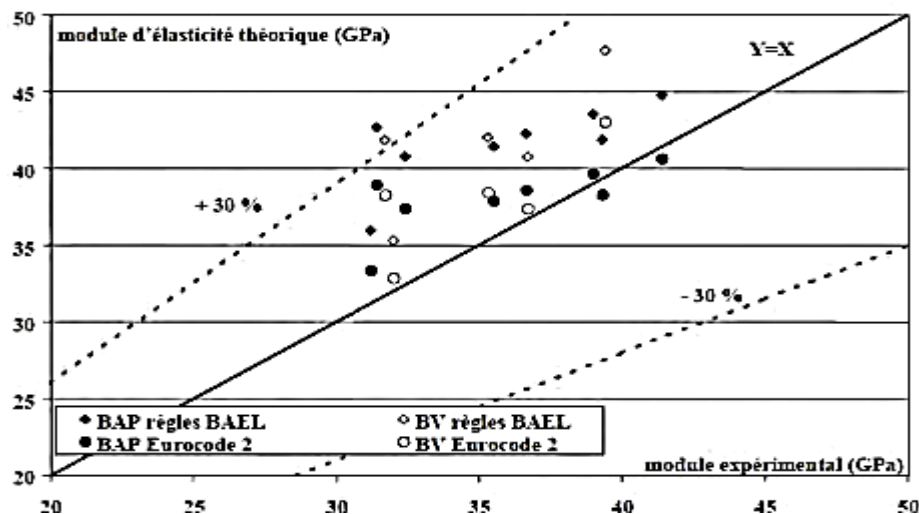


Figure 0-12 - Comparaison des modules d'élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [49].

#### I.7.1.4) Retrait :

Pour une même classe de résistance, le coefficient de dilatation thermique au jeune âge (0-24 heures) est équivalent pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires [50]. Le retrait au jeune âge en dessiccation des bétons autoplaçants est supérieur à celui des bétons ordinaires vibrés (en particulier pour les faibles gammes de résistance).

Benkechkache et Houari [51], a montré que le retrait total du BAP est plus élevé que celui du béton traditionnel d'égale résistance. L'ordre de grandeur de cette déformation est aux alentours de  $450\mu\text{m}/\text{m}$  (Figure 0-13)

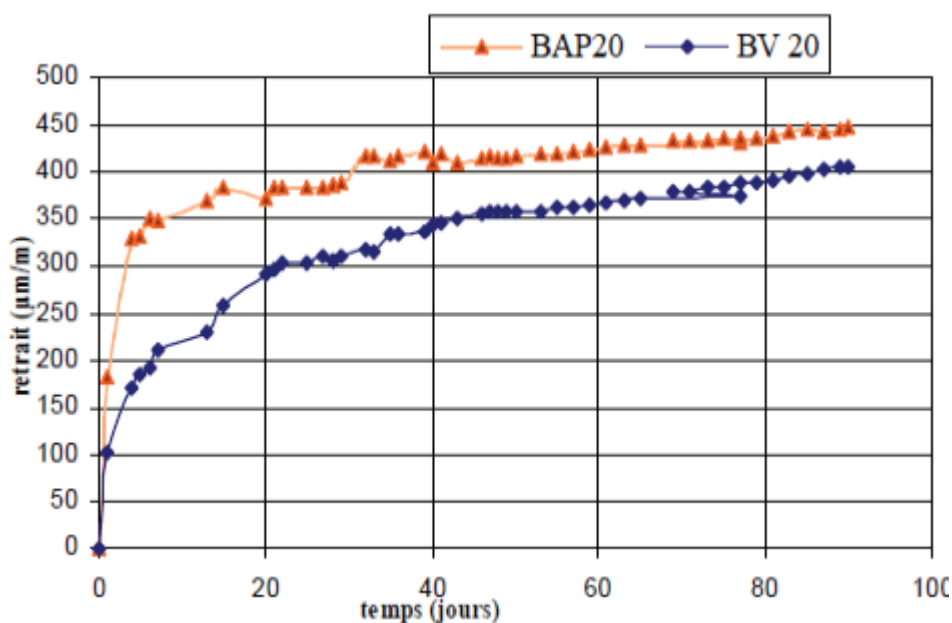


Figure 0-13 - Influence du type de béton sur le retrait [51].

#### I.7.1.5) Déformations et fluage :

Les bétons autoplaçants subissent des déformations différées sous charge plus importantes que celles des bétons ordinaires vibrés dans la même gamme de résistance [50].

Les travaux de Benkechkache et Houari [51], ont montré que l'augmentation du volume de pâte, entraînée par l'ajout de fillers, conduit à des déformations différées plus importantes pour les BAP en les comparant avec le BV. Cela peut être expliqué selon l'auteur par la présence d'additions minérales dans les BAP qui lui offre des pores plus fins que ceux des bétons vibrés. En effet, la pression capillaire étant inversement proportionnelle aux rayons des pores, celle-ci est d'autant plus forte dans les BAP, ce qui engendrerait un fluage plus important dans ces bétons, par comparaison aux bétons vibrés correspondants (Figure 0-14).

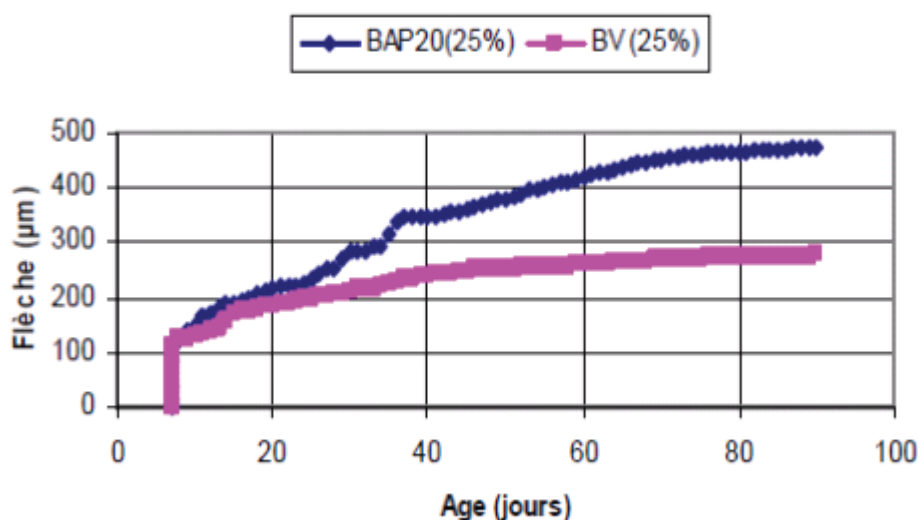


Figure 0-14 - Influence du type de béton sur le fluage [51].

### I.8) Durabilité des bétons autoplaçants :

La plupart des processus de détérioration touchant les structures en béton, impliquent les transferts de matière (en particulier d'agents agressifs) à l'intérieur d'un matériau poreux comme le béton. Il est couramment prétendu que meilleure est la résistance d'un béton à ces transferts, plus durable sera celui-ci. Les propriétés de transfert du béton sont donc utilisées progressivement comme critère de sa durabilité. La pénétration de gaz, d'eau ou d'autres fluides dans le béton s'effectue par l'intermédiaire des pores de la matrice cimentaire et des interfaces pâte - granulats. Les trois principaux mécanismes des transferts de fluides à l'intérieur du béton sont la perméation, la diffusion et l'absorption. La perméation concerne le transfert de matière dû à un gradient de pression. La diffusion est le mécanisme par lequel un fluide se déplace sous l'action d'un gradient de concentration et l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires [53].

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction). Les règles applicables pour les bétons courants restent donc normalement applicables aux BAP.

Pour encourager l'utilisation des bétons autoplaçants, plusieurs études sur les différents aspects de la durabilité des bétons autoplaçants comme la perméabilité à l'oxygène [54, 55], la diffusion des ions chlore [56–57], la carbonatation accélérée [58, 59], l'attaque sulfatique externe [60], ont été menées depuis quelques années.

### I.8.1) Perméabilité aux gaz :

La perméabilité aux gaz est une propriété de transfert qui est fréquemment utilisée pour caractériser la durabilité du béton. Ainsi, la mesure de la perméabilité à l'oxygène est une mesure fiable, relativement simple et utilisable pour le simple classement des bétons ou encore pour une évaluation de leur durabilité potentielle.

Les spécificités de composition des BAP ne semblent pas permettre de tirer un premier commentaire quant à une perméabilité différente de celle des bétons vibrés. Le volume de pâte plus important peut a priori être un handicap pour ces bétons mais l'utilisation d'addition minérale est susceptible d'améliorer cette propriété : la densification de la matrice cimentaire qu'elle engendre peut éventuellement diminuer la perméabilité du béton. Certaines études publiées [61] ont en effet montré que les additions minérales telles que le filler calcaire, donnent aux BAP une microstructure plus dense que les bétons vibrés de même rapport E/C. La porosité de ces BAP, en particulier celle de l'auréole de transition, est significativement plus faible que celle des bétons vibrés. D'après ces données, il résulte de ces observations une amélioration des propriétés de transfert mesurées, comme la perméabilité aux gaz par exemple, et une meilleure durabilité de ces bétons.

D'autres résultats [54 – 62] relatifs à la durabilité des BAP montrent que leur perméabilité à l'oxygène est moindre que celle des bétons vibrés (voir Figure 0-15). Les compositions étudiées ont des caractéristiques très proches (quantité de ciment, rapport E/C) et il ressort de ces observations que la diminution de la perméabilité est principalement due à l'utilisation d'additions minérales dans les BAP. L'influence d'autres paramètres distinguant les BAP des bétons vibrés n'a pas clairement été élucidée. Le volume de pâte, par exemple, n'entre pas dans les éléments de comparaison de la perméabilité de deux types de béton.

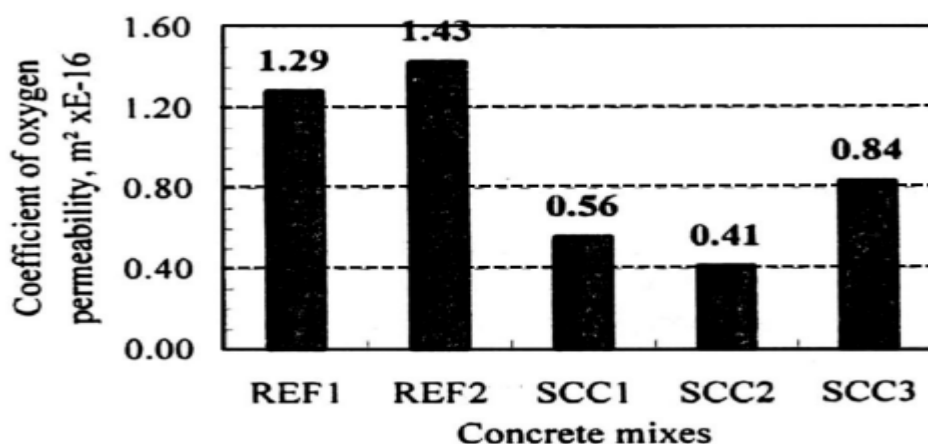


Figure 0-15 - Coefficient de perméabilité à l'oxygène de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés correspondants [54].

### I.8.2) Diffusion des ions chlore :

La diffusion est le résultat d'un transfert de matière, à travers le béton, dû à un gradient de concentration (diffusion moléculaire). Les mouvements de fluides, liquides ou gaz, qui en découlent sont très influencés par le taux de saturation du matériau. Comme pour la perméabilité, l'eau contenue dans les pores ralentit la diffusion des gaz de manière significative. Cette solution interstitielle véhicule également des ions, dont certains sont de nature agressive comme les chlorures et les sulfates. De plus, des interactions chimiques peuvent avoir lieu avec la pâte de ciment à l'intérieur des pores : à la diffusion moléculaire vient se joindre la diffusion ionique. Celle-ci est plus présente lorsque le matériau est saturé et joue un rôle important dans l'attaque du béton par ces agents agressifs. La diffusion varie elle aussi avec le rapport E/C mais l'influence de ce dernier sur la diffusion est bien moindre que sur la perméabilité [6].

L'agent agressif extérieur dont la diffusion à travers le béton est particulièrement intéressante est celle des ions chlore qui peuvent provenir de diverses sources extérieures (sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles) et pénétrer dans le béton par diffusion (et/ou absorption). Lorsque ceux-ci se retrouvent en quantité suffisante (concentration minimale) dans l'eau interstitielle du béton ils engendrent une diminution du pH. Au voisinage des armatures en acier, cette diminution de pH détruit progressivement la couche protectrice (basique) des armatures. Il y a dépassivation de l'acier et le phénomène de corrosion peut alors commencer. Dans ce cas de figure, la durabilité du béton armé dépend fortement de la résistance du béton à la pénétration de ces agents agressifs (même s'ils ne dégradent pratiquement pas le béton lui-même).

Les différentes comparaisons publiées sur la diffusion des ions chlores entre les BAP et les bétons ne permettent pas d'en déduire une tendance générale.

Certains auteurs [56] ont évalué le comportement de bétons autoplaçants et de bétons vibrés soumis à un essai de migration des ions chlores sous un champ électrique. Malgré un rapport E/C plus faible (0,4 contre 0,5 pour le béton vibré), le BAP s'est avéré moins résistant à la migration des ions chlore. Les coefficients de diffusion du BAP, calculés à partir de ces essais, sont 2 à 3 fois supérieurs à ceux du béton vibré. Selon ces auteurs, ces faibles performances pourraient être attribuées à une mauvaise dispersion de l'addition calcaire. D'autres auteurs observent expérimentalement que les BAP possèdent des coefficients de diffusion des ions chlore équivalents [63], sinon meilleurs que les bétons vibrés. D'après Zhu et al. [54] la résistance à la pénétration des ions chlore est très influencée par le type d'addition minérale employé dans le béton. Les bétons formulés avec (BAP SCC1) ou sans filler calcaire (BAP SCC3 et béton vibré REF1) présentent des coefficients de migration des

ions chlore similaires, avec une valeur légèrement plus faible pour celui formulé avec un filler calcaire (Figure 0-16). Ces auteurs indiquent également que l'emploi de cendres volantes diminue considérablement le coefficient de migration de ces bétons. Toutefois, les résultats indiquant des comportements équivalents des BAP et des bétons vibrés vis-à-vis du mécanisme de diffusion sont les plus courants [64, 65, 66]. Ces meilleures performances sont, là encore, expliquées par la densification du réseau poreux du BAP, en raison de la présence d'une quantité importante de filler.

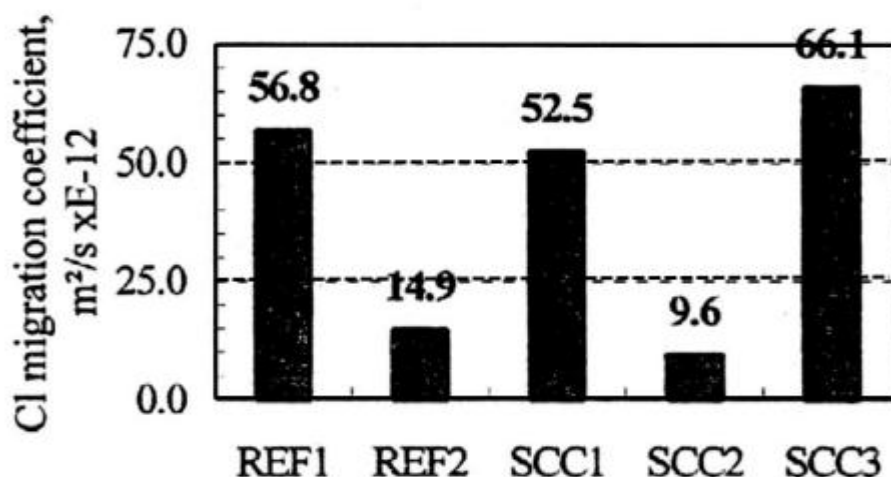


Figure 0-16 - Coefficient de migration des ions chlore de trois BAP (SCC) et de deux Bétons vibrés correspondant [54].

### I.8.3) Absorption d'eau par capillarité :

L'eau est la principale cause de la dégradation des constructions. En fait, quand le béton est partiellement immergé dans l'eau, celle-ci pénètre à travers les pores en transportant dans certains cas des substances nocives et se gèle à l'intérieur des pores [67]. L'absorption d'eau est généralement liée à la porosité des BAP [68,69]. L'augmentation de la porosité conduit à une augmentation du coefficient d'absorption d'eau et vice versa. D'autres résultats [54] démontrent que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés (Figure 0-17) et elle est d'autant plus faible qu'ils contiennent des fillers calcaires ou des cendres volantes.

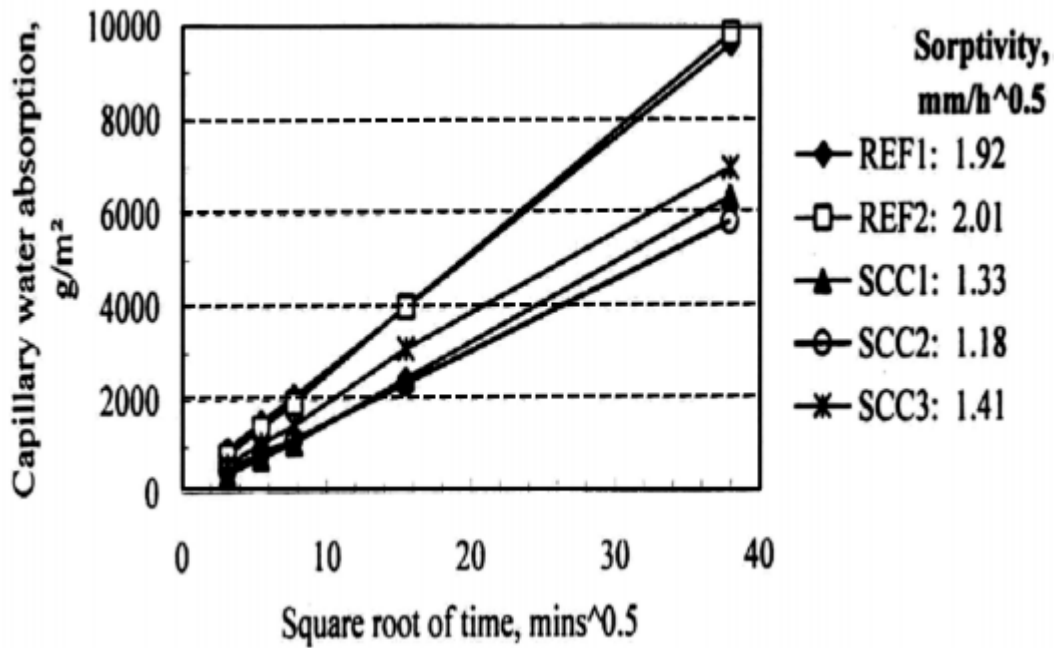


Figure 0-17 - Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés (REF) [54].

#### I.8.4) Absorption d'eau par immersion :

Dans ce cas, la dégradation est plus grande, puisque le béton est totalement immergé dans l'eau. Toutefois, grâce à leur faible porosité, les BAP sont caractérisés par une faible absorption d'eau [62,70]. Kapoor et al [71] ont rapporté que la valeur d'absorption d'eau par immersion des BAP est 1% contre 2% pour les bétons vibrés.

#### I.8.5) Résistance à l'effet gel-dégel :

L'un des facteurs qui peut nuire la durabilité des bétons est l'effet gel-dégel. Cet effet se produit quand l'eau pénètre à l'intérieur du béton et se gèle. Ce gel interne du béton peut provoquer des dommages sur les ouvrages (microfissuration interne, gonflements, puis éclatement du béton). La répétition des cycles gel-dégel favorise la propagation des fissures et peut conduire à la destruction totale de l'élément en béton [72].

La résistance au gel-dégel du béton dépend de différentes propriétés (résistance à la traction, fluage, déformabilité), mais elle dépend surtout des caractéristiques et du taux de saturation de son réseau poreux. Si celui-ci contient de l'air entraîné (avec une quantité et une distribution convenables), l'expulsion de l'eau excédentaire par la glace, lors du gel, pourra se faire par l'intermédiaire de ces vides et engendrera moins de désordres [74]. La quantité d'air entraîné et la répartition des bulles d'air sont donc couramment admises comme facteurs primordiaux de la résistance au gel-dégel des

bétons. Pour des bétons susceptibles de subir de telles conditions extérieures, il est recommandé d'utiliser un agent entraîneur d'air.

Les formulations de BAP comportent des quantités importantes de superplastifiants dont les effets secondaires peuvent être l'entraînement d'air dans le béton. D'autre part, l'utilisation complémentaire d'un agent de viscosité peut avoir comme effet de stabiliser ce réseau de bulles d'air. Par conséquent, cette différence de propriétés entre BAP et béton vibré a incité plusieurs chercheurs à comparer la résistance au gel-dégel des deux types de béton.

Les résultats présents dans la littérature montrent nettement que les BAP, formulés sans entraîneur d'air, sont plus résistants au gel-dégel que les bétons vibrés (de même rapport E/C, avec ou sans entraîneur d'air) [63, 64, 73, 75] (voir Figure 0-18)

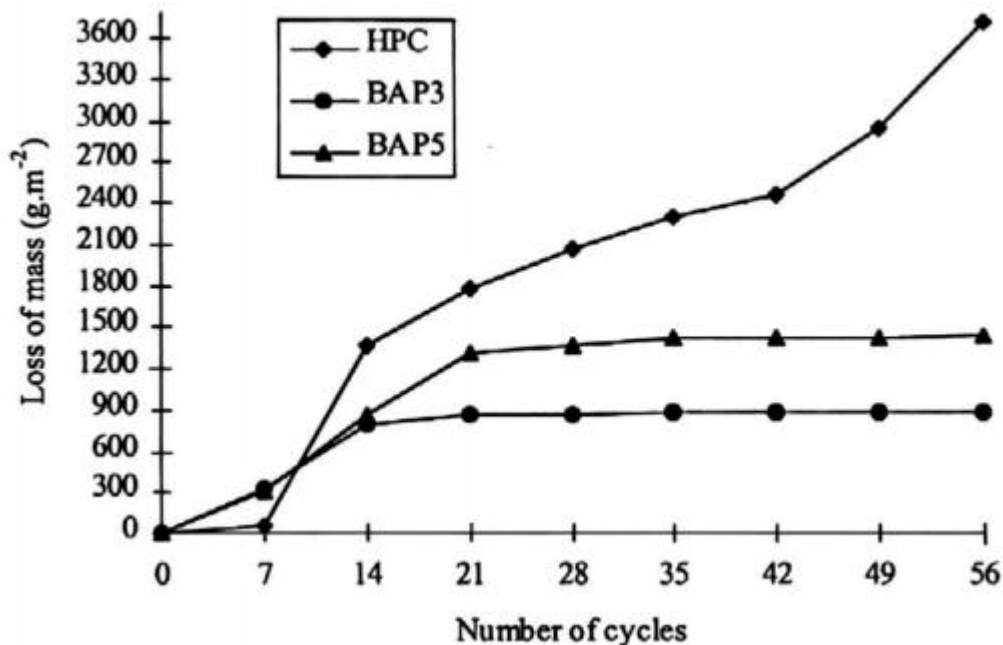


Figure 0-18 - Perte de masse de deux BAP et d'un BV pendant un test d'écaillage [63].

### I.8.6) Résistance aux attaques sulfatiques :

Les phénomènes à l'origine de l'attaque sulfatique ne sont pas parfaitement bien connus ni maîtrisés. L'attaque sulfatique est associée à la précipitation de produits sulfatés secondaires, d'une expansion importante et de la détérioration chimio-mécanique (modifications des propriétés de transport de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion,...). Ceci peut conduire à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé (type et rapport Eau/Ciment).

On distingue l'attaque sulfatique interne [76, 77], qui fait intervenir des sulfates déjà présents dans le béton (DEF), de l'attaque sulfatique externe qui se produit dès lors que les conditions externes sont réunies.

#### **I.8.6.1) Sources des sulfates :**

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques et industrielles. Dans certaines régions où les sols contiennent du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ou de l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), on peut rencontrer des concentrations élevées (> 5%). Les eaux souterraines en contact avec ces sulfates peuvent se charger en ions  $\text{SO}_4^{-2}$ . Les sols alluviaux ou argileux peuvent aussi contenir des pyrites qui s'oxydent en sulfates en contact de l'air et de l'humidité avec la formation d'acide sulfurique. Les sulfates peuvent provenir de la décomposition biologique aérobie de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes).

L'eau de mer contient elle-même des sulfates, à raison de quelques grammes par litre, et les bétons en milieu marin sont donc également concernés par les attaques sulfatiques externes (classes d'exposition XS). Les sources de sulfates peuvent aussi être internes :

- Contamination des granulats par du plâtre ;
- Granulats gypseux ;
- Sulfures dans certains granulats.

#### **I.8.6.2) Étapes d'une attaque sulfatique :**

L'attaque sulfatique se produit lorsqu'un matériau cimentaire se trouve en contact direct avec une source de sulfate. Le processus d'une agression sulfatique commence à la surface du béton et progresse à son cœur au fur et à mesure que le temps augmente. Les étapes suivantes résument la progression d'une attaque sulfatique [60] :

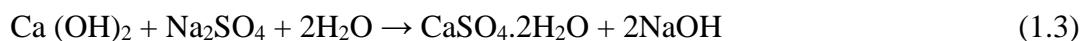
- Transfert dans le milieu poreux des ions de sulfate, qui est contrôlé par la perméabilité et la diffusité du matériau ;
- Réactions chimiques entre les composants de la pâte du ciment, qui dépendent du ciment utilisé et de l'apport en ion  $\text{SO}_4^{-2}$  ;
- Le phénomène d'expansion résultant de la cristallisation de nouveaux hydrates.

#### **I.8.6.3) Mécanisme d'attaque par les sulfates :**

Les modes d'action des sulfates dans les bétons sont complexes, nombreux, et n'ont pas encore tous été identifiés. Cependant, la chimie minérale et certaines techniques d'investigation récentes ont permis de reconnaître certains composés, d'expliquer leur formation, et de proposer des scénarios

cohérents avec les modes de dégradation portlandite), trois composés, qui se forment en présence de sulfates, jouent un rôle important dans les attaques sulfatiques externes : le gypse, l'ettringite . Cela peut entraîner un gonflement, une perte de résistance et une altération de la surface de l'élément en béton. Si le premier des trois phénomènes est le plus connu et caractéristique, les deux autres ne sont pas à négliger dans la pratique. Si l'ion sulfate  $\text{SO}_4^{-2}$  est toujours en cause, les conditions dans lesquelles il agit, notamment le cation associé, la température, le pH, la concentration, conditionnent fortement le mécanisme et le type de dégradation [78]. En outre, pour le même processus et le même stade de dégradation, le taux d'atteinte varie en fonction de l'indicateur mesuré [79]. Dans ces conditions, il devient délicat de définir un test représentatif, un indicateur fiable et un critère pertinent, pour évaluer ou garantir la résistance d'un liant ou d'un béton aux sulfates.

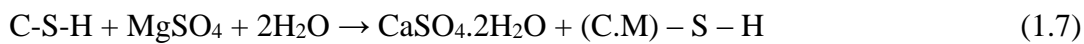
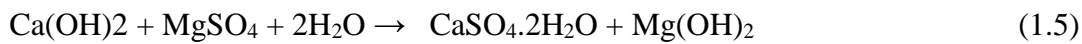
Dans le cas de solutions à fortes teneurs en sulfates, supérieures à 1000 mg [81] ou 8000 ppm [80] de  $\text{SO}_4^{-2}$ . Le gypse résulte de l'interaction entre les sulfates d'apport et la matrice cimentaire. Le gypse,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , est utilisé comme régulateur de prise et contenu dans le ciment. Il existe donc déjà dans le béton sain. Celui qui se forme en présence d'une solution riche en sulfates résulte de la substitution des ions hydroxyde par les ions sulfate au niveau de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , selon la réaction suivante, dans le cas où le cation associé est l'ion sodium  $\text{Na}^+$ .



Le gypse ainsi produit peut alors réagir avec les aluminates de calcium pour former de l'ettringite,  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 30 - 32 \text{H}$  (où C : est utilisé pour désigner  $\text{CaO}$ , A pour  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et H pour  $\text{H}_2\text{O}$ ), à partir de  $\text{C}_3\text{A}$  anhydre, selon la réaction (1.2). Mais l'ettringite peut également se former à partir de l'aluminate tétracalcique hydraté  $\text{C}_4\text{A} \cdot \text{H}_{13}$  ou du monosulfoaluminate de calcium  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}$ .



Les sulfates de magnésium ont un mode d'action particulier – encore plus préjudiciable au béton car, en plus de la formation d'ettringite, selon les réactions (1.5) et (1.6), se produit la substitution des ions calcium  $\text{Ca}^{+2}$  par les ions magnésium  $\text{Mg}^{+2}$  au niveau des silicates de calcium hydratés C–S–H, selon la réaction (1.7). Ceci entraîne la perte de leurs propriétés liantes et donc la perte de la résistance mécanique du béton, car les silicates de magnésium hydratés M–S–H n'ont pas de caractère liant. Cependant l'hydroxyde de magnésium  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  sous forme de bruite, produit de la réaction (1.3), eut ralentir la pénétration des sulfates et former une couche protectrice, si celle-ci n'est pas détruite mécaniquement. C'est ce qui peut expliquer le bon comportement de certains bétons dans l'eau de mer, pourtant riche en ions sulfate et magnésium [78].



Le mode d'action des sulfates dépend donc assez étroitement du cation associé. Le sulfate de sodium est très soluble et entraîne la formation de gypse et d'ettringite expansive, dont les proportions relatives sont fonction à la fois de la concentration en sulfates  $\text{SO}_4^{2-}$  et en aluminat tricalcique  $\text{C}_3\text{A}$  du ciment. Le sulfate de calcium, issu du gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ou de l'anhydrite  $\text{CaSO}_4$ , est peu soluble, et dégrade le béton par formation d'ettringite expansive.

Au cours de ces processus de dégradation, la solubilité des différents précipités, quantifiée en chimie des solutions aqueuses par le produit de solubilité, a un rôle majeur. Ainsi, selon les concentrations présentes, les ions resteront en solution ou précipiteront, si leurs concentrations dépassent la solubilité maximale. Les effets de tels phénomènes peuvent être assez complexes, dans la mesure où un même cation par exemple, peut intervenir dans plusieurs équilibres de précipitation et dissolution. La formation d'un précipité peut ainsi conduire à la dissolution d'un autre, selon les valeurs de leurs produits de solubilité : le précipité dont la solubilité est la plus faible se forme préférentiellement à un solide de solubilité plus élevée.

#### **I.8.6.4) Facteurs affectant l'attaque sulfatique :**

L'attaque sulfatique est un phénomène très compliqué et dépend de plusieurs paramètres tels que la concentration des ions de sulfate, la qualité du béton (perméabilité), la teneur en ciment et sa composition (teneur en  $\text{C}_3\text{A}$ ), présence des ajouts minéraux et le rapport E/C [82].

La détérioration du béton augmente avec l'augmentation du taux de concentration des ions de sulfate.

La perméabilité du béton est le principal facteur qui domine la résistance du béton aux agressions sulfatiques. Une faible perméabilité est le signe d'une grande résistance à l'attaque par les sulfates. Pour réduire la perméabilité, il est nécessaire d'utiliser une teneur en ciment élevée, de limiter le rapport E/C, d'assurer une bonne mise en place et d'améliorer les conditions de cure du béton [83].

##### **I.8.6.4.1) La teneur du ciment en aluminat de calcium $\text{C}_3\text{A}$ :**

L'influence de la teneur en ciment et en  $\text{C}_3\text{A}$  sur la vitesse de dégradation du béton est présentée sur la Figure 0-19. Les résultats de cette figure montrent que la teneur en ciment a un effet plus important sur la durabilité du béton que la teneur en  $\text{C}_3\text{A}$ , puisque l'augmentation de la teneur en ciment

conduit à une diminution significative de la vitesse de dégradation du béton, ce qui peut s'expliquer par la diminution de la porosité qui permet de son coté de réduire la perméabilité, alors que l'augmentation de teneur en  $C_3A$  affecte légèrement la vitesse de détérioration du béton pour une teneur en ciment élevée, et grandement en cas où la teneur en ciment est faible. Pour protéger les bétons contre l'attaque des sulfates, il est nécessaire de limiter la teneur en  $C_3A$  ou d'utiliser carrément un ciment Portland résistant aux sulfates ayant une teneur en  $C_3A$  inférieure à 5% conformément à la norme ASTM C1157-03 (ciment de type V) [83].

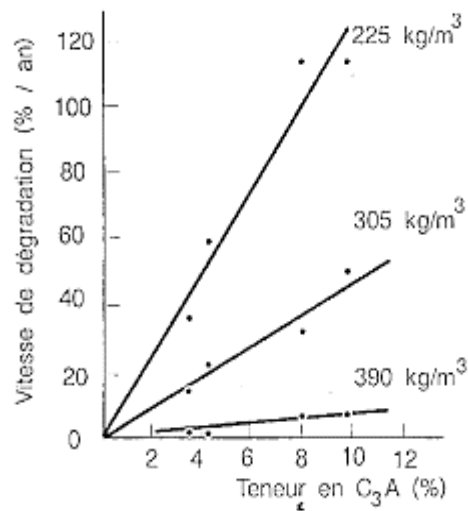


Figure 0-19 - Effet de la quantité du ciment et de la teneur en  $C_3A$  sur la vitesse de détérioration du béton [84].

#### I.8.6.4.2) Les additions :

La résistance aux sulfates peut être améliorée en utilisant des ajouts minéraux par substitution partielle au ciment. La Figure 0-20 représente l'effet des cendres volantes sur la vitesse d'expansion du béton. Les résultats de cette figure montrent que l'incorporation des cendres volantes permet de diminuer significativement la vitesse d'expansion du béton même avec l'utilisation d'une teneur moyenne en ciment (200 kg/m<sup>3</sup>).

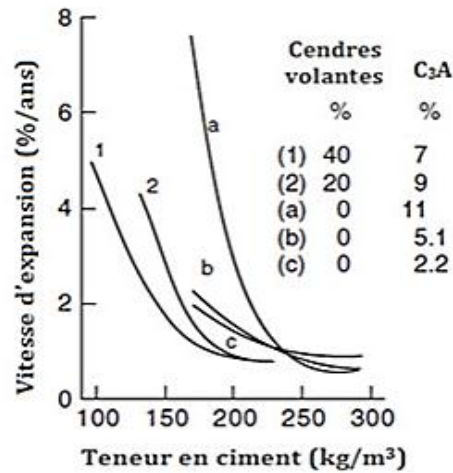


Figure 0-20 - Influence des cendres volantes sur l'expansion du béton [85].

Des bétons contenant 10% à 15% de métakaolin ont montré d'excellentes résistances à l'attaque des sulfates [86]. L'utilisation des ciments composés tels que ciment portland aux laitiers de haut fourneau (plus de 50% de LHF) et ciment pouzzolanique (plus de 25% de pouzzolane) a montré son efficacité dans le but d'améliorer la résistances des bétons contre les sulfates, car ils contribuent à la réduction de la quantité de l'hydroxyde de calcium existant dans la pâte du ciment hydraté, qui est en fait l'élément le plus vulnérable en cas d'attaque sulfatique [86,87].

#### I.8.6.4.3) Le rapport Eau / Ciment :

La résistance du béton aux attaques sulfatiques externes augmente quand le rapport E/C diminue et quand le dosage en ciment augmente. En effet, quand le rapport E/C diminue, le volume et la connectivité du réseau poreux se réduisent, et rendent donc le matériau moins sensible aux agressions, car la pénétration des agents agressifs devient plus difficile.

Monteiro et Kurtis [88] ont étudié l'effet du rapport Eau/Ciment et de teneur en C<sub>3</sub>A sur le temps de détérioration du béton. Ces auteurs ont montré que l'augmentation du rapport E/C rend l'effet de la teneur en C<sub>3</sub>A plus préjudiciable en accélérant le temps de détérioration du béton. Les mêmes auteurs ont rapporté qu'un faible rapport E/C (0,35 à 0,45) est nécessaire pour augmenter la durée de vie du béton à plus de 40 ans (Figure 0-21).

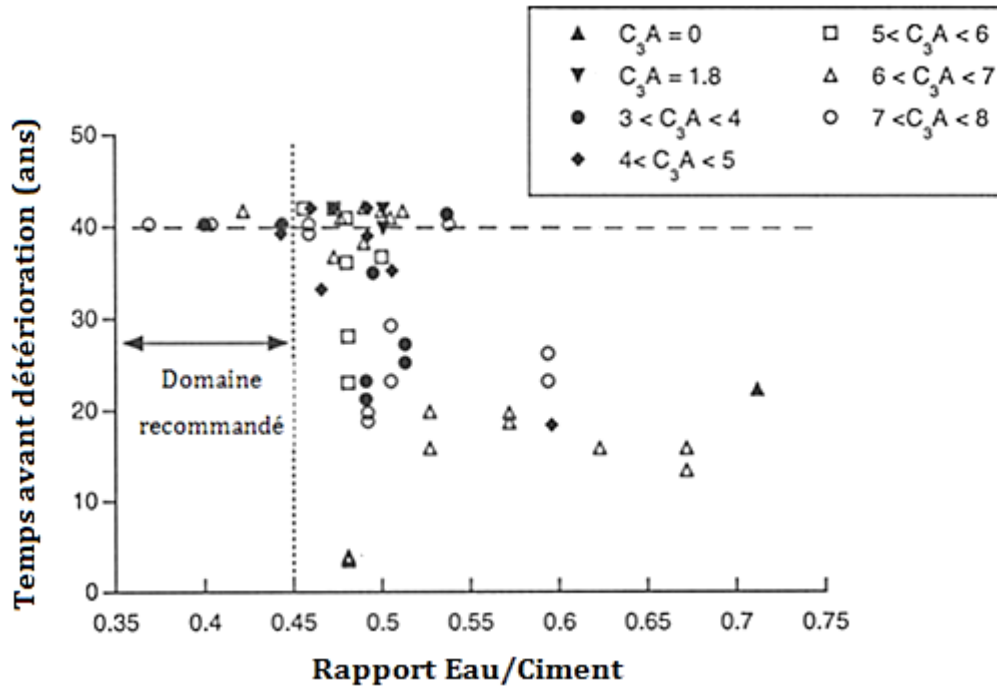


Figure 0-21 - Temps avant détérioration du béton en fonction du rapport Eau/Ciment et de teneur en  $C_3A$  [88].

#### I.8.6.4.4) Les granulats :

Les granulats interviennent à plusieurs niveaux dans la résistance du béton aux sulfates. La compacité du squelette granulaire et la qualité de l'auréole de transition (liée à la nature du granulat) agissent au niveau de la résistance à la pénétration des sulfates. Une partie de l'étude de Higgins et Crammond [145] a porté sur le paramètre « qualité des granulats », en utilisant quatre types de granulats (sable et graviers) : deux de qualité dite normale (quartz et calcaire), et deux de « mauvaise » qualité (craie et dolomite). Les résultats montrent que ce paramètre – nature minéralogique et forme des granulats – a une influence importante sur la résistance aux sulfates.

La nature des granulats intervient aussi au niveau de la résistance chimique. En effet, il a été supposé que les granulats pouvaient réagir avec la solution sulfatique, car les granulats calcaires contiennent des ions carbonate, réactif nécessaire à la formation de thaumasite, et une dégradation de ce type avait été constatée sur des bétons avec des granulats calcaires (Santhanam, Higgins). Mais d'autres études des mêmes auteurs ont montré un effet positif des granulats calcaires sur des bétons comportant des laitiers. Des hypothèses ont été formulées, mais le mécanisme n'a pas été clairement identifié, car d'autres effets, tels que l'apport en ions calcium et la nature de l'auréole de transition, peuvent intervenir. Enfin, étant donné que la dégradation se propage par la pâte, le volume de pâte et inversement le volume de granulats sont susceptibles d'avoir une influence significative.

#### I.8.6.4.5) La cure :

Une bonne cure donne au béton de surface une meilleure compacité et une perméabilité réduite, qui sont censées conférer aux bétons ayant subi une cure humide une meilleure résistance aux agressions, en empêchant la pénétration des ions ou des gaz. Cependant, dans le cas des attaques sulfatiques externes, plusieurs études ont montré que dans certains cas une cure humide prolongée pouvait réduire la résistance aux attaques, même si cela n'a pas encore été clairement expliqué, et que cet effet semble s'estomper avec le temps [145]. La formation d'une couche carbonatée, à l'air, pourrait protéger le béton. Par ailleurs, cela pourrait provenir de différences de contenu en hydroxyde de calcium (produit de l'hydratation), qui augmente la sensibilité aux attaques sulfatiques.

#### I.8.6.5) Techniques de mesures expérimentales :

Les techniques d'analyse utilisées dans le cadre d'une étude de la durabilité des bétons peuvent être divisées en deux catégories : macroscopiques et microscopiques.

##### I.8.6.5.1) Techniques macroscopiques :

Variation de la masse : un gonflement se traduit par un gain de masse tandis qu'une perte de matière par ruine fait chuter brutalement la masse ;

- La mesure de l'allongement (expansion) : c'est le paramètre qui démontre sans équivoque l'existence d'un gonflement. N'est mesurable que sur les échantillons équipés de plots, c'est-à-dire les mortiers ;
- Mesure de la vitesse de propagation du son : permet d'évaluer de manière non destructive l'évolution des propriétés mécaniques du béton puisque la vitesse est corrélée au module dynamique. Une chute du module dynamique traduit un endommagement global du béton ;
- Porosité à l'eau : c'est le premier paramètre qui gouverne la résistance et la perméabilité des bétons. Cette mesure permet donc d'identifier a priori les bétons les plus durables ;
- La mesure de la résistance à la compression et à la traction : mesure les propriétés mécaniques des bétons et des mortiers, notamment leur évolution au cours de l'exposition à l'environnement agressif ;
- Contrôle visuel de la fissuration : évalue le degré d'endommagement de l'échantillon teste, aide au diagnostic de l'altération [89].

#### I.8.6.5.2) Techniques microscopiques :

- La microscopie électronique à balayage (MEB) avec microsonde EDS : identifie les modifications de la microstructure et de la microtexture des bétons et des mortiers. Cet outil permet de réaliser le diagnostic de l'altération ;
- Analyse thermogravimétrique (ATG) : mesure quantitative des composants majeurs des matériaux ;
- La diffraction aux rayons X (DRX) : L'analyse des différents minéraux qui composent les bétons La DRX reste assez limitée en quantitative, elle permet d'identifier les phases bien cristallisées comme la portlandite, le monosulfoaluminate, le gypse, l'ettringite non colloïdale et d'autres phases minérales hydratées de la pâte de ciment.

#### I.8.6.6) Résistance des bétons autoplaçants aux sulfates :

Il n'existe pas beaucoup de travaux qui traitent l'effet de l'attaque sulfatique sur les BAP. Selon Safiuddin et al [70], les BAP présentent une meilleure résistance aux sulfates. Nagai et al [90] ont rapporté le même résultat. Un tel résultat est attribué au faible rapport E/L et à la quantité de fines importante qui occupe les vides et minimise la taille des pores de telle sorte que la perméabilité soit faible.

L'incorporation des ajouts minéraux dans les BAP a montré son utilité. Uysal et Sumer [91] ont étudié l'influence des cendres volantes, des laitiers des hauts fourneaux, de la poudre de calcaire, de la poudre de basalte et de la poudre de marbre sur la résistance des BAP aux sulfates. Ces auteurs [91] ont rapporté que la substitution du ciment par des ajouts minéraux mène à une diminution de la perte de résistance. Dû à leur activité pouzzolanique, la perte de résistance des BAP contenant des cendres volantes et du laitier des hauts fourneaux est plus faible par rapport aux BAP comportant des fillers.

#### I.8.7) Résistance aux acides :

Les environnements agressifs du point de vue de la lixiviation et des attaques acides peuvent être assez variés, et combinés à d'autres types d'agressions. Mais les eaux en contact avec le béton ont en commun d'être faiblement minéralisée, en particulier en calcium et neutres (pH = 7) voire (pH < 7). Le mécanisme de dégradation induit, provient de ces gradients de concentration entre les eaux agressives et la solution interstitielle du béton, d'un pH supérieur à 12 donc basique, et riche en calcium. Les principales espèces lixiviées sont de ce fait les ions calcium  $\text{Ca}^{+2}$  et hydroxyde  $\text{OH}^-$  [110]. Leur transport vers le milieu extérieur est donc diffusif, ce qu'ont permis de confirmer les

modélisations du phénomène [111, 112]. La solution interstitielle n'étant plus saturée en ions calcium et en hydroxyde, les composés contenant ces espèces se dissolvent. La teneur en calcium des produits solides décroît avec la diminution de la concentration en calcium dans la solution porale. La lixiviation commence par la dissolution de la portlandite, puis des monosulfoaluminates, l'ettringite et les C-S-H se décalcifient [110, 113, 114, 115].

L'intensité de l'attaque acide dépend de plusieurs paramètres chimiques dont les principaux sont :

- le type d'acide (fort ou faible), la dissociation en solution étant alors totale ou partielle ;
- la constante de dissociation de l'acide s'il s'agit d'un acide faible ;
- la concentration de l'acide en solution ;
- le pH de la solution, dépendant des paramètres précédents mais aussi de l'ajout éventuel d'une base pour modifier le pH initial de la solution (cet ajout modifie la quantité d'acide disponible pour la réaction) ;
- la solubilité des sels formés ;
- la nature chimique de la base, à savoir le liant.

#### **I.8.7.1) Sources des acides :**

Les milieux acides les plus fréquents sont :

- Les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, où le pH peut s'abaisser jusqu'à 4;
- Les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agroalimentaires ;
- Les réseaux d'égouts : l'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation des produits soufrés qui, combiné à l'humidité atmosphérique se condensent sous forme d'acide sulfurique qui va attaquer le béton ;
- Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4.0 et 4.5, peuvent provoquer la dégradation de la surface exposée du béton.

#### **I.8.7.2) Mécanisme d'attaque :**

En général, on peut établir qu'un acide est d'autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles.

L'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) est relativement inoffensif, car les sulfates de calcium sont difficilement solubles dans l'eau. Mais les ions de sulfates jouent en l'occurrence un rôle nuisible pour le béton (gonflement dû aux sulfates).



L'acide sulfurique donc réagit avec la chaux libre dans le béton et forme du gypse. Cette réaction est associée à une augmentation du volume du béton. Une action bien plus destructive est la réaction entre l'aluminate de calcium et les cristaux formés de gypse. Ces deux produits forment l'ettringite ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) moins soluble de produits de réaction.

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car le sel correspondant (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau.



Les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium. Ils attaquent également les autres composants de la pâte de ciment durcie, en formant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice).

### **I.8.7.3) Résistance des BAP aux acides :**

A partir d'un nombre très limité d'expérience sur l'étude de comportement des BAP dans les milieux acides, le RILEM [116] évoque les remarques suivantes :

- Dans l'acide sulfurique, l'étude expérimentale a montré que l'utilisation d'une addition de cendre volante finement broyée dans les formulations des BAP entraîne une augmentation du taux de dégradation. Cependant, le filler calcaire diminue la perte de masse ;
- Dans l'acide acétique et lactique, l'utilisation des cendres volantes ou de filler calcaire conduit à une réduction de la perte en masse et une meilleure à la résistance à la compression ;
- L'attaque acide des BAP semble être similaire à celle du BOV.

Une étude antérieure a été réalisée par Boel et al. [117] sur une comparaison entre des BAP à base de filler calcaire et des BOV. Des échantillons de BAP et de BOV ont été immergés dans les solutions d'acide sulfurique, d'acide lactique et d'acide acétique. Ces auteurs montrent que dans les solutions d'acide lactique et d'acide acétique, les différentes compositions des BAP présentent une augmentation rapide de la perte en masse par rapport au BOV. Cependant dans la solution d'acide sulfurique, le BAP résiste mieux par rapport au BOV.

Bassouni et Nehdi [118] ont étudié l'influence des additions binaires et ternaires sur la résistance des BAP dans un milieu d'acide sulfurique (Figure 0-22). Ils ont observé que le type d'addition minérale dans les BAP influe considérablement sur leurs pertes de masses. Le BAP à base d'une addition binaire (5% de fumée de silice + 45% de laitier) présentent une perte de masse plus élevée

par rapport aux BAP contenant des ternaires. Les échantillons des BAP formulés avec une addition ternaire (15% filler calcaire + 20% laitier + 15% cendre volante) ont montré de meilleures performances en terme de ralentissement de la dégradation.

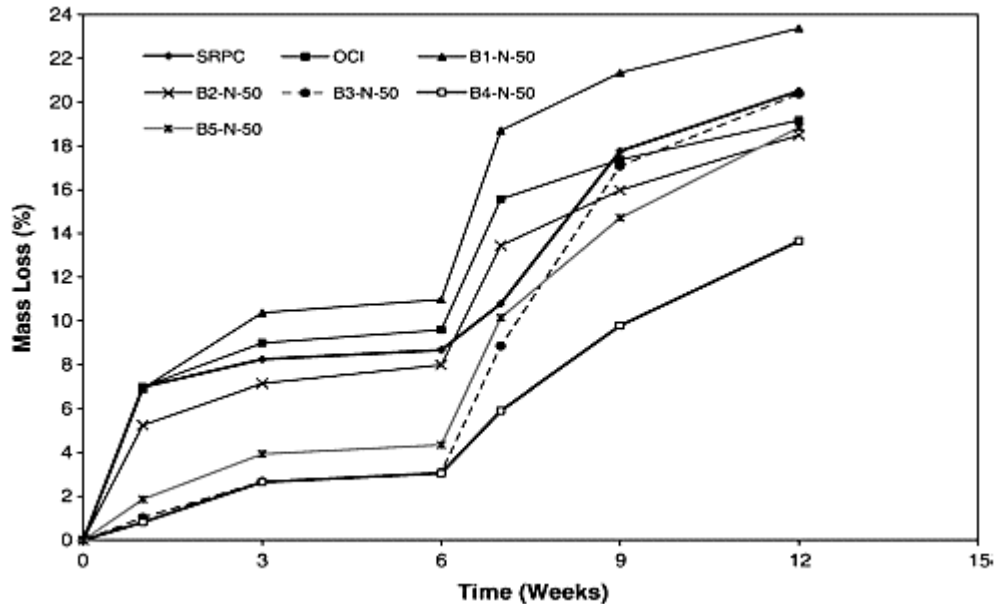


Figure 0-22 - Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans la solution d'acide sulfurique [118].

Bassouni et al. [119] rapportent d'autres résultats sur des BAP composés de filler calcaire, de filler calcaire avec une grande finesse et d'une addition binaire (filler calcaire + filler calcaire d'une finesse importante) (Figure 0-23). Selon ces auteurs Le BAP à base de filler calcaire montre des faibles pertes en masse par rapport au BAP avec le filler de grande finesse. L'addition binaire a provoqué une importante perte de masse. Les auteurs ont remarqué également que la perte de masse est proportionnelle à l'augmentation du pourcentage de filler calcaire dans l'addition binaire et que la finesse élevée des fillers calcaires accélère la cinétique de la perte de masse des échantillons de BAP immergés dans la solution d'acide.

Dans cette étude les auteurs ont confectionné une première série des BAP avec granulats siliceux et une deuxième série des BAP avec granulats calcaires. Les résultats de la variation de la masse après immersion dans la solution acide sont illustrés dans les Figure 0-23 et 0-24 respectivement pour la première et la deuxième série des BAP. Ils ont remarqué que les BAP avec granulats calcaires ont une perte en masse inférieure à ceux avec granulats siliceux. Ce qui explique l'influence de la nature des matériaux constituant les BAP. Les granulats calcaires sont riches en carbonate de calcium, ce dernier réagit rapidement avec le milieu acide et consomme la solution acide proche de la surface

du béton, cette réaction conduit à la création d'une couche tampon de faible concentration en acide et de pH supérieur à celui de la solution acide d'exposition. En outre, le calcaire permet de stabiliser les C-S-H vulnérables dans la pâte de ciment [119]

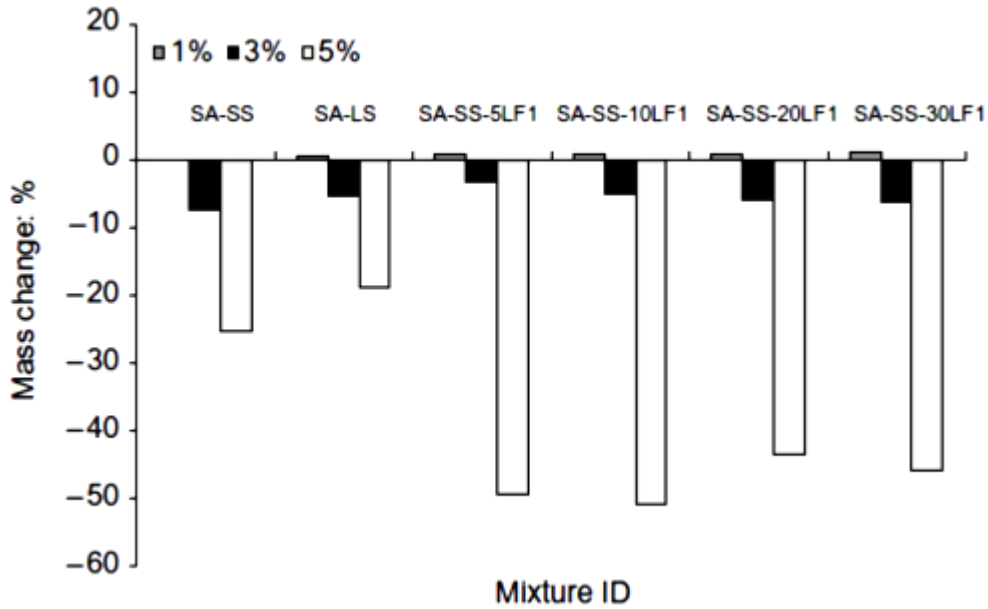


Figure 0-23 - Variation de la masse des BAP avec granulats siliceux après 12 semaines d'immersion dans 1, 3 et 5% d'acide sulfurique [119].

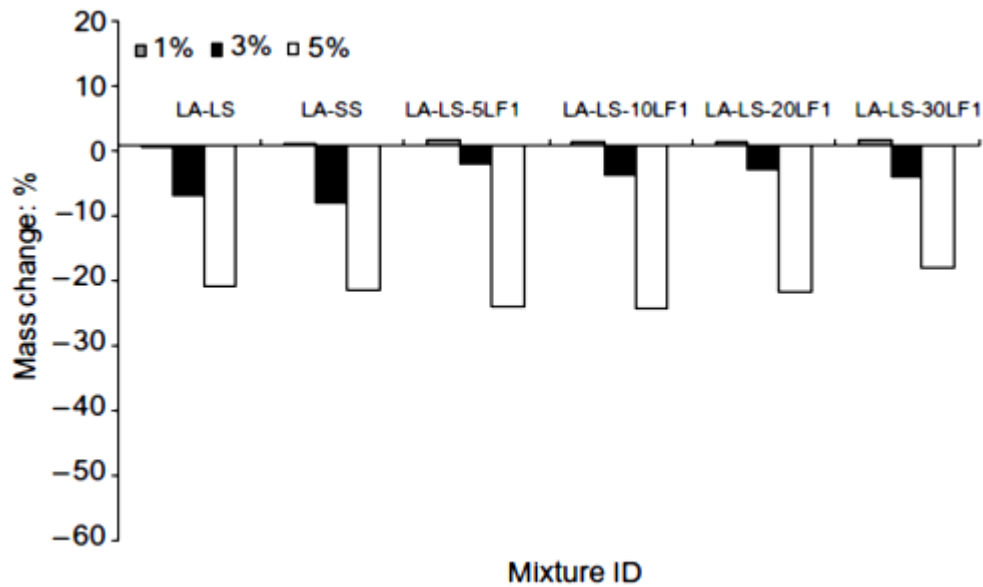


Figure 0-24 - Variation de la masse des BAP avec granulats calcaires après 12 semaines d'immersion dans 1, 3 et 5% d'acide sulfurique [119].

Belaribi et al. [120] ont étudié le comportement du BAP vis-à-vis des attaques acides. Ils ont utilisé trois types des acides ; acide chlorhydrique, acide sulfurique et acide acétique, Ils ont rapporté que:

- L'attaque des acides inorganiques (acide chlorhydrique et acide sulfurique) est plus agressive que celle de l'acide organique (acide acétique), la dégradation est liée non seulement à la concentration des acides mais aussi à leurs solubilités ;
- Si le milieu du BAP est fortement agressif avec une source de renouvellement de l'acide chlorhydrique, l'attaque serait très nuisible ;
- Plus la concentration des acides est faible moins les solutions sont agressives ;
- A même concentration le BAP immergé dans l'acide acétique développe une meilleure résistance par rapport aux autres BAP.

Boel et al. [121] ont fait une analyse de la microstructure du matériau et ont conclu que la perte en masse du BAP et du béton traditionnel présente une bonne corrélation avec la porosité du matériau comme le montre la Figure 0-25

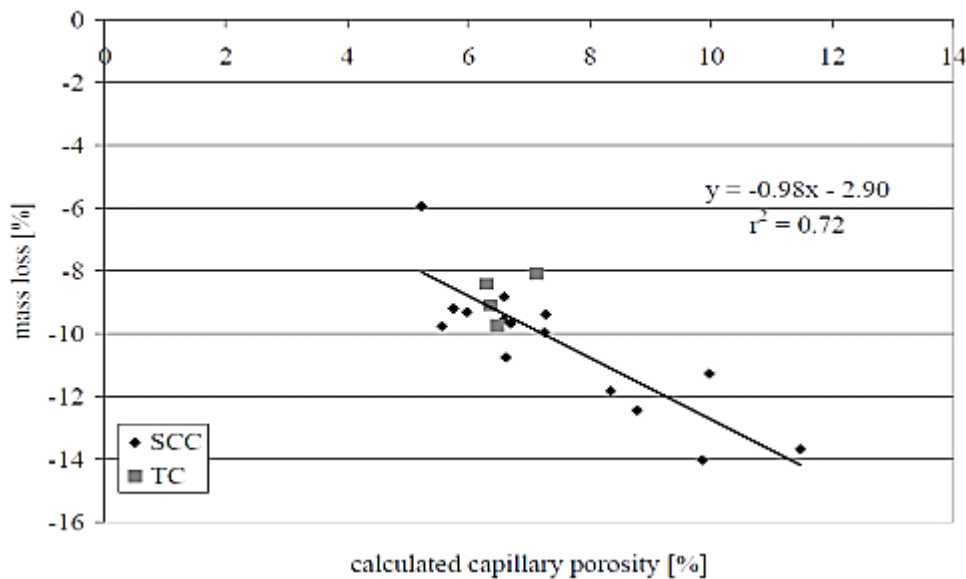


Figure 0-25 - Perte en masse en fonction de la porosité capillaire pour un BAP et BV exposé à la solution d'acide [121].

Ueda et al. [122] ont mené une investigation sur la résistance du BAP dans les solutions acides avec différentes valeurs de pH, des cycles de mouillage et séchage ont été appliqués. Les échantillons immergés dans la solution de pH égale à 3 ont montrés des dépôts de couleur marron léger dû à la concentration des ions de fer sur la surface des éprouvettes, ce phénomène conduit à une baisse de pH.

Assié et al. [123], ont réalisé un test accéléré de lessivage au nitrate d'ammonium d'un BAP et un béton vibré. Les résultats de la dégradation par lessivage montrent qu'il n'existe pas de différence significative entre BAP et BV que ce soit pour les bétons de bâtiment comme pour les bétons d'ouvrage ou ceux à hautes performances.

### **I.8.8) Carbonatation :**

#### **I.8.8.1) Définition :**

Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) présent dans l'air pénètre dans le béton par le réseau poreux ou par les fissures. En présence d'eau au sein du béton il provoque une réaction chimique appelée carbonatation avec la pâte de ciment hydratée. Cette réaction transforme les produits d'hydratation, notamment la portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> en carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub>. Ce processus, nommé carbonatation, engendre la réduction du pH de la solution interstitielle du matériau d'une valeur avoisinant 13 à environ 9. Non protégées par le milieu initialement très basique, les armatures s'exposent à la corrosion qui provoque des désordres dans la construction par gonflement et fissuration [164].

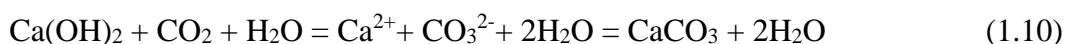
Cette carbonatation a pour conséquence une modification lente de la structure du matériau et un changement de son comportement.

La carbonatation est à l'origine de deux principaux effets qui s'avèrent antagonistes [165] :

- elle est bénéfique en améliorant la résistance mécanique et la résistance aux eaux agressives,
- elle est néfaste en réduisant la protection chimique des armatures.

#### **I.8.8.2) Mécanisme de la carbonatation :**

Le dioxyde de carbone dissout dans la solution interstitielle du béton peut réagir avec les produits d'hydratation du clinker que sont la portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> et les silicates de calcium hydratés, pour former du carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub>. La dégradation proviendrait essentiellement de la réaction avec la portlandite [92, 93, 94] selon l'équation bilan suivante :



Plusieurs équilibres chimiques et leurs constantes interviennent dans le processus de carbonatation. En effet, la réaction a lieu en phase liquide, en solution aqueuse, mais fait intervenir un gaz et un composé solide. La réaction de carbonatation nécessite ainsi le passage du CO<sub>2</sub> en phase aqueuse (1.11), des réactions acido-basiques impliquant les ions carbonates (1.12 et 1.13) et l'eau (1.14), la dissolution de la portlandite (1.15), et la précipitation du carbonate de calcium (1.16).



Ce mécanisme théorique de la réaction de carbonatation a aussi été étudié de manière expérimentale, et les constantes d'équilibre des réactions intermédiaires sont connues. Les deux étapes déterminantes du point de vue de la cinétique semblent être la dissociation des dihydrogénocarbonates  $\text{H}_2\text{CO}_3$  et la dissolution de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Les grandeurs qui peuvent donc permettre de caractériser l'évolution de la réaction, en fonction du temps ou de la profondeur de pénétration, sont la concentration en portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et le pH de la solution interstitielle du béton.

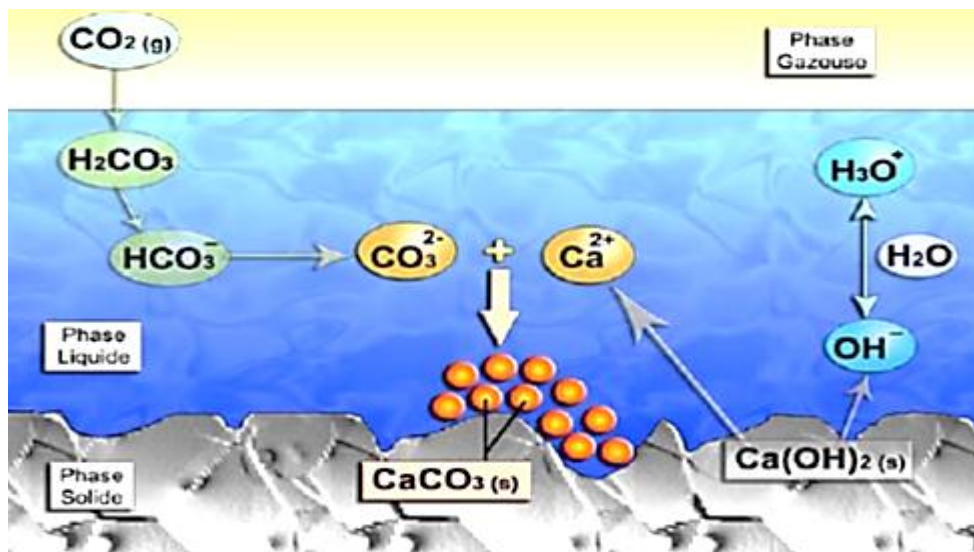


Figure 0-26 - Mécanisme de carbonatation de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

### I.8.8.3) Conséquences de la carbonatation sur les matériaux cimentaires :

#### I.8.7.3.1) Le retrait de carbonatation :

La carbonatation entraîne une augmentation de volume des solides de 3 % à 19 % selon que le produit de la réaction est de l'aragonite, de la calcite ou de la vaterite. Il paraît donc à première vue curieux que cette réaction entraîne un retrait et non un gonflement, pourtant toutes les expériences

mettent en évidence un retrait. Les causes à l'origine de ce phénomène sont variées et complexes. Différentes hypothèses ont été émises pour expliquer ce retrait, la plus connue est celle de Powers [166]. Selon lui, la portlandite présente dans la matrice cimentaire ne se dégrade pas sur place. Il émet l'hypothèse que dans la pâte de ciment pure, les cristaux de portlandite commencent par se dissoudre dans l'eau pure, sous l'effet de contraintes hydrauliques, la portlandite se déplace et se dépose dans les espaces partiellement désaturés du milieu poreux. C'est dans ces vides que la portlandite dissoute pourra ensuite se dégrader sous l'action du dioxyde de carbone et prendre une expansion libre sans exercer de contraintes dans la pâte. Un retrait aura lieu du fait des espaces libres laissés par le transport de la portlandite [167]. Le retrait de carbonatation est probablement provoqué par la dissolution des cristaux de  $\text{Ca(OH)}_2$ , alors que ceux-ci sont soumis à une contrainte de compression. Le retrait de carbonatation, à humidité constante, est proportionnel à l'augmentation temporaire de compressibilité de la pâte de ciment durcie résultant du transfert de l'hydroxyde de calcium des régions sous contrainte et du dépôt de carbonate de calcium dans des régions où celui-ci n'est pas sous contrainte [168]. C'est donc le réarrangement de la microstructure qui a occasionné le retrait [94].

#### **I.8.7.3.2) Evolution de la microstructure :**

La carbonatation n'est pas nocive pour le béton dans un premier temps mais protège le béton en modifiant sa structure poreuse. La distribution des tailles de pores s'en trouve modifiée et on enregistre une réduction du volume poreux et de la surface spécifique du matériau. Le  $\text{CaCO}_3$  formé obture certains pores, donc la porosité totale diminue et le mode poreux des capillaires est déplacé vers les plus grands rayons (la porosité capillaire augmente). Les plus gros pores ne semblent pas être affectés, mais le volume des plus petits est réduit d'un facteur 2 [169].

#### **I.8.7.3.3) Evolution des paramètres mécaniques :**

La réduction de porosité induite par la carbonatation entraîne une amélioration des performances mécaniques du matériau. La calcite formée consolide la microstructure, le carbonate de calcium étant reconnu comme un excellent liant [94]. Lea [170] démontre que les résistances à la compression et à la flexion de bétons carbonatés à base de CEM I peuvent augmenter jusqu'à 30 %. En effet, il est souvent mentionné dans la littérature scientifique que la résistance mécanique et le module d'élasticité augmentent après carbonatation dans le cas des formulations courantes [164] [171].

Contrairement aux matériaux à base de CEM I ou même CEM II, De Ceuke [172] note que les bétons contenant des ciments aux laitiers de hauts fourneaux voient leurs caractéristiques

mécaniques se détériorer après carbonatation. Ceci est d'ailleurs à relier à l'augmentation de leur porosité après carbonatation.

#### **I.8.7.3.4) Les fissurations :**

L'état de fissuration du béton évolue lui aussi au cours du temps du fait des cycles thermiques ainsi que des sollicitations mécaniques, statiques ou dynamiques, subies par les ouvrages. L'influence de l'état de fissuration n'est pas simple : lorsqu'une fissure débouche perpendiculairement à la surface d'une armature, le dioxyde de carbone et l'eau peuvent y parvenir, provoquer sa dépassivation et amorcer sa corrosion. Cependant, l'accumulation de carbonate de calcium sur les parois de la fissure, tend à colmater celle-ci et permet une réalcalinisation de l'électrolyte en contact avec l'acier, par diffusion d'espèces alcalines (KOH, NaOH, CH) en provenance du béton. La formation de calcite par dégradation de la portlandite peut avoir un effet bénéfique sur les fissurations du béton d'enrobage. Medgyesi [173] souligne à ce sujet que seules les fissures présentant une ouverture supérieure à 0,2 mm sont nocives pour la stabilité des armatures. Pour des fissures d'ouvertures inférieures, le dépôt de carbonate à leur surface est suffisant pour empêcher le contact eau et oxygène avec les aciers, celui-ci jouant le rôle d'un film protecteur.

#### **I.8.8.4) Paramètres affectant la carbonatation dans le béton :**

La profondeur de carbonatation  $x$  est généralement estimée en fonction du temps ( $t$ ) selon la relation (1.17).

$$x = k\sqrt{t} \quad (1.17)$$

Le coefficient  $k$  dépend d'un ensemble de facteurs liés aux caractéristiques du béton (E/C, dosage en liant, nature du liant.) et aux conditions environnementales (pression, température, hygrométrie...) [95, 96]. Dans ce qui suit nous allons présenter les paramètres les plus importants influençant la carbonatation.

##### **I.8.8.4.1) Influence de la Formulation :**

###### **a) Rapport E/C ou Eau/Liant :**

Le rapport E/C a une importance considérable sur l'interconnexion du réseau poreux et par conséquent sur la perméabilité et sur la diffusivité des espèces gazeuses ou ioniques au sein du béton.

De nombreuses recherches ont été réalisées pour étudier l'influence du rapport E/C sur la vitesse de carbonatation. La profondeur de carbonatation double lorsque le rapport E/C passe de 0,5 à 0,8

[95]. D'autres travaux ont montré que la carbonatation est souvent fortement réduite pour un rapport E/C inférieur à 0,4. Une réduction de la profondeur de carbonatation de l'ordre de 50% a été observée lors d'une réduction de ce rapport de 0,6 à 0,4 [97]). D'autres études ont montré que pour un même ciment, la carbonatation augmente dans la plupart des cas avec le rapport E/C [96].

Des chercheurs [98, 99,100] ont montré que la profondeur de carbonatation augmente avec le rapport E/C et croît linéairement avec  $\sqrt{t}$  (Figure 0-27).

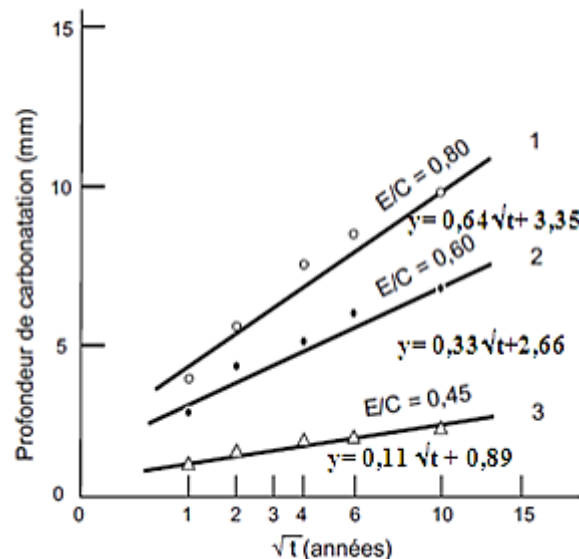


Figure 0-27 - Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée du temps [101].

#### b) Type de ciment :

Il ressort de plusieurs études antérieures que les bétons de ciment à base de laitier de haut fourneau se carbonatent beaucoup plus vite que les bétons de ciment Portland pour un rapport E/C identique. Il est à signaler également qu'aux faibles rapports E/C, seuls les bétons de ciment, à base de laitier de haut fourneau se carbonatent [95]. L'effet des laitiers est défavorable à court terme. Mais après environ 5 ans, l'ajout des laitiers avec une finesse supérieure à celle du clinker, peut diminuer la vitesse de carbonatation [99].

D'autres essais de carbonatation (accélérée et naturelle) montrent qu'une augmentation de la teneur en alcalins  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  noté R (exprimés en oxyde  $\text{R}_2\text{O}$ ) contenus dans le ciment entraîne une carbonatation plus importante du béton. Une augmentation de 0,6% en alcalins ( $\text{R}_2\text{O}$ ) est équivalente, du point de vue de la carbonatation, à une augmentation du rapport E/C de 0,1 [95, 99].

La profondeur de carbonatation est plus faible dans le béton à base de CEMI que celui formulé avec le CEMIII [96].

### c) Dosage en ciment :

Il a été constaté qu'une augmentation de dosage en ciment réduit la profondeur de carbonatation (Figure 0-28). Ceci a été attribué à la diminution de la porosité du béton qui entraîne la réduction du phénomène de diffusion.

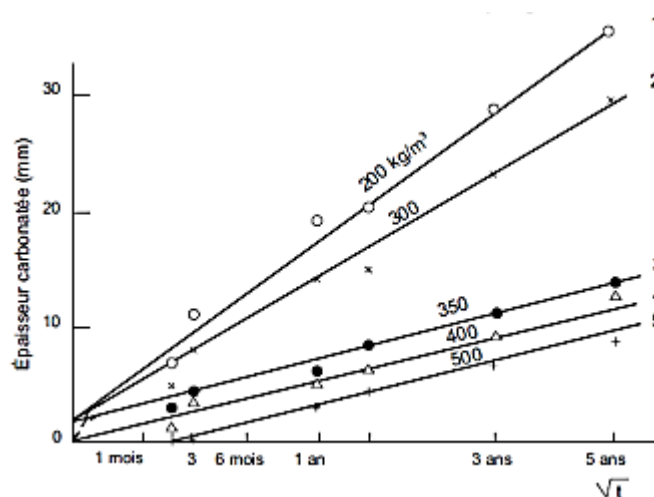


Figure 0-28 - Relation entre épaisseur carbonatée et dosage en ciment [101].

### d) Additions minérales :

Certaines études mettent en garde contre l'utilisation de quantités d'additions importantes, en particulier des teneurs du liant en cendres volantes supérieures à 30 % [102] et en laitiers supérieures à 50 %. L'influence négative de ces additions sur la résistance à la carbonatation a été vérifiée par d'autres études, mais il a été montré que son amplitude pouvait dépendre fortement de la durée de cure humide. Les fillers calcaires et siliceux semblent avoir une influence positive dans le cas d'une conservation humide (28 jours), et une influence négative dans le cas d'une conservation sèche trop prématuré, c'est-à-dire un démoulage à environ 30 % de la résistance moyenne à 28 jours [103].

Il a été observé que la profondeur de carbonatation diminue quand le taux de substitution des granulats par des additions telles que la fumée de silice ou les cendres volantes augmente, mais qu'elle augmente avec le taux de substitution du ciment [104]. La profondeur de carbonatation dépend aussi de la nature de l'addition, en particulier de la teneur des cendres volantes en CaO. Plus cette teneur est élevée, moins la profondeur de carbonatation est importante.

**d) La cure :**

Une étude [99] a signalé que la profondeur de carbonatation diminue considérablement avec la prolongation de la durée de cure du béton. Ainsi, la profondeur est réduite d'environ 40 % la période de cure a été prolongé d'un à trois jours.

En effet, une cure humide permet une hydratation plus complète du béton d'enrobage, donc la fermeture de la porosité et la diminution du coefficient de diffusion du  $\text{CO}_2$  [100].

En outre, l'augmentation de la période de cure dans l'eau améliore la résistance à la compression du béton et par conséquent engendre une diminution du taux de carbonatation [95, 96].

**I.8.8.4.2) Influence de l'humidité :**

L'humidité relative interne du béton est un paramètre très important. Suivant la littérature, il apparaît que, si l'humidité est plus faible que 50%, le  $\text{CO}_2$  ne peut pas être dissous complètement dû à la quantité d'eau insuffisante dans les pores. Si l'humidité est plus grande que 70%, l'eau à l'intérieur des pores inhibe la diffusion de  $\text{CO}_2$ . Ce qui donne un taux de carbonatation très lent et parfois nul, puisque le  $\text{CO}_2$  ne peut pas pénétrer facilement dans les pores saturés. Entre 50% et 70% d'humidité relative, le degré de carbonatation est maximal et les  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  réagissent avec  $\text{CO}_2$  dans une réaction de neutralisation [97,99,105] (Figure 0-29). Dans cet intervalle l'humidité est plus favorable pour la carbonatation.

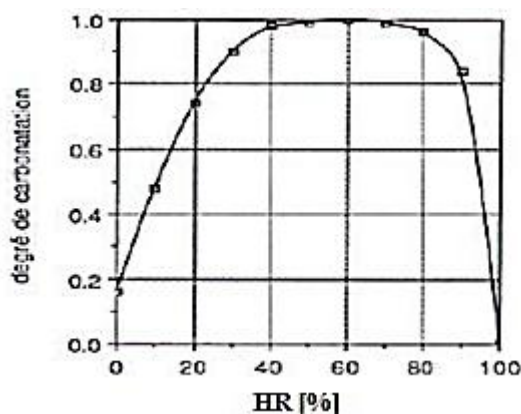


Figure 0-29 - Degré de carbonatation en fonction de l'humidité relative à 25° pour béton durci [99].

Il apparaît clairement que dans un environnement sec, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre de  $\text{CO}_2$ . Par contre, dans un environnement très humide, le béton est saturé ce qui ralentit la diffusion de ce gaz.

#### I.8.8.4.3) Influence de La concentration de CO<sub>2</sub> :

Les rejets de CO<sub>2</sub> viennent notamment des activités humaines : transports, chauffage et industrie. Quand le pourcentage de dioxyde du carbone dans l'environnement est faible, les réactions de carbonatation sont lentes comparativement à celles réalisées dans les environnements riches en CO<sub>2</sub>. Cet effet de concentration est la principale cause des taux de carbonatation faibles observés dans les environnements naturels [97] et de l'accroissement du taux de carbonatation dans les endroits où la teneur en CO<sub>2</sub> peut être relativement élevée : garages, tunnels routiers, cheminées,...etc [99].

#### I.8.8.4.4) Influence de L'état de la surface :

Un autre facteur externe qui affecte les taux de la carbonatation est la texture et la finition de la surface du béton. Finir les surfaces du béton, consiste à augmenter la densité de la pâte du ciment à la surface [97]. Augmenter la densité du béton à la surface, c'est diminuer la perméabilité, et par conséquent la carbonatation. Les autres techniques de finition, telles que l'usage des peintures ou les enduits étanches, baissent aussi le taux de carbonatation en diminuant la capacité de dioxyde du carbone à atteindre le béton de cœur [97]. Pour des surfaces fissurées, plus est la largeur de la fissure plus est la pénétration de la carbonatation.

#### I.8.8.4.5) Influence de porosité :

La profondeur de carbonatation tend à augmenter quand la porosité du béton augmente. Des essais de porosimétrie au mercure ont été effectués après carbonatation et montrent que les produits solides de la carbonatation suffisent à combler certains pores. Par conséquent, la carbonatation modifie de façon complexe la structure poreuse de la pâte du béton, avec l'atténuation de certains modes poreux et la création de nouveaux modes [100].

#### I.8.8.4.6) Influence de Température :

Chaussadent [95] émet l'hypothèse qu'une augmentation de la température diminue la vitesse de carbonatation des bétons. Pour ceci, il s'appuie sur la solubilité du dioxyde de carbone dans l'eau et sur des expérimentations réalisées par Dheilily et Tudo [106] selon lesquelles la portlandite se dégrade plus rapidement lorsque la température diminue (Figure 0-30).

A contrario, de nombreux auteurs (Smith et Evans [107], Rahman et Glasser [108], Neville [109]) constatent qu'une élévation de la température accélère le processus de carbonatation. L'échauffement produit favoriserait le séchage des pores, donc faciliterait l'accès du dioxyde de carbone gazeux dans la matrice cimentaire. Thiery [94] trouve que l'effet de la température sur la

vitesse de carbonatation est assez incertain, donc il ne tient pas compte de ce paramètre dans sa modélisation.

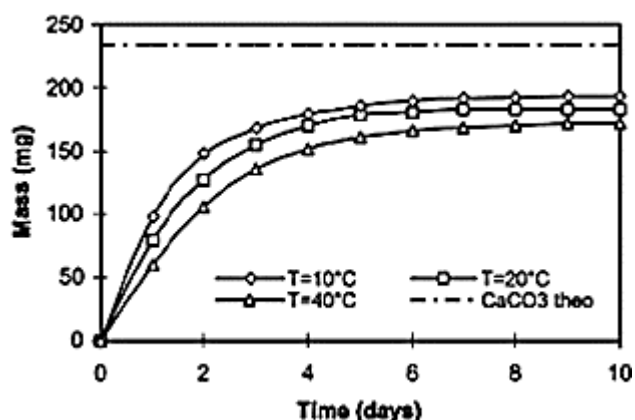


Figure 0-30 - Formation de la calcite lors d'une carbonatation accélérée de la portlandite ( $\text{CO}_2=50\%$ ), en fonction de la température [106].

### I.8.9) Corrosion des armatures :

#### I.8.9.1) Contexte de la dégradation des armatures :

Le béton armé est un matériau de construction qui associe le béton avec des armatures métalliques, le béton d'enrobage fournissant une barrière physique et une protection chimique due à son alcalinité [174], [175]. A la surface d'un acier enrobé par la pâte de ciment hydratée, il se forme un film passif formé d'une solution solide de magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ou d'un film  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$  à structure bien fermée d'épaisseur  $10^{-3}$  à  $10^{-1}\mu\text{m}$  qui protège l'acier. Cette protection est efficace pour une forte valeur du pH ( $\text{pH} > 13$ ) [176].

Le maintien de cette passivation est conditionné par un pH suffisamment élevé de la solution interstitielle en contact avec la couche passivée. Lorsqu'un front de pH plus faible atteint les alentours de la surface des armatures, la couche protectrice disparaît et la corrosion peut se produire, à condition que l'oxygène et l'humidité nécessaire à la corrosion soient présents. Pour cette raison, il est important de connaître la profondeur de carbonatation et plus particulièrement de savoir si le front de carbonatation atteint la surface des aciers enrobés.

#### I.8.9.2) Les phases de corrosion (incubation et propagation) :

Les manifestations visibles de la corrosion d'un ouvrage (tâches de rouilles, fissurations, armatures apparentes corrodées, éclatements de béton) sont les conséquences de réactions chimiques endogènes qui ont commencé bien avant que les désordres ne soient apparents. On distingue

schématiquement et successivement deux phases dans le développement de la corrosion (figure 0-31).

**a) Période d’amorçage :**

Dite aussi période dormante, d’incubation ou d’initiation, durant laquelle la stabilité du système constitué par l’armature métallique noyée dans la matrice cimentaire du béton décroît progressivement et durant laquelle se créent les conditions favorables au développement de la corrosion. L’amorçage de la corrosion peut être provoqué par la carbonatation du béton d’enrobage.

**b) Période de propagation :**

C’est une période durant laquelle on observe, en premier lieu, la formation de produits issus de la corrosion de l’armature. Les phénomènes électrochimiques de corrosion conduisent à la formation d’oxydes et d’hydroxydes de volumes supérieurs à celui de l’acier sain. Ces produits entraînent des contraintes qui peuvent provoquer une fissuration parallèle aux aciers qui diminue l’adhérence acier/béton, ainsi que l’éclatement du béton d’enrobage (formation d’épaufrures). Les désordres créés nuisent à l’aspect esthétique des ouvrages, mais contribuent aussi à affaiblir les résistances mécaniques. La corrosion conduit aussi à une diminution de la section des armatures, généralement homogène dans le cas de la carbonatation. On considère généralement que la capacité fonctionnelle de l’ouvrage est entamée dès la destruction du béton d’enrobage, même si la réduction de la section des armatures ne contribue pas encore à produire des défauts structurels.

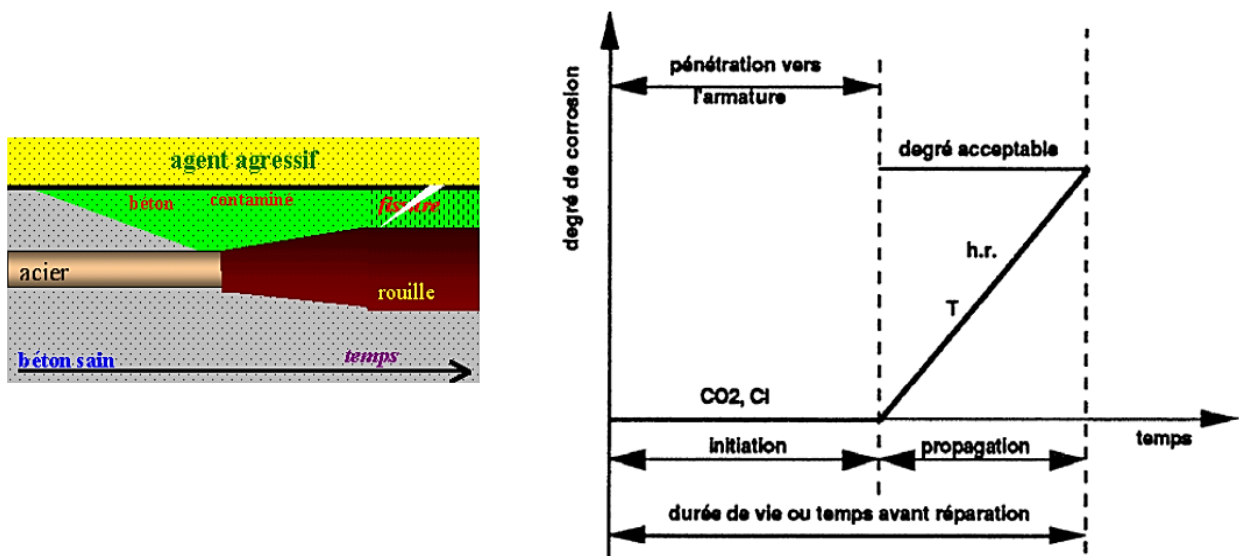


Figure 0-31 Schéma de dégradation des armatures au cours du temps, d’après Tuutti (1982) [177].

### I.9) Synthèse bibliographique :

Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives aux BAP, bétons de fabrication récente, par rapport à celle des bétons traditionnels, que l'on peut considérer être connue. L'étude bibliographique menée est consacrée la présentation des propriétés physiques, mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçants. Dans notre travail on se penchera essentiellement sur l'influence de l'addition minérale (poudre marbre) typiquement locales sur le comportement à l'état frais et à l'état durci des BAP et de durabilité. On s'intéresse à la durabilité des BAP surtout vis-à-vis les agressions chimiques. Deux attaques chimiques seront considérées dans cette étude : l'attaque par les sulfates ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et l'attaque par les acides ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{HCL}$ ) et carbonatation accélérée.

Le BAP est un béton très fluide, dont la spécificité est de se mettre en place sans vibration, sous le seul effet de son poids propre. Son utilisation contribue à améliorer les conditions de travail sur chantier. Les BAP se composent d'un grand volume de pâte riche en fines associé à une faible proportion de granulats dont la fluidité est améliorée par l'utilisation de superplastifiants et éventuellement d'agent de viscosité. A l'état durci, les propriétés mécaniques et physico-chimiques sont influencées par la composition. L'ajout de l'addition minérale améliore la distribution des tailles de pores ce qui conduit à une densification de la microstructure.

A travers les études menées sur la durabilité des bétons autoplaçants, nous avons constaté qu'il existe une relation entre la composition du BAP (type de ciment, type d'addition minérale dans la pâte de ciment), les propriétés de transfert (perméabilité, diffusion, absorption) et la résistance chimique (carbonatation, attaque sulfatique et attaque acide) de ces matériaux cimentaire.

Nous nous sommes intéressés à étudier l'effet de la poudre marbre sur les performances physico-mécaniques et la durabilité des BAP surtout vis-à-vis les agressions chimiques tels que les attaques des sulfates et les attaques des acides et carbonatation accélérée.

## Chapitre II :Caractérisation des matériaux, formulation et méthodes d'essais

### II.1) Introduction :

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la présentation des matériaux utilisés durant cette étude ainsi que la méthode de formulation adoptée du mortier et du béton autoplaçants. Ensuite, on présente les méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre recherche.

Le MAP est caractérisé à l'état frais par les essais spécifiques suivants :

- Essai d'étalement au Mini-Cône
- Essai de l'entonnoir en V (V-funnel)

Le BAP est caractérisé à l'état frais par les essais spécifiques suivants :

- Essai d'étalement (Flow test)
- Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)
- Essai de la couronne J (J-Ring test)
- Essais de la boîte en L (L-Box test)
- Essai de stabilité au tamis (Résistance à la ségrégation)

A l'état durci nous avons évalué la résistance à la compression et la résistance à la flexion aux différents âges. En ce qui concerne l'étude de la durabilité, nous avons réalisé les essais suivants :

- L'absorption d'eau par capillarité
- L'absorption d'eau par immersion totale
- La résistance aux attaques de sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )
- La résistance aux agressions acides (HCl et  $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
- carbonatation accélérée.

En parallèle, des analyses de DRX (Diffraction de rayons X) ont été effectuées pour caractériser la microstructure des bétons exposés aux agressions chimiques. Un examen visuel a aussi, été réalisé afin de contrôler l'aspect extérieur des échantillons après attaque chimique.

Dans ce chapitre, nous commencerons par présenter les matériaux qui ont été utilisés durant cette étude. Ensuite, nous décrivons la méthode de formulation et nous présentons les différents essais réalisés au cours notre étude.

## II.2) Caractéristiques des matériaux utilisés :

### II.2.1) Ciment (CPA) :

Le type de ciment utilisé dans cette étude est le CPA CEM I 42.5, ce ciment est un ciment Portland ordinaire dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa. Les caractéristiques chimiques, minéralogiques et physiques de ce ciment sont présentées dans les tableaux II.1 et II.2

Tableau 0-1 - Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CPA CEM I 42.5.

Composition chimique (%)									
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	PAF
63.47	20.14	3.71	4.74	2.12	2.67	0.69	0.47	0.21	1.72
Composition minéralogique (%)									
C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S		C <sub>3</sub> A		C <sub>4</sub> AF			
66		14		1.70		8.30			

Tableau 0-2 - Propriétés physiques du ciment CPA CEM I 42.5.

Paramètre	Valeur
Densité spécifique	3.10
Finesse (cm <sup>2</sup> /g)	3300
Début de prise (minutes)	170
Fin de prise (minutes)	255

### II.2.2) Poudre de marbre (PM) :

L'ajout utilisé dans cette étude est la poudre de marbre. C'est un déchet résultant de coupage, façonnage et lustration des pierres de marbres. Cette poudre a été fournie par la société MCA (Marbre Carrelage et Agglo-marbre installée à Bordj Bou Arreridj). Les propriétés physico-chimiques de la poudre de marbre sont mentionnées le tableau II.3.

Tableau 0-3 - Propriétés physico-chimique de la poudre de marbre.

Élément	Pourcentage%
SiO <sub>2</sub>	0,42
CaO	56,01
MgO	0,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06
SO <sub>3</sub>	0,01
K <sub>2</sub> O	0,01
TiO <sub>2</sub>	0,01
Na <sub>2</sub> O	0,43
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03
Perte au feu	42,78
Densité spécifique	2,7
Finesse (cm <sup>2</sup> /g)	3600

Les résultats de l'analyse minéralogique de la poudre de marbre, qui sont montres sur la Figure 0-1, indiquent que cette poudre est constituée principalement de calcite avec quelques traces de quartz et de dolomite [4].

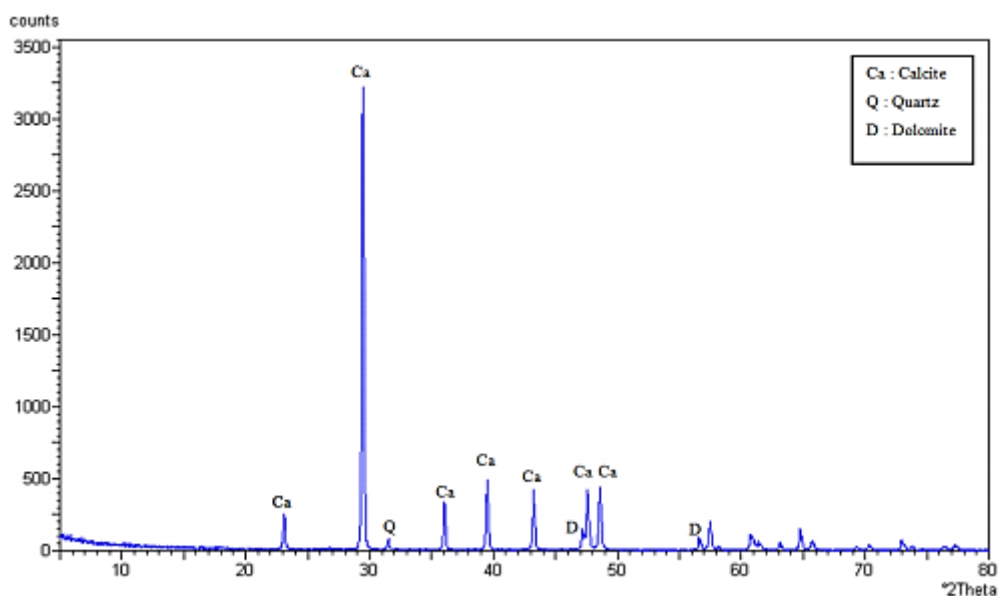


Figure 0-1 - Analyse minéralogique de la poudre de marbre [4].

### II.2.3) Granulats :

Deux granulats sont utilisés un sable et un gravillon. Le sable utilisé est un sable roulé qui provient de la rivière de M'zi wilaya de Laghouat. Les caractéristiques principales requises

pour un sable à béton sont la propreté, définie par l'essai d'équivalent de sable et l'analyse granulométrique des granulats (Figure 0-2). Le gravillon entrant dans la composition de différents mélanges de BAP est un gravillon concassé d'origine calcaire. Deux classes de gravillon sont utilisées : 3/8 et 8/15. Les propriétés physiques des granulats sont présentées dans le tableau 0-4.

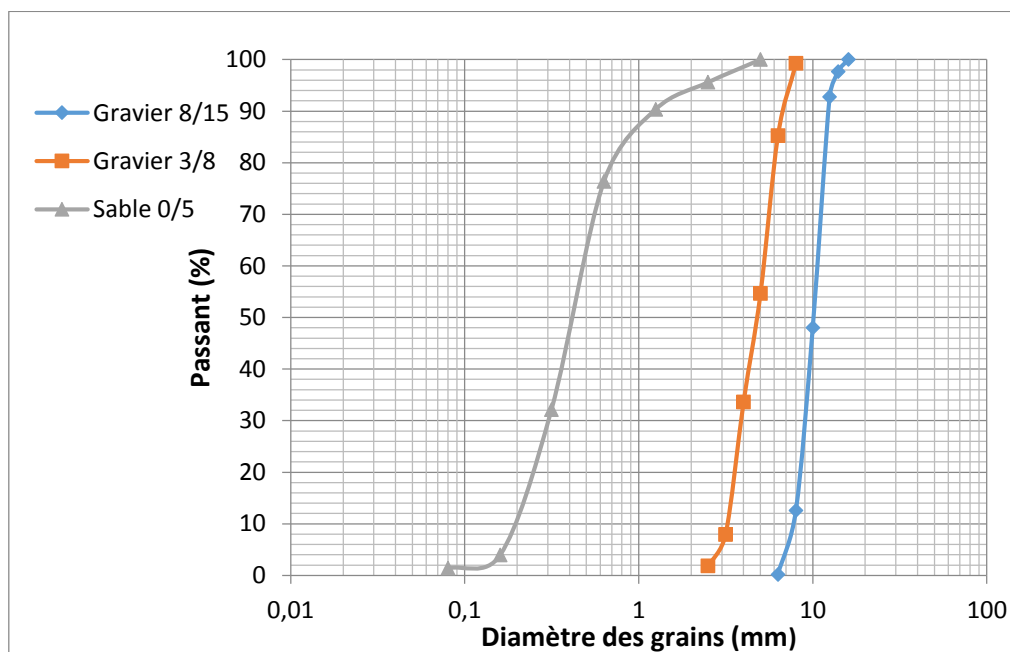


Figure 0-2 - Courbes granulométriques des granulats.

Tableau 0-4 - Propriétés physiques des granulats.

Granulat	Sable 0/5	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Masse volumique Absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2600	2700	2700
Masse volumique Apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1580	1320	1300
Coefficient d'absorption (%)	0.60	1.50	2.30
Dureté du gravier (%)	/	25.50	25
Équivalent du sable avec piston (%)	90	/	/
Équivalent du sable visuel (%)	85	/	/

#### II.2.4) Superplastifiant :

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération fabriqué par la société Granitex et commercialisé sous le nom de MEDAFLOW 30. Il est à base d'éther polycarboxylique modifié. Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique 0.5% à 2%(en extrait sec) du poids de ciment (Voir tableau 0-5.).

Tableau 0-5 - Caractéristiques du superplastifiant.

Forme	Liquide
Couleur	Marron
Extrait sec	30%
Densité	1.07±0.01
PH	6.5
Teneur en chlorure	< 1g/l

#### II.2.4) L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est l'eau du robinet de notre laboratoire exempté d'impuretés.

### II.3) Formulation :

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériaux de la gâchée, c'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.

La formulation que nous avons adoptée est basée sur la formulation proposée par le japonais Okamura et appelée la méthode générale, car elle est simple, et peut produire un BAP de propriétés adéquates à la majorité des applications [11]. Par ailleurs, cette méthode présente l'avantage d'être applicable même en utilisant des matériaux locaux, mais à condition de faire quelques modifications notamment au niveau de la teneur en sable [124].

Le béton autoplaçant est fortement liée à celle du mortier autoplaçant et en suivant les étapes de la méthode générale, la formulation du mortier autoplaçant constitue une étape primordiale en vue de confectionner un BAP.

#### II.3.1) Formulation du mortier autoplaçant :

Dans le BAP, la phase du mortier est une phase très importante car elle fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés requises pour que le mortier puisse être considéré comme autoplaçant, une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statiques et dynamiques.

Du moment que le mortier occupe un volume important dans les BAP (presque 70% du volume du BAP) [125], les résultats d'essais sur le MAP seront concluants et peuvent donner une grande idée sur le comportement rhéologique du BAP.

Selon Domone et Jin [126] les mortiers sont testés pour les raisons suivantes :

- Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominantes.
- 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.

Les mortiers sont testés à travers l'essai d'étalement au mini-cône et l'essai d'écoulement au mini-entonnoir en V. Ces tests ont pour but de déterminer la teneur en eau (rapport Eau/Liant), la teneur en sable (rapport Sable/Mortier) et le dosage en superplastifiant (rapport superplastifiant / Liant) [11, 124,126].

#### **II.3.1.1) Rapport Eau/ Liant (E/L) :**

Nous avons effectué plusieurs essais préliminaires de mesure d'étalement et de temps d'écoulement afin de fixer le rapport eau/liant (E/L). Des études [127] ont montré que le rapport E/C optimum pour produire un BAP est compris dans l'intervalle 0,84 et 1,07 en volume qui correspond à l'intervalle 0,28 et 0,45 en masse. Les rapports E/C au-dessus et en dessous de cet intervalle peuvent causer un blocage ou une ségrégation du mélange.

Les différents essais préliminaires ont montré qu'il faut aller jusqu'au rapport 0,40 afin d'avoir un mortier autoplaçant satisfaisant ayant un étalement supérieur à 270 mm.

Pour tous les essais de mortier nous avons fixé le rapport eau/liant à 0,40.

#### **II.3.1.2) Rapport Sable/Mortier (S/M) :**

L'optimisation du rapport Sable/Mortier consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer par la suite de bonnes caractéristiques du béton autoplaçant à l'état frais et durci. Le principe de la méthode consiste à rechercher la composition optimale pour les rapports Sable/Mortier de 0,6 ; 0,5 et 0,4 tout en faisant varier le rapport superplastifiant/liant (Sp/L).

### II.3.1.3) Variation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L) :

Le rapport SP/L est aussi optimisé dans le mortier. Ce rapport est déterminé comme suit : pour chaque rapport S/M, on fait varier le dosage en SP de 0,6% à 2%. Les rapports optimaux S/M et SP/L sont ceux qui peuvent donner simultanément un bon MAP.

### II.3.1.4) Confection des mortiers :

Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, superplastifiant et eau) ont été calculés d'après l'exemple de composition de mortier donné à l'annexe A.

Aiad et al [128] trouve que le retard dans l'addition du superplastifiant améliore la rhéologie du mélange. Pour eux le temps optimal pour introduire le superplastifiant est de 10 minutes après avoir ajouté de l'eau au mélange. Par contre Domone et Jin [126] proposent l'introduction du superplastifiant à partir de la 2<sup>ème</sup> minute après le commencement du malaxage.

Dans nos essais nous avons opté pour la proposition de Domone et Jin [126]. La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier.

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité).
- Malaxer pendant une (1) minute avec la première quantité d'eau (Eau1 = 70 % Eau).
- Malaxer pendant une (1) minute avec le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30 % Eau) mélangé avec le superplastifiant.
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

La séquence de malaxage du mortier est mentionnée sur la Figure 0-3.

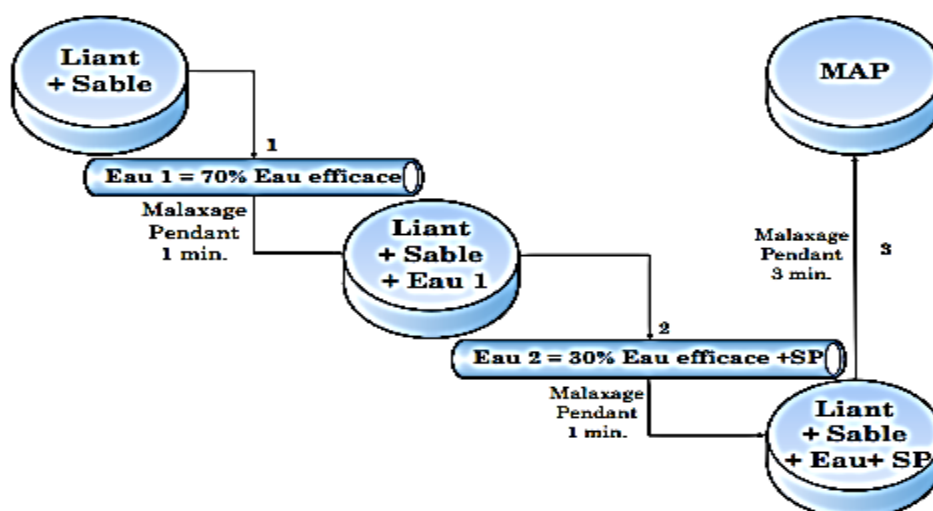


Figure 0-3 - Séquence de malaxage du mortier autoplaçant [126].



Figure 0-4 - Malaxage du mortier autoplaçant.

### **II.3.2) Formulation du béton autoplaçant :**

Une fois que la composition du MAP de référence sera obtenue, on ajoute des gravillons pour composer le BAP de référence conformément à la méthode générale de formulation.

Le BAP de référence sera ensuite testé moyennant l'essai d'étalement au cône d'Abrams pour valider les rapports déterminés précédemment notamment le rapport  $Sp/L$ . Pour accepter ces rapports, le mélange obtenu doit avoir un étalement variant entre 65 et 80cm [129], et ne doit pas présenter aucun signe visuel de ségrégation ou de ressuage. Dans le cas contraire, ces rapports doivent être réajustés. (L'exemple de calcul des quantités des constituants du BAP est donné dans l'annexe B).

#### **II.3.2.1) Fixation des rapports Sable/Mortier (S/M) et Eau/Liant (E/L) :**

Afin de minimiser le nombre de variables pour le béton autoplaçant de référence, nous avons jugé judicieux de maintenir fixe les deux rapports S/M et E/L trouvés lors des essais effectués sur le mortier, et chercher la meilleure formulation du BAP de référence en ajustant le rapport  $Sp/L$ .

#### **II.3.2.2) Fixation des rapports Sable/Mortier (S/M) et Eau/Liant (E/L) :**

Comme point de départ, on prend le résultat des essais sur mortiers, du rapport  $Sp/L$ . Il suffit de quelques mesures d'étalement (au cône d'Abrams) et de temps d'écoulement à l'entonnoir en V, pour trouver le meilleur rapport  $Sp/L$  donnant un bon béton autoplaçant sans ségrégation

ni ressuage. Une fois que le BAP de référence est obtenu, pour les autres BAP, on commence par substituer une partie du ciment par la poudre de marbre (PM).

### II.3.2.3 Confection des bétons autoplaçants :

Comme tendance générale, pour un faible rapport eau/liant et un fort dosage en superplastifiant, le mélange nécessite un temps de malaxage plus prolongé [130]. Un malaxage intensif disperse mieux les particules de poudres. Dans le cas de mauvais malaxage ces particules de poudres restent dans la phase pâte et rendent le béton plus visqueux [131]. De Larrard et al. [132] ont montré que l'étalement et la résistance à la compression sont les plus influencés par le temps de malaxage.

La séquence de malaxage et la composition du béton ont un rôle important pour avoir une hydratation correcte, ce qui conduit à avoir un béton performant et durable. La procédure de malaxage adoptée est celle proposée par Domone et Jin [133] :

- Calculer l'eau efficace que l'on introduit dans le malaxeur en prenant en compte la teneur en eau et l'absorption des granulats ainsi que l'eau contenue dans l'adjuvant. La quantité d'eau efficace est donnée par la formule suivante :  
$$E_{\text{eff}} = E_{\text{totale}} - E_{\text{teneur en eau}} - E_{\text{adjuvant}} + E_{\text{absorbée par granulats}}$$
 (voir Annexe B)
- Calculer les proportions du ciment, sable, gravier et superplastifiant.
- Malaxer le sable, ciment et gravier pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange.
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau ( $E_{\text{eau}_1} = 70\% \text{ Eau}$ ).
- Ajouter le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage ( $E_{\text{eau}_2} = 30\% \text{ Eau}$ ).
- Malaxer pendant 5 minutes ;
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- Remalaxer pendant 30 secondes.

**Remarque :** Cette séquence de malaxage est la même pour tous les mélange de bétons. En ce qui concerne le re-malaxage il se fait juste avant chaque essai.

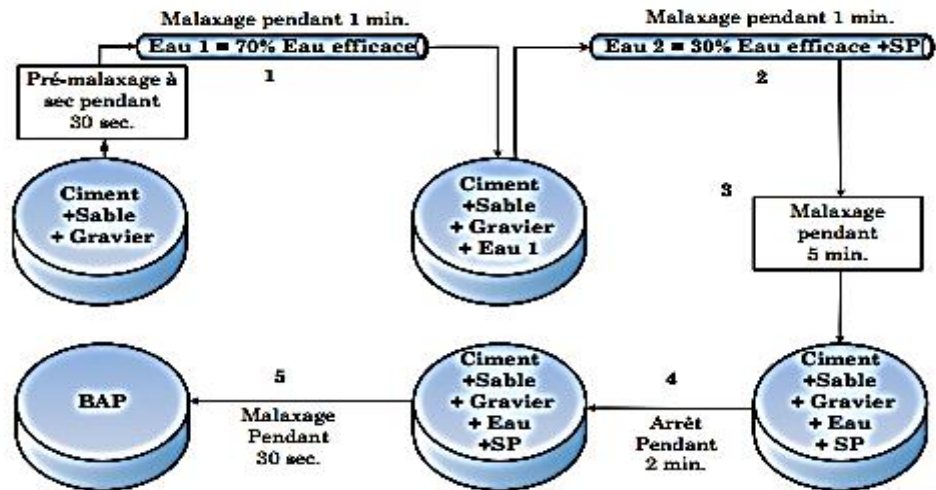


Figure 0-5 - Séquence de malaxage du béton autoplaçant [126].



Figure 0-6 - Malaxage du béton autoplaçant.

## II.4) Méthodes d'essais :

### II.4.1) Essais sur mortier à l'état frais :

Les propriétés du mortier (étalement et temps de passage à travers un entonnoir où temps d'écoulement) sont caractérisées à l'aide des essais sur mortiers. L'étalement est déterminé à l'aide de l'essai au mini-cône et le temps d'écoulement est déterminé par un essai au V-funnel pour mortier.

### II.4.1.1) Essai d'étalement au Mini-Cône :

L'essai consiste à remplir le petit cône de mortier, placé sur une plaque à surface propre et humidifiée et dont les dimensions sont représentées sur la Figure 0-7. Le cône est ensuite soulevé et le mortier en sort en formant une galette qui s'élargit sous son propre poids. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette du mortier ainsi obtenue. La tendance à la ségrégation et au ressuage peut être détectée visuellement, le sable doit être réparti uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette.



Figure 0-7 - Essai d'étalement pour mortier.

### II.4.1.2) Essai de l'entonnoir en V (V-funnel) :

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante : l'entonnoir dont les dimensions sont définies à la Figure 0-8 est rempli de mortier de 1.1 litre de mortier, puis on mesure le temps d'écoulement entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir.

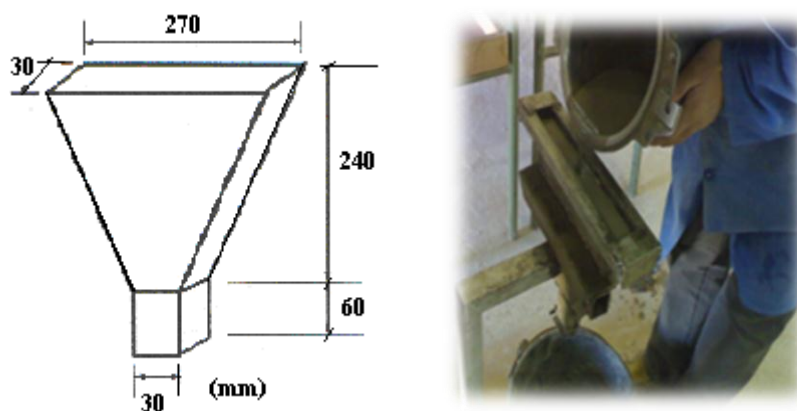


Figure 0-8 - Essai d'entonnoir (V-funnel) pour mortier.

Okamura et al [11], ont proposé, d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 270 et 330 mm donne un mortier autoplaçant. Quand Chai [134], qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 sec.

## II.4.2) Essais sur BAP à l'état frais :

### II.4.2.1) Essai d'étalement (Flow test) :

L'essai d'étalement peut être utilisé pour évaluer la capacité de remplissage à l'état libre en l'absence d'obstacles. Cet essai permet de déterminer l'habilité du béton à se déformer sous son poids propre. C'est l'essai type pour évaluer la déformabilité libre du béton autoplaçant [135].

Pour la détermination de l'étalement on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante ( $\geq 900$  par  $900$ mm), puis il est rempli de BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous son propre poids. Après l'arrêt de l'écoulement, on mesure deux diamètres perpendiculaires de la galette soit  $d_1$  et  $d_2$  Figure 0-9, puis on déduit la valeur de l'étalement qui correspond au diamètre moyen de la galette. La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être repartis uniformément et aucune concentration ou séparation des fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette.

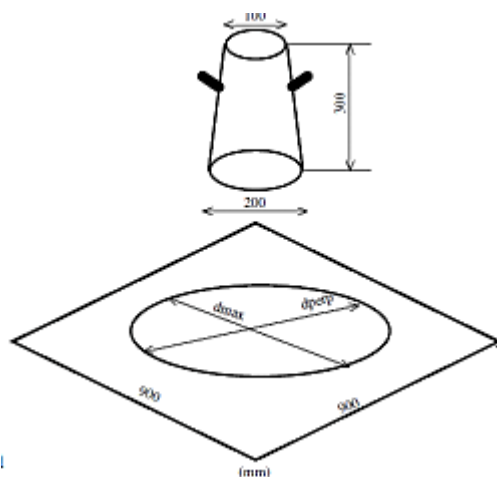


Figure 0-9 - Mesure du diamètre d'étalement.

Selon EFNARC [136], la mesure de l'étalement au cône d'Abrams, peut être divisée en trois (03) classes. Le tableau 0-6 définit ces trois classes selon le domaine d'utilisation du BAP :

Tableau 0-6 - Classes des BAP selon l'étalement et le domaine d'utilisation [136].

Classe	Etalement (en mm)	Domaine d'utilisation du BAP
SF1	550-650	-Structure non ou peu ferrillées. Béton coulé à partir du haut (ex. les dalles)
		-Coulage par système de pompage du BAP (ex. tunnels)
		-Petites sections (ex. les piles et les fondations profondes)
SF2	660-750	- La majorité des applications
SF3	760-850	- Application verticales
		- Structures trop ferrillées
		- Coulage à partir du dessous du coffrage
		- Structures de forme complexe.

La classe SF3 est typiquement produite avec les petites dimensions maximales de granulats ( $D_{max} < 16$  mm), et donne généralement une meilleure finition de surface que la classe SF2, mais la résistance à la ségrégation est difficile à contrôler. Des valeurs d'étalement dépassant les 850 mm peuvent être spécifiées pour des cas spéciaux mais grande attention doit être faite quant à la résistance à la ségrégation, et la dimension maximale des granulats doit être normalement inférieure à 12 mm. Avec le même essai, on mesurera le temps d'écoulement  $T_{50}$ , qui correspond au temps mesuré, à partir du commencement de l'étalement de la galette jusqu'à atteindre un diamètre de 500 mm. Ce temps d'écoulement  $T_{50}$  peut donner des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange [136].

Des observations complémentaires peuvent aider à appréhender certaines propriétés à l'état frais des bétons autoplaçants :

- Un ressuage peut être détecté si de l'eau est présente en grande quantité sur les bords de la galette ;

- En traçant à la truelle des lignes dans la galette, on peut vérifier si le béton se referme bien, ce qui est synonyme de bon comportement ;
- La fluidité du béton peut être évaluée en mesurant les temps de passage du béton aux diamètres 50 cm durant un écoulement au cône ;
- ne forme bombée de la galette traduit un effet de voute, ce qui peut nuire à l'homogénéité du béton.

Toutes ces indications sont plus ou moins subjectives mais aident la formulation expérimentée à effectuer certaines corrections en vue d'obtenir un béton qui correspond plus à ses attentes.

#### II.4.2.2) Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test) :

L'essai de l'entonnoir en V mis en place par Okamura et Ozawa [11] permet d'évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées grâce à la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir en V (en secondes).



Figure 0-10 - L'entonnoir en V (V-Funnel).

On remplit l'entonnoir de béton, puis on laisse reposer pendant 1 minute. L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice.

Comme l'essai de la capacité de remplissage, l'essai de l'entonnoir en V nous renseigne sur la stabilité, c'est-à-dire s'il existe de la ségrégation, ainsi que sur la viscosité du mélange étudié. S'il y a de la ségrégation, on observera un amoncellement de granulats au goulot de l'entonnoir,

ou si le mélange est trop visqueux, le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir sera plus important [126].

Selon EFNARC [136] Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Ils recommandent un temps compris entre 5 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante.

### II.4.2.3) Essai de la couronne J (J-Ring test) :

L'essai à la couronne J ou l'étalement modifiée (J-ring) consiste à étudier, la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Il peut aussi être utilisé pour étudier la résistance à la ségrégation d'un BAP en comparant les résultats de deux essais différents. L'essai J-ring mesure trois paramètres : l'étalement, le temps d'écoulement  $T_{50J}$  et le blocage [136].

On l'appelle aussi l'essai d'étalement modifié (J-Ring). Il fut développé au Japon et consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage (Figure 0-11). A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature  $\phi 16$  à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

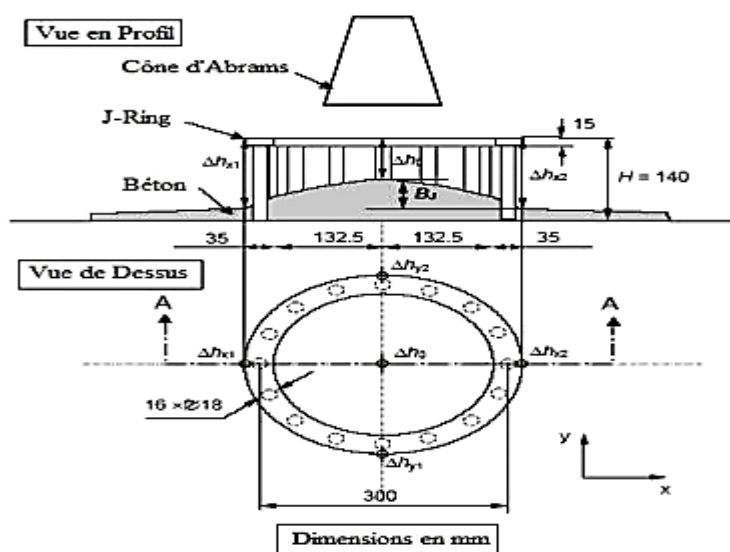


Figure 0-11 - Dimensions du J-ring et positions pour mesure de différence des hauteurs.

Pour calculer la différence d'hauteurs  $B_j$ , il est nécessaire de mesurer la hauteur du béton en cinq points, l'un à l'intérieur (au centre de la galette du béton) et les autres à l'extérieur de la couronne métallique (Figure 0-12). Cette différence d'hauteurs  $B_j$  est donnée par la formule suivante :

$$B_j = \frac{\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2}}{4} - \Delta h_0$$



Figure 0-12 - Mesure d'étalement et des hauteurs à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring.

#### II.4.2.4) Essais de la boîte en L (L-Box test) :

Cet essai permet d'évaluer la capacité de passage et de remplissage du BAP à travers un grillage d'armatures.

L'essai de la boîte en L (Figure 0-13) fait partie de ces essais. La partie verticale du L est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres  $\phi 14$ ) qui correspond à des ouvrages très ferrailés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre 2 barres) [137].

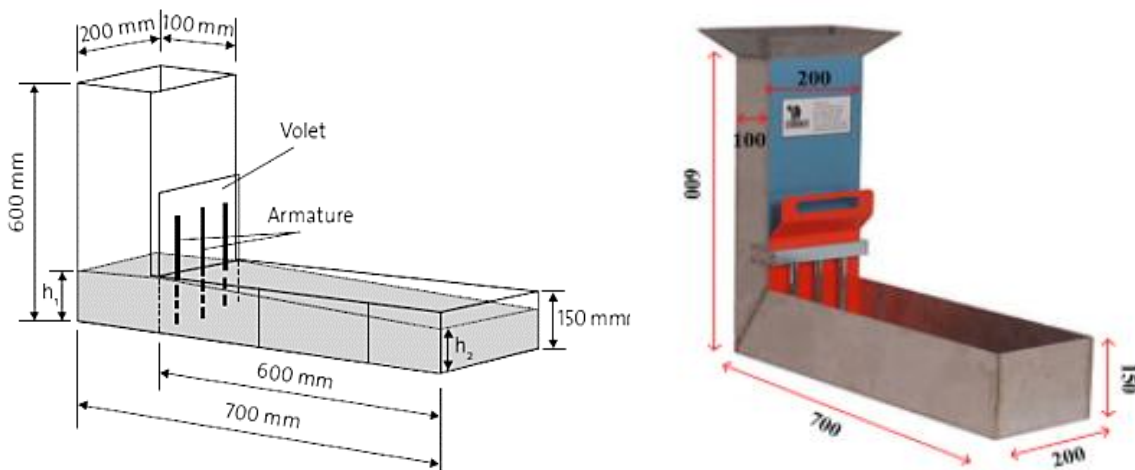


Figure 0-13 - Boîte en L (L-box).

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs  $H_2/H_1$ , Figure 0-13) doit être supérieur à 0,8 [137]. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

#### II.4.2.5) Essai de stabilité au tamis (Résistance à la ségrégation) :

L'essai de ségrégation au tamis vise à qualifier la résistance du BAP à la ségrégation dynamique en mesurant l'indice de ségrégation qui est le rapport de la quantité de laitance sur la masse de l'échantillon. Des valeurs de l'indice de ségrégation variant entre 5% et 15% est le signe d'une résistance satisfaisante à la ségrégation, inférieur à 5%, la résistance est considérée excessive, ce qui affecte la qualité des parements (mauvaise qualité des parements), entre 15% et 30%, la résistance est considérée critique, au-delà de 30%, la résistance est mauvaise [138].

Le pourcentage de laitance passant au travers le tamis est calculé selon l'expression : avec

$P_l$  (poids de laitance) et  $P_T$  (poids total d'échantillon)

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



Figure 0-14 - Essai de stabilité au tamis.

#### II.4.3) Essais sur BAP à l'état durci :

Les essais présentés ci-dessous caractérisent les propriétés mécaniques et la durabilité du béton autoplaçant. Pour les essais mécaniques, nous avons évalué la résistance à la compression et la résistance à la flexion aux différents âges. En ce qui concerne l'étude de la durabilité, nous avons réalisé les essais suivants :

- L'absorption d'eau par capillarité
- L'absorption d'eau par immersion totale
- La résistance aux attaques de sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )

- La résistance aux agressions acides (HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
- carbonatation accélérée.

#### II.4.3.1) Résistance à la compression :

La résistance à la compression peut être mesurée sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques conformément à la norme NF P18-430[148]. L'essai de compression se fait, dans notre cas, sur six morceaux de trois éprouvettes prismatiques qui ont été préalablement écrasées par flexion. L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture moyennant une presse hydraulique de capacité de 2000KN, cette presse est muni d'un affichage digital permettant d'entrer la surface de l'éprouvette, la vitesse de chargement (2,5 KN/s) et d'obtenir la force et la résistance à la compression (Figure 0-15).

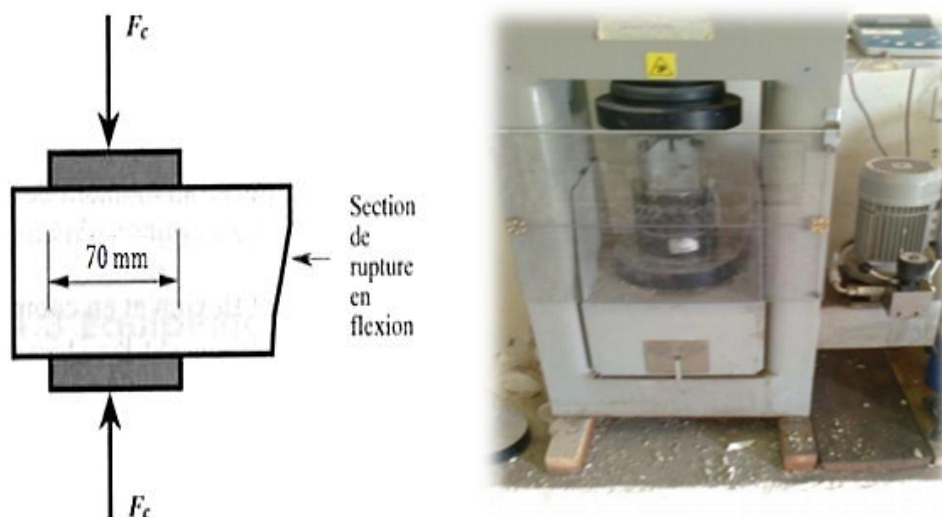


Figure 0-15 - Détermination de la résistance à la compression.

#### II.4.3.2) Résistance à la traction par flexion trois points :

L'essai de résistance à la traction est effectué en conformité avec la norme NF P18-433 [139]. La méthode consiste à soumettre des éprouvettes prismatiques reposant sur deux appuis à une charge croissante concentrée au milieu jusqu'à la rupture (Figure 0-16). La charge est appliquée à l'aide d'une presse à lecture digitale reliée à un système d'acquisition(PC) par lequel on introduit la vitesse de chargement (50 N/s). La force à la rupture est donnée par le même système. La résistance à la traction est obtenue en faisant un simple calcul de résistance des matériaux. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes de (7×7×28) cm à 3, 7, 28, 56 et 90 jours.

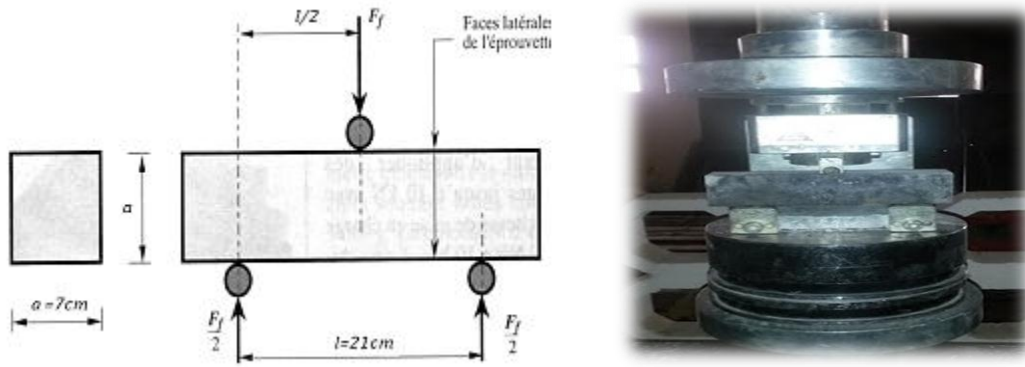


Figure 0-16 - Détermination de la résistance à la traction par flexion trois point.

### II.4.3.3) Densité :

La détermination de la densité du béton durci est réalisée en conformité avec la norme NF P18-435 [139]. La densité du béton est calculée à partir de la masse et le volume de l'éprouvette étudiée. La masse est mesurée au moyen d'une balance (Figure 0-17), alors que le volume est calculé à partir des dimensions réelles de l'éprouvette. La densité est calculée comme suivant :

$$d = \frac{m}{v \cdot \rho_w}$$

Où  $d$  : densité du béton (sans unité) ;

$m$  : masse de l'éprouvette en kg ;

$v$  : volume de l'éprouvette en  $m^3$  ;

$\rho_w$  : masse volumique de l'eau qui vaut  $1000kg/m^3$



Figure 0-17 - Détermination de la densité du béton-pesé de l'éprouvette-.

#### II.4.3.4) Absorption capillaire :

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de bétons moulées ou carottées, non saturées, mises en contact avec l'eau sans pression hydraulique. Avant les mesures de la sorptivité, les éprouvettes sont pré-conditionnées selon les recommandations de la procédure AFREM [95] qui a également fait l'objet de recommandations dans la synthèse des travaux du projet GranDuBé [140].

L'essai a été réalisé sur des éprouvettes de (4 x 4 x 16 cm). Le protocole de cet essai consiste à sécher des éprouvettes prismatiques à l'étuve à 105±50C pendant 72 heures. Les surfaces latérales des éprouvettes sont ensuite imperméabilisées à l'aide d'une matière plastique étanche, et ce pour assurer la remonté unidirectionnelle d'eau par capillarité. Les éprouvettes sont ensuite pesées soit M0. Les mêmes éprouvettes sont posées dans un récipient sur leurs faces les plus petites (4 x 4 cm), et sont séparés d'au moins 1 cm de son fond. Le récipient est ensuite rempli en eau jusqu'à ce que les éprouvettes soient partiellement immergées (environ 5 mm). Il faut noter que le niveau d'eau doit rester constant tout au long de l'essai. Les éprouvettes sont retirées et pesés régulièrement tous les 5 minutes. L'essai est terminé après 24 h.

Le coefficient d'absorption par capillarité est défini par la relation suivante :

$$C_{ac} = \frac{\Delta M}{A \cdot \sqrt{t}} \cdot 100$$

Avec  $C_{ac}$  : coefficient d'absorption ;

$\Delta M$ : Masse d'eau absorbée (différence entre la masse sèche et la masse de l'éprouvette à l'état absorbé) en gramme ;

$A$  : Section de la base de l'éprouvette en mm<sup>2</sup> ;

$t$  : Temps d'absorption en minutes.

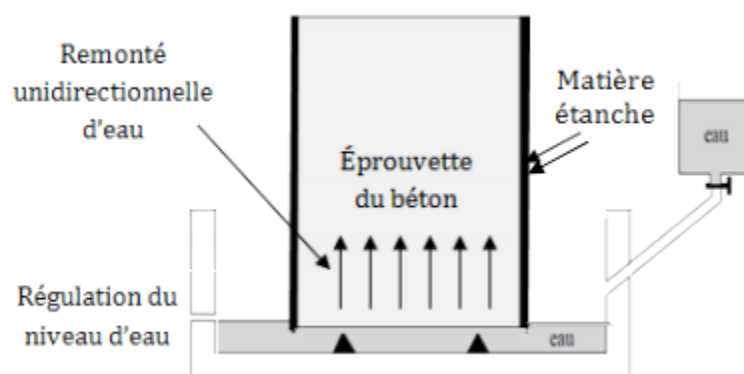


Figure 0-18 - Essai d'absorption d'eau par capillarité.

### II.4.3.5) Absorption d'eau par immersion totale :

Cet essai est réalisé en conformité avec la norme ASTM C642-97 [141]. La méthode consiste à sécher préalablement des éprouvettes prismatiques à l'étuve à  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$  pendant 72 heures. Les éprouvettes sont ensuite retirées et laissées refroidir, puis sont pesées soit  $M_0$ . Par la suite, les éprouvettes sont immergées totalement dans l'eau à  $21^{\circ}\text{C}$  pendant 72 heures (Figure 0-19). Après cette période, les éprouvettes sont retirées, et après avoir étoffé leurs faces à l'aide d'une serviette, sont pesées de nouveau soit  $M_1$ . Le taux d'absorption est calculé comme suit :

$$A_{bi} = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \cdot 100$$

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

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

$M_1$  : Masse de l'éprouvette à l'état saturé en kg.



. Figure 0-19 - Immersion totale des éprouvettes.

### II.4.3.6) Résistance aux attaques sulfatiques externes (5% $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) :

Les essais utilisés pour étudier la résistance des bétons aux attaques sulfatiques sont très divers [113]. Ils ont deux fonctions principales : dégrader le béton et quantifier cette dégradation. Etant donné que les sulfates sont essentiellement présents dans les solutions aqueuses, le principe de base des essais consiste le plus souvent à immerger des éprouvettes en béton dans une solution sulfatique.

Dans notre étude, des essais d'immersion dans la solution de sulfate de sodium (5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ont été effectuées. Selon la norme ASTM C1012-04 [142], le pH de la solution de sulfate doit être compris entre 6 et 8 et la solution doit être renouvelée chaque mois, ce qui nécessite des quantités considérables de sulfate de sodium.

Pour évaluer la durabilité des BAP avec les différents types de pourcentage de marbre utilisés, on a réalisé des essais mécaniques, physiques et chimiques sur des éprouvettes de mortiers immergés pendant 360 jours dans les solutions de 5% de sulfate de sodium. Pour cela on a procédé comme suit :

- Suivi de l'évolution de la résistance à la compression ;
- Suivi de la variation de masse ;
- Suivi de la variation dimensionnelle sur des prismes (2,5 x 2,5 x 28,5 cm) (expansion);
- Analyse visuelle de l'état des éprouvettes ;
- Etude de la microstructure des mortiers par DRX.

#### II.4.3.6.1) Suivi de la variation de la masse :

Le suivi de la variation est effectué sur des éprouvettes de (4 x 4 x 16 cm). Après démoulage, les éprouvettes sont mises directement dans l'eau saturée en chaux jusqu'au jour de l'essai. Après 28 jours de conservation deux échantillons de chaque formulation sont été mis dans la solution de 5% de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

La mesure de la masse est réalisée durant 360 jours. Le mode opératoire suivi pour chaque mesure consiste à retirer de son milieu de conservation l'éprouvette, l'essuyer avec un tissu sec et la laisser pendant 30 minutes à l'air libre du laboratoire. Ensuite, la pesée est effectuée puis enregistrée. L'éprouvette est ensuite remise dans son milieu de conservation. La variation de la masse de chaque éprouvette est calculée à partir de la relation suivante :

$$VM = \frac{M_0 - M_i}{M_i} \cdot 100$$

Avec  $VM$  : variation de la masse en (%) ;

$M_0$ : la masse de l'éprouvette avant exposition à l'attaque acide en (gramme) ;

$M_i$  ( $i = 1, 2, 3 \dots$ ): la masse après 1, 2, 3, ... semaines d'attaque en (gramme).



Figure 0-20 - conservation des éprouvettes dans solution.

#### II.4.3.6.2) Suivi de la résistance à la compression :

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes cubiques de (4 x 4 x 8 cm). Six échantillons de chaque formulation sont étudiés en utilisant une presse. Avant l'écrasement, l'éprouvette est retirée de son milieu de conservation, essuyée avec un tissu sec et laissée pendant environ 2 heures à l'air libre du laboratoire. Les échéances prévues pour les échantillons immergés dans les solutions sulfatiques sont 28, 56, 90, 180 et 360 jours.

#### II.4.3.6.3) Suivi de la variation dimensionnelle :

La détermination des variations dimensionnelles est réalisée sur des échantillons prismatiques (2,5 x 2,5 x 28,5 cm) immergés dans la solution de sulfates. Deux échantillons de chaque formulation sont étudiés.

Cet essai est effectué selon le mode opératoire recommandé par la norme ASTM C1012 [142].

La variation de longueur de l'échantillon à l'échéance  $i$  est donnée par la formule suivante :

$$\Delta l_i = \frac{L_i - L_0}{L_g} \cdot 100$$

Avec  $\Delta l_i$  : changement de longueur à l'échéance  $i$  en %;

$L_i$  : Lecture prise à l'échéance  $i$  en mm ;

$L_0$  : Lecture initiale en mm ;

$L_g$  : Longueur de la tige étalon, en général,  $L_g = 250 \text{ mm}$ .

#### II.4.3.6.4) Analyse DRX :

Après 360 jours de conservation dans les milieux sulfatiques, des analyses de diffractométrie aux rayons X (DRX) sont réalisées sur des surfaces des différentes éprouvettes exposées à l'attaque de sulfates.

#### II.4.3.6.5) Etude visuelle :

Pour évaluer la dégradation des bétons, un examen visuel (à partir de photos) a été effectué après 360 jours de conservation dans le milieu sulfatique.

#### II.4.3.7) Résistance aux attaques acides (2,5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et 1% HCl) :

L'essai de la résistance aux attaques acides, consiste à suivre l'évolution de la masse et de la résistance mécanique et chimique d'échantillons immergés dans une solution saturée en acide. Des essais d'immersion dans des solutions d'acide sulfurique (2,5 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) et d'acide

chlorhydrique (1 % HCl) ont été effectués pour évaluer la résistance des différentes formulations des BAP.

Les échantillons testés sont de forme prismatique (4 x 4 x 16 cm). L'essai a été réalisé après 28 jours de conservation dans l'eau. Ensuite, les échantillons ont été sortis de l'eau et laissés dans une ambiance de 23 °C pendant 30 minutes afin d'éliminer l'excès d'eau sur la surface des éprouvettes. La masse sèche initiale ( $M_0$ ) des éprouvettes est déterminée avant leurs immersions dans des solutions d'acide [118].

Des solutions d'acide sulfurique de concentration de 2,5 % et d'acide chlorhydrique de concentration de 1 % ont été préparées dans des récipients résistants à l'acide. Ces solutions ont été placées à une température ambiante de 23 °C. Les échantillons sont alors disposés et espacés de 2 cm et recouverts d'environ de 2 cm de solution acide (ASTM C 267) [143].

La résistance des échantillons immergés dans les solutions acides est évaluée physiquement (variation de masse) et chimiquement (analyse DRX).

#### II.4.3.7.1) Suivi de la variation de la masse :

Selon la procédure de la norme ASTM C 267 [143] : les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau pour éliminer le béton altéré, puis on les laisse à l'air libre pendant 30 minutes pour procéder ensuite à la pesée. Cette opération est effectuée après chaque semaine d'immersion [143]. Selon les recommandations des normes en vigueur, la solution acide est renouvelée après chaque nouvelle pesée (ASTM C 192) [144]. La variation de masse sous attaque acide est évaluée de même que la variation de masse sous attaque sulfatique.

#### II.4.3.7.2) Analyse DRX :

Des analyses de diffractométrie aux rayons X (DRX) et des observations au microscope électronique à balayage ont été conduites sur des échantillons exposés à l'attaque des acides (2,5%  $H_2SO_4$ ) et (1% HCl). Ces analyses sont nécessaires pour mieux comprendre le mécanisme de dégradation du béton par les acides.

#### II.4.3.7.3) Etude visuelle :

Un examen visuel a été réalisé pour évaluer l'état de dégradation du béton immergé dans les solutions acides.

### II.4.3.8) Essai de carbonatation accélérée :

#### II.4.3.8.1) Principe d'essai :

L'objectif de cet essai est de caractériser le comportement d'échantillons de béton vis-à-vis de la carbonatation. L'essai consiste à suivre l'évolution de l'épaisseur de béton carbonaté d'échantillons conservés dans une atmosphère riche en dioxyde de carbone. Il a été exécuté dans notre cas sur des échantillons moulés mais peut aussi être appliqué à des échantillons carottés de bétons, ainsi qu'à des mortiers et pâtes de ciment durcis [95].

Les échantillons testés sont de forme prismatique (7x7x28 cm). Trois échantillons subissent l'essai de carbonatation accéléré : deux sont utilisés pour les mesures des épaisseurs de béton carbonaté et le dernier est utilisé pour suivre l'évolution de la masse au cours de l'essai.

La procédure de préconditionnement est la suivante :

- Les éprouvettes sont conservées après démoulage en ambiance humide (humidité relative supérieure à 95%) pendant 28 jours.
- Avant le démarrage de l'essai de carbonatation accéléré, les échantillons sont placés durant 48 heures dans une étuve ventilée réglée à une température de  $40 \pm 2^\circ\text{C}$  (pour favoriser la carbonatation). Les échantillons sont alors pesés puis disposés dans l'enceinte de carbonatation (espacés de 2 cm).

L'enceinte de carbonatation accélérée (Figure 0-21) est régulée en humidité relative (65%) et en dioxyde de carbone (50% volumique). Les échéances de mesure de l'épaisseur de béton carbonaté sont les suivantes : 7, 14, 28,42 et 56 jours et au-delà si possible. A chaque échéance, les échantillons sont retirés de l'enceinte et les épaisseurs de béton carbonaté ainsi que les masses sont mesurées.

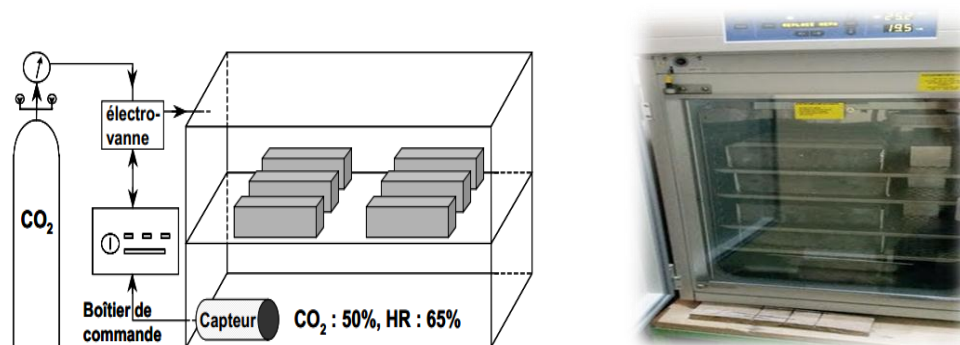


Figure 0-21 - l'enceinte de carbonatation accélérée.

**Remarque :** chaque échantillon, sont recouvertes de papier aluminium adhésif afin d'orienter la diffusion du CO<sub>2</sub>.

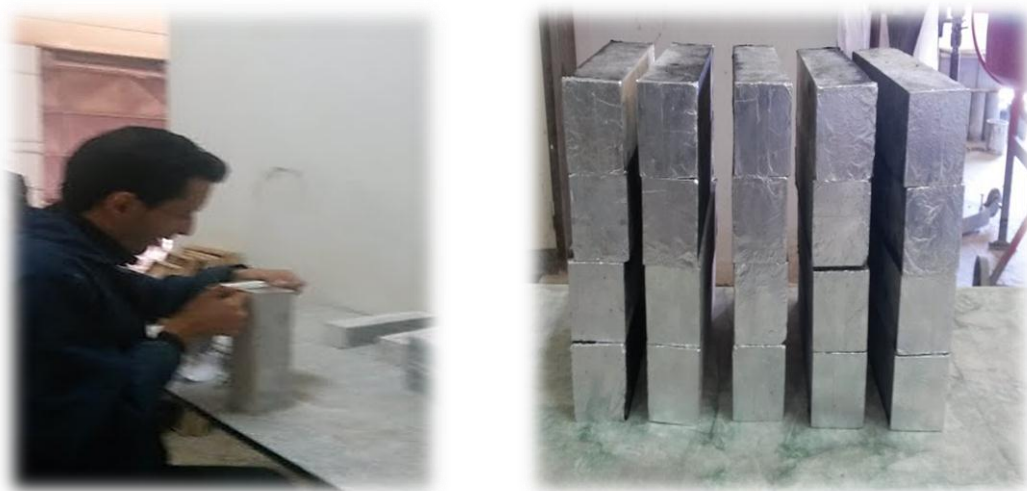


Figure 0-22 – recouvrements des échantillons par de papier aluminium adhésif.

#### II.4.3.8.2) Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté :

Les mesures de l'épaisseur de béton carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphaléine. Cette dernière révèle l'interface entre la zone saine et la zone carbonatée. Les mesures correspondent aux distances (en mm) entre la surface externe du béton et le front de coloration, en dehors de zones particulières (coins et interfaces pâte granulat) (Figure 0-23).

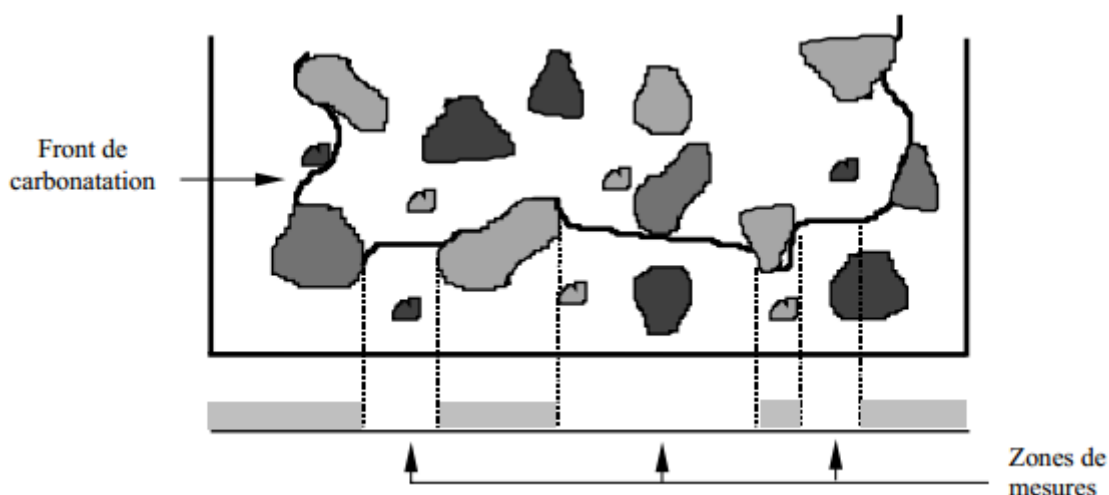


Figure 0-23 – Schéma illustrant le principe des mesures.

Cinq distances sont déterminées pour chaque face : la distance la plus faible, la distance la plus importante, la moyenne relative aux trois distances intermédiaires. La valeur d'épaisseur

carbonatée d'un béton à une échéance donnée est la moyenne des quatre faces arrondie au 1/10<sup>ème</sup> de mm (même si la précision du mm est souvent suffisante) (voir exemple ci-après, Tableau 0-7).

Tableau 0-7 – Calcul de la profondeur de carbonatation (exemple).

Référence de l'échantillon : X					
Faces	5 distances (mm)	Distance mini (mm)	Distance Maxi (mm)	Moyenne des 3 distances intermédiaires	Moyenne sur l'échantillon (mm)
A	5-8-12-7-4	4	12	6.7	7.4
B	8-9-12-15-6	6	15	9.7	
C	2-4-8-6-5	2	8	5.0	
D	8-9-12-5-7	5	12	8.0	

**II.4.3.8.3) Essais de carbonatation accélérée effectués :**

Le Tableau 0-8 résume les différents essais de carbonatation effectués.

Tableau 0-8 – Récapitulation des essais de carbonatation effectués.

Carbonatation accélérée	BAP	Age d'essai					
	0% PM	t	7j	14j	28j	42j	56j
5% PM	t	7j	14j	28j	42j	56j	
10% PM	t	7j	14j	28j	42j	56j	
15% PM	t	7j	14j	28j	42j	56j	
20% PM	t	7j	14j	28j	42j	56j	

#### II.4.4) Récapitulatif du programme des essais réalisés :

Les diagrammes montrés dans les figures 0-24 et 0-25 résument les essais réalisés sur mortier avec et sans ajouts.

Les essais sur béton se divisent en deux parties les essais sur les bétons à l'état frais et à l'état durci : les figures 0-26 et 0-27 résument les essais réalisés sur e béton à l'état frais et à l'état durci.

#### II.5) Synthèse :

Dans notre travail, des matériaux locaux disponibles dans le marché Algérien sont utilisés pour la préparation des mortiers et bétons autoplaçants. Cette recherche présente une contribution à l'étude de l'effet de la poudre marbre sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçants.

Cette partie de l'étude a successivement traité les points suivants :

- Caractérisation physique et chimique des matériaux utilisés dans les formulations des BAP ;
- La méthode de formulation utilisée (méthode générale), des essais préliminaires ont été effectués sur le MAP avant de passer BAP pour déterminer la teneur en sable et le dosage en superplastifiant.
- Les procédures expérimentales et les essais réalisés sur les mortiers et les bétons à l'état frais et à l'état durci au cours de cette étude.
- Pour évaluer la durabilité du BAP, nous avons choisi les essais d'absorption d'eau, carbonatation accélérée et l'essai de la résistance face aux attaques chimiques. Deux types d'attaques chimiques ont été utilisés : l'attaque par les sulfates et l'attaque par les acides.

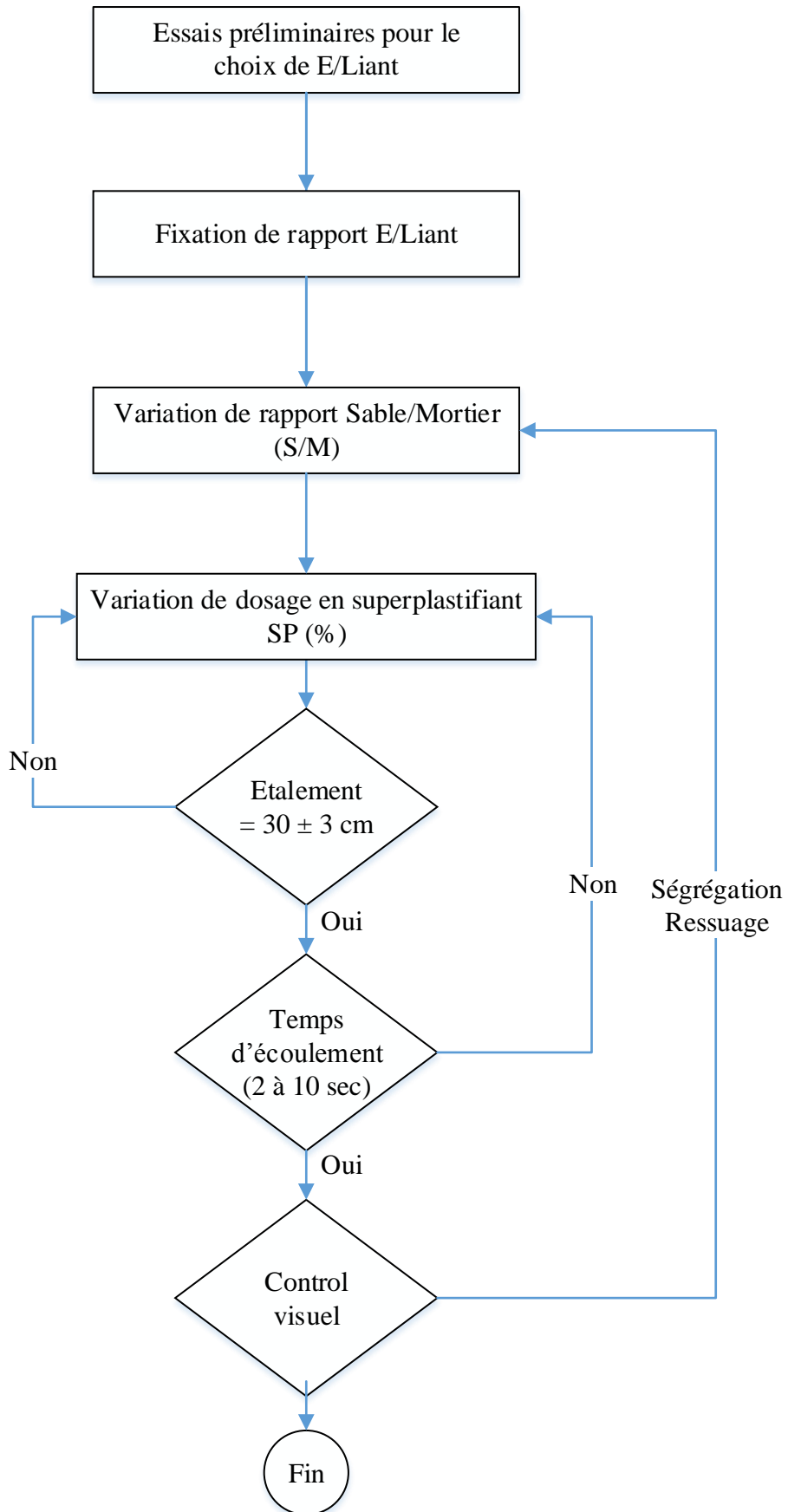


Figure 0-24 – Diagramme des essais réalisés sur mortier de référence.

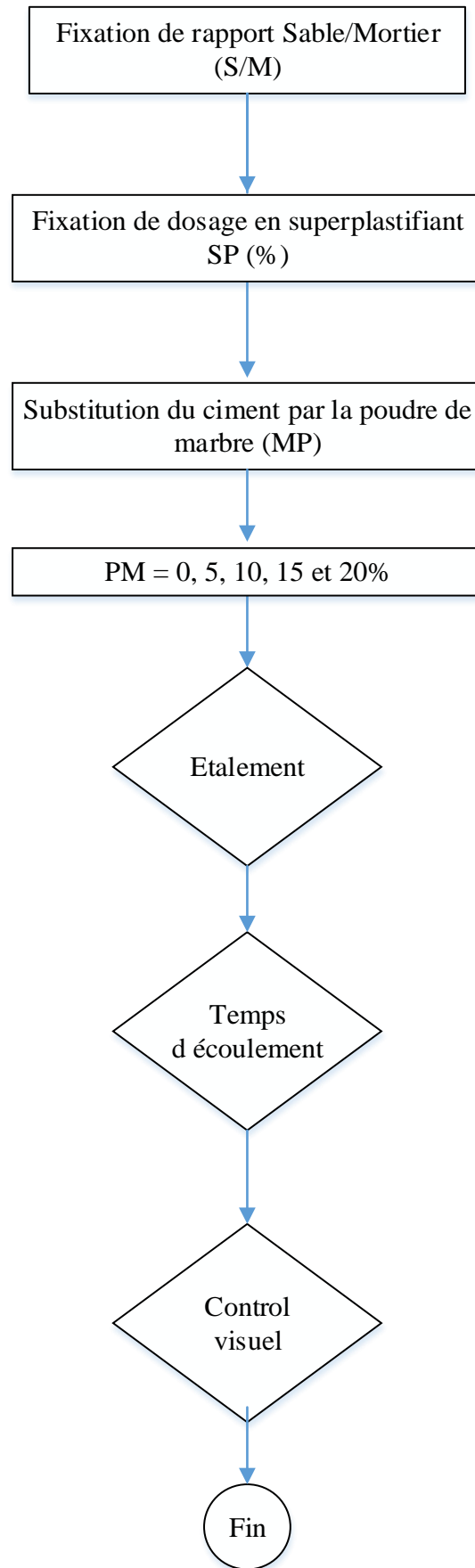


Figure 0-25 – Diagrammes des essais réalisés sur mortier avec ajouts (PM).

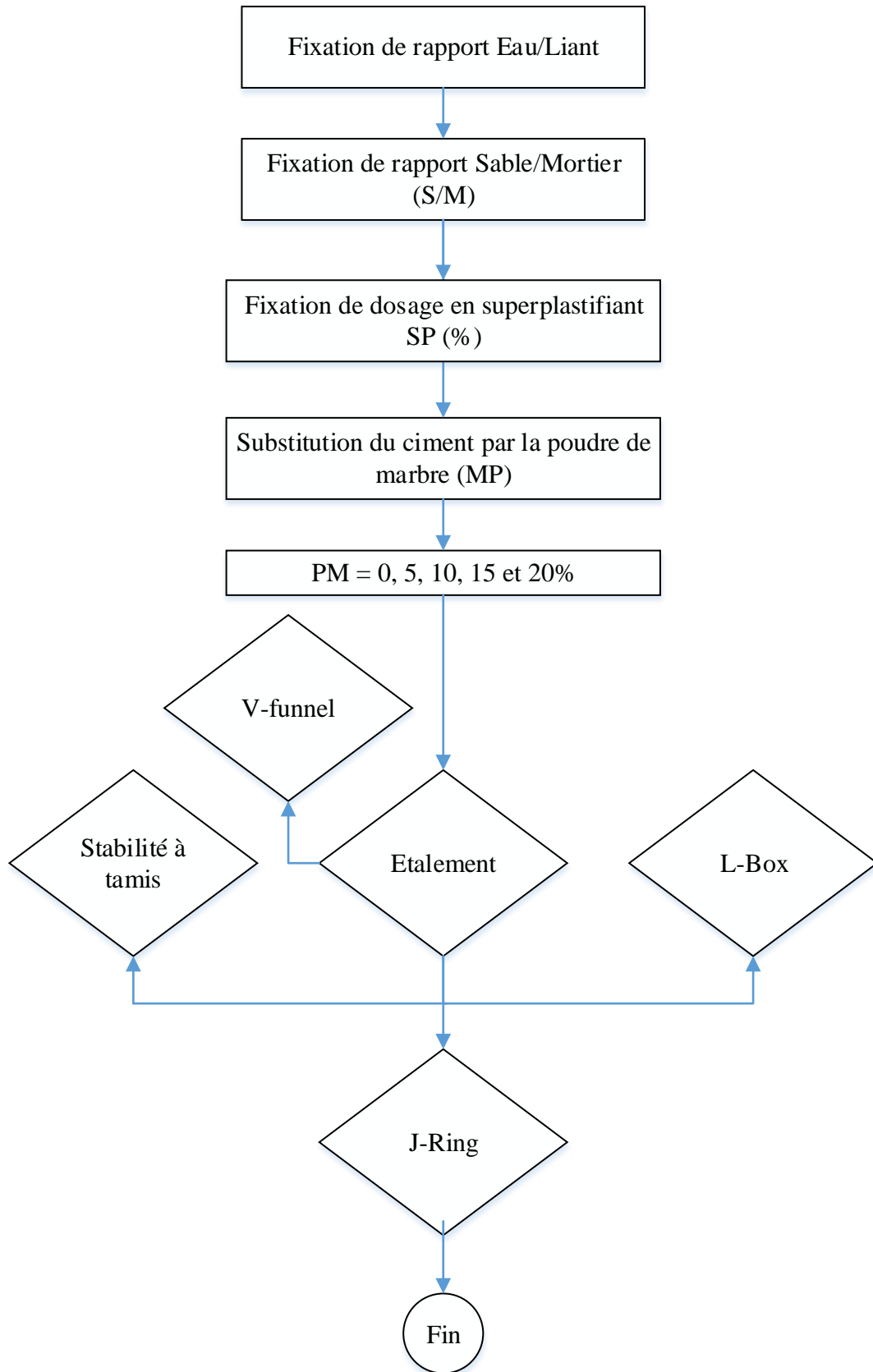


Figure 0-26 – Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état frais.

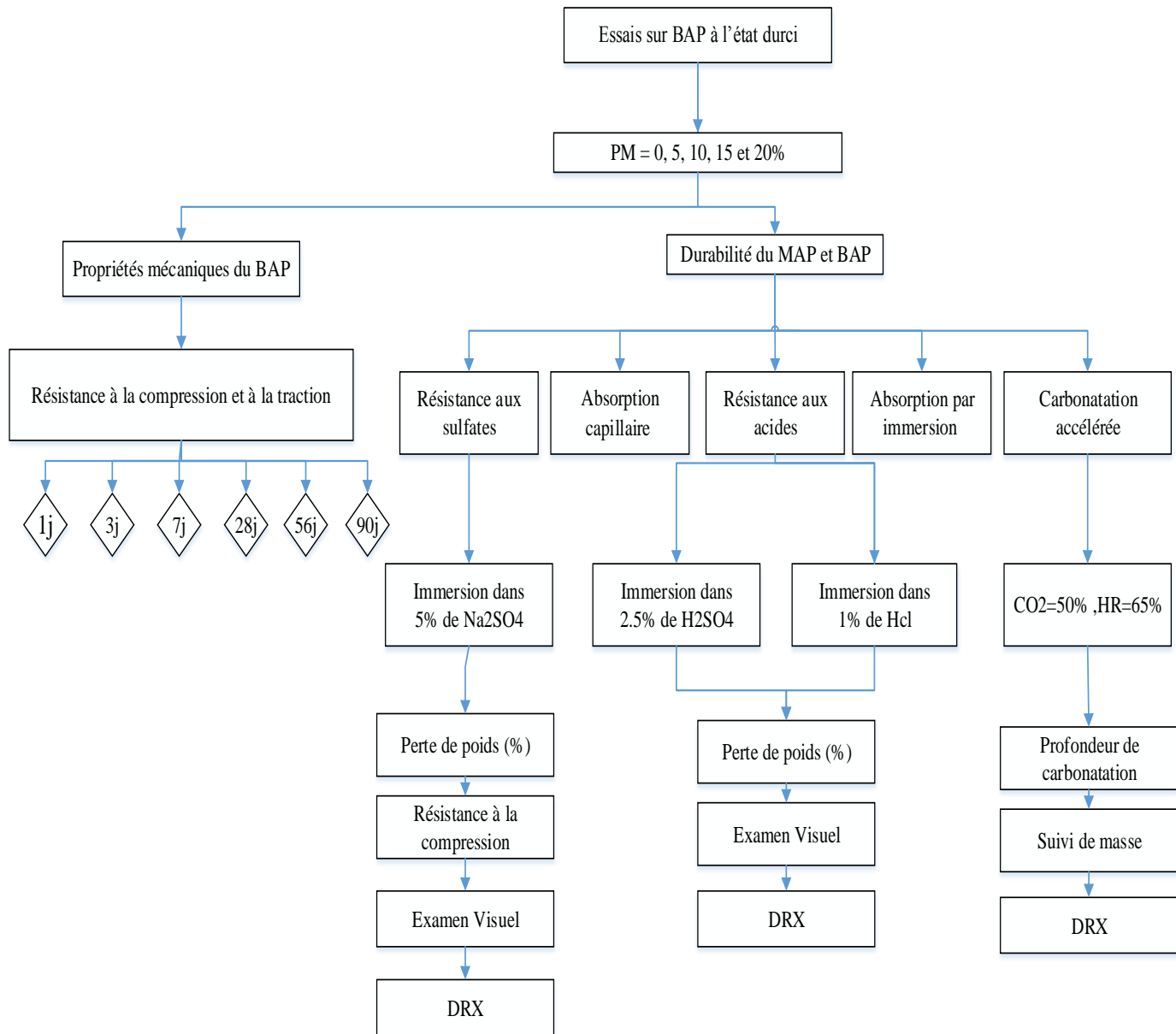


Figure 0-27 – Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état durci.

## Chapitre III : Présentation et analyse des résultats

### III.1) Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter et analyser les résultats des différents essais effectués sur les mortiers et les bétons confectionnés selon combinaisons d'addition (poudre marbre). On commencera par les essais effectués sur le mortier afin d'optimiser le rapport sable sur mortier S/M et le rapport superplastifiant sur liant Sp/L qu'on pourra les utiliser par la suite dans la composition du béton autoplaçant et étudier son comportement rhéologique, mécanique et sa durabilité.

### III.2) Optimisation du rapport Sable/Mortier (S/M) et Sp/L :

Boukendakdji [146] et Belaidi [6] ont testés des BAP à base de matériaux locaux. Ils ont montré qu'un rapport S/M égal à 0.5 est adéquat pour obtenir un bon BAP.

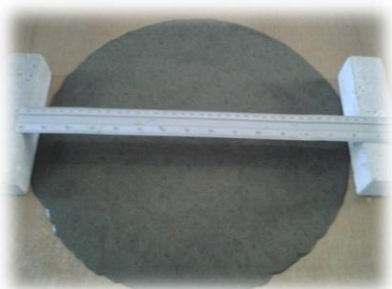
L'optimisation du rapport Sable/Mortier consiste à varier ce rapport de telle manière à trouver un mortier autoplaçant, c'est-à-dire un étalement compris entre 270 mm et 330mm [126]. Nous avons choisi trois valeurs du rapport S/M de 0.4, 0.5 et 0.6 avec l'utilisation d'un rapport E/L égal à 0.4 tout en faisant varier le dosage en SP.

Les différentes compositions des mortiers autoplaçants obtenus, en fonction du rapport S/M sont présentées dans le tableau 0-1 ainsi que les résultats des essais d'étalement au mini-cône (Slump test) et du temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test).

On remarque d'après le tableau 0-1 que les mortiers confectionnés avec un rapport(S/M) égal 0.5, sont des mortiers fluides et stables avec l'utilisation d'un pourcentage en superplastifiant compris entre 0.8 et 0.9%. Au-delà de ces valeurs, les mortiers présentent un ressuage et/ou une ségrégation. Pour les mortiers confectionnés avec un rapport S/M égal à 0.4 et Sp/L = 0.6%, le mortier est très fluide et instable. Par contre, si on augmente le rapport S/M=0.6 avec Sp/L=2.0% le mortier devient ferme. Donc on peut dire à première vue que la préparation des mortiers autoplaçants avec un rapport S/M de 0.4 et 0.6 n'est pas évidente.

Tableau 0-1 – Compositions et résultats des essais sur mortiers pour différentes valeurs du rapport Sable/Mortier (S/M).

Optimisation des rapports S/M et SP/L ou SP/P						
Mélange en poids pour 1000l						
E/L=0,4						
S/M	0,40	0,60	0,50			
SP/L(%)	0,60	2,00	0,70	0,80	0,90	1,00
Ciment(Kg)	829,98	553,30	691,65	691,65	691,65	691,65
Sable (Kg)	1040,00	1560,00	1300,00	1300,00	1300,00	1300,00
Eau(Kg)	335,01	223,12	281,30	280,81	280,33	279,84
SP(Kg)	4,98	11,06	4,84	5,53	6,22	6,92
Etalement (cm)	35,00	/	25,50	26,90	28,60	31,70
Temps d'écoulement(s)	1,25	∞	4,80	4,10	3,20	2,74
observations visuelles	mélange trop fluide avec un grand risque de ressuage	Mélange ferme	mélange stable	mélange stable	mélange stable	mélange fluide avec un risque de ressuage limité



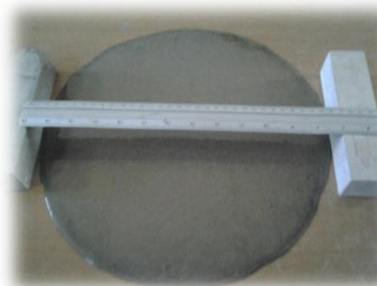
S/M=0,4 et SP/L=0,6 %



S/M=0,6 et SP/L=2 %



S/M=0,5 et SP/L=0,9 %



S/M=0,5 et SP/L=1 %

Figure 0-1 – Schéma illustrant le principe des mesures.

La diminution du rapport Sable/Mortier mène à une réduction du volume de sable, et par conséquent à l'augmentation du volume de la pâte de ciment, ce qui contribue significativement à l'amélioration de la fluidité. Westerholm et al [147] affirment que la grande quantité de sable fin dans le mélange de mortier influe sur la rhéologie de ce dernier, elle augmente le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité plastique. Fang et al [148] ont trouvé que, pour la fabrication d'un béton autoplaçant à haute performance, il est préférable de prendre de rapport Sable/Mortier entre 45 et 48%. Spengler et Schiessl [149] ont pu obtenir un bon BAP quatre (4) fois plus riche en sable qu'en gravier (sable 80%et gravier 20%) avec un rapport E/C égale à 0,5.

**Remarque :** le rapport sable / mortier (S/M) est fixé à **0.5** pour les différents essais sur mortier et béton.

### III.3) Effet du superplastifiant sur les mortiers frais :

Les superplastifiants agissent par adsorption à l'interface solide-eau, ce qui permet aux grains de ciment d'acquérir des charges identiques et créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Ceci permet de libérer une partie de l'eau qui a été piégée par les grains de ciment floкулés et diminue ainsi les frictions intergranulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton. En général, les superplastifiants utilisés dans les formulations des BAP sont du type polymélamine sulfoné, polycarboxylate ou de naphthalène sulfonate.

À partir des essais sur mortiers, on optimise le rapport Sp/L et par conséquent on fixe ce rapport au niveau des essais sur béton autoplaçant. Cette optimisation a été faite à partir des deux essais sur mortier, la mesure d'étalement par le mini-cône et la mesure du temps d'écoulement par l'entonnoir en V et un contrôle visuel sur l'apparition de deux phénomènes le ressuage et la ségrégation.

#### III.3.1) Etalement au mini-cône :

La figure 0-2 montre l'effet du superplastifiant de type PC (Medaflow 30) sur l'étalement des mortiers au mini-cône.

On constate que le diamètre d'étalement augmente avec l'augmentation de la teneur en superplastifiant, jusqu'à un dosage de 2 %. Au-delà de cette valeur, l'augmentation du dosage en superplastifiant n'entraîne pas de modification notable de la rhéologie du mélange et l'étalement reste inchangé . Aussi nous avons constaté qu'un dosage moins de 0.8 % donne des

mortiers ayant un étalement inférieur à 27cm. Par contre nous avons remarqué que un dosage variant entre 0.8 à 2 % donne des résultats d'étalements variant entre 27 et 33 cm. Cet intervalle de dosage du superplastifiant est suffisant pour obtenir un mortier autoplaçant.

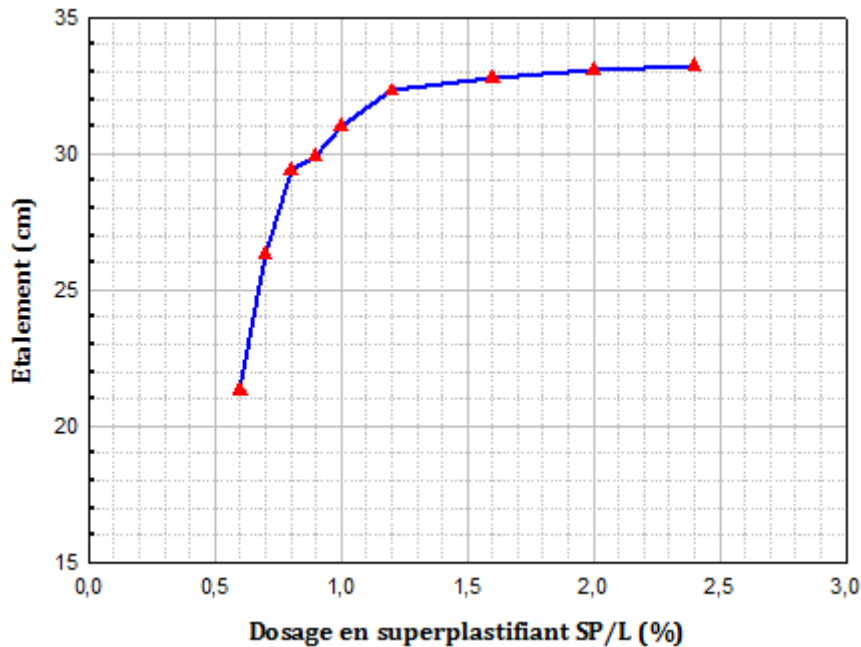


Figure 0-2 – Etalement en fonction du dosage en superplastifiant.

### III.3.2) Temps d'écoulement à travers le mini-entonnoir en V :

La figure 0-3 montre l'effet du superplastifiant sur le temps d'écoulement  $e$ . On constate une diminution du temps d'écoulement avec l'augmentation du dosage en SP pour les différents mortiers, jusqu'à un dosage de 2% où à partir duquel le temps d'écoulement commence à stabiliser, on remarque que toutes les valeurs obtenues sont à l'intérieur de la fourchette recommandée 2 – 10 secondes [126].

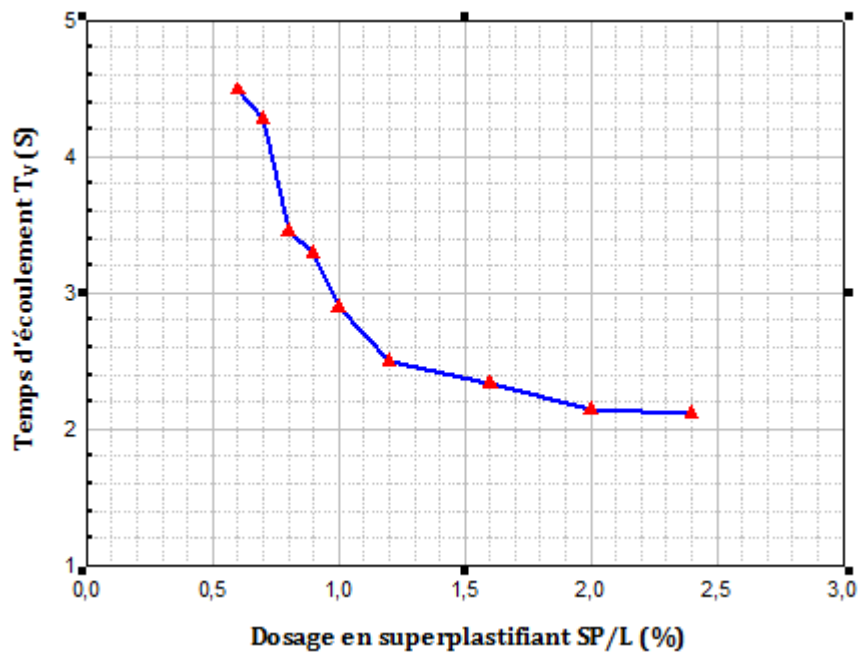


Figure 0-3 – Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant.

Les résultats d'essais d'étalement et du temps d'écoulement sur les mortiers, nous permettent de faire les conclusions suivantes :

- Un rapport  $S/M=0,4$  a donné un mortier très fluide, qui a un étalement de 35 cm et un temps d'écoulement de 1,25s qui est hors le domaine ciblé  $2 \div 10s$  ;
- Un mortier ferme a été obtenu avec un rapport  $S/M=0,6$  (pas d'étalement et temps d'écoulement infini) ;
- Des rapports  $S/M=0,5$  et  $SP/L=0,9\%$  seront utilisés dans la suite du travail, car ils ont donné un mélange fluide et homogène, qui respecte les trois critères caractérisant les MAP.

#### III.4) effet de la poudre de marbre sur les propriétés du mortier frais :

L'objectif de cette phase est d'évaluer le pourcentage optimal de poudre de marbre substitué au ciment. Le taux de substitution du ciment par poudre de marbre est de 0, 5, 10, 15, 20, 25 et 30%. La fluidité du mortier a été effectuée par l'essai d'étalement au mini cône et l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel). Les détails des proportions du mélange des différents mortiers utilisés, ainsi que les résultats d'étalement et du temps d'écoulement sont donnés dans le tableau 0-2.

Tableau 0-2 – Compositions (en poids pour 1m<sup>3</sup>) et résultats de l'étalements et du temps d'écoulement des mélanges étudiés.

Constituant	Mélange (Sable / Mortier = 0.5, SP/L=0,9%)						
	0% PM	5% PM	10% PM	15% PM	20% PM	25% PM	30% PM
<b>Poudre de marbre(Kg)</b>	0	34.48	68.76	102.84	136.71	170.38	203.83
<b>Ciment(Kg)</b>	691,65	655.17	618.88	582.775	546.85	511.13	475.60
<b>Sable (Kg)</b>	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
<b>Eau(Kg)</b>	280,33	279.54	278.75	277.957	277.15	276.34	275.52
<b>SP(Kg)</b>	6,22	6,21	6.19	6,17	6,15	6,13	6,11
<b>Étalement (cm)</b>	28,60	30.60	31,5	31,9	32	32,2	32.4
<b>Temps d'écoulement(s)</b>	3,20	3,04	2,94	2,68	2,60	2,49	2,40
<b>Observations visuelles</b>	mélange fluide et homogène	mélange fluide et homogène	mélange fluide et homogène	mélange fluide et homogène	mélange fluide et homogène	mélange fluide avec un risque de ressuaage limité	mélange trop fluide risque de ressuaage

### III.4.1) Effet de la poudre de marbre sur l'étalement :

Les résultats de l'étalement des mortiers en fonction de la teneur en poudre de marbre, sont représentés sur la figure 0-4. On remarque que l'augmentation de la teneur en PM mène à une augmentation de l'étalement du MAP. Ces résultats permettent de déduire que l'injection de la PM dans les MAP contribue significativement à l'amélioration de la déformabilité et de l'ouvrabilité du MAP.

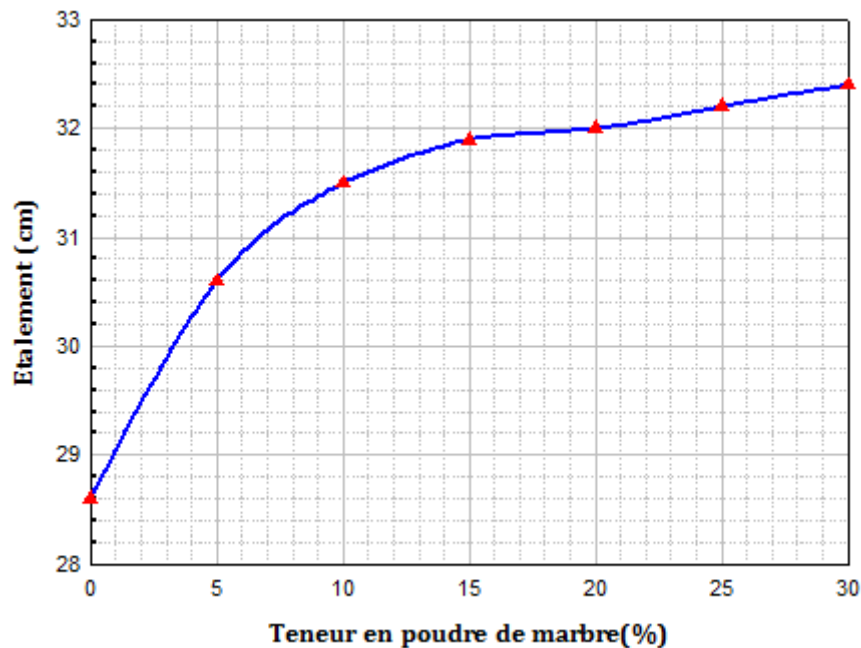


Figure 0-4 – Etalement des mortiers en fonction du dosage en poudre de marbre (PM).

Du fait que la densité de PM est moins par rapport à celle du ciment, la substitution partielle du ciment par la PM résulte un volume de pâte, ce qui a pour effet de diminuer les contacts entre les particules de sable et d'augmenter par conséquent la déformabilité du mortier [150,151]. En outre, l'augmentation de la déformabilité peut être due au fait que la PM possède une finesse plus grande que le ciment (3600 contre 3300g/cm<sup>2</sup>), ce qui améliore la granulométrie et la compacité du MAP, et par conséquent son ouvrabilité [21].

### III.4.2) Effet de la poudre de marbre sur le temps d'écoulement :

Le temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V est donné sur la Figure 0-5. On remarque d'après cette figure, qu'avec l'augmentation de la teneur en PM, le temps d'écoulement diminue. Nous remarquons que toutes les valeurs obtenues sont à l'intérieur du domaine ciblé 2÷10s [126], ce qui vient de dire que la viscosité des mélanges est adéquate.

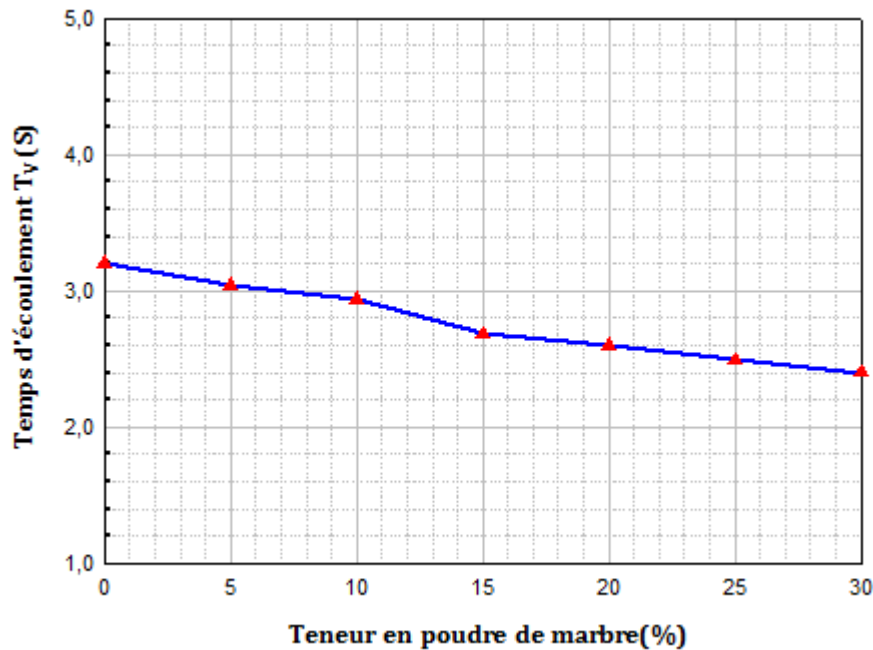


Figure 0-5 – Temps d'écoulement des mortiers en fonction du dosage en poudre de marbre (PM).

Les résultats d'essais d'étalement et du temps d'écoulement de l'effet de PM sur les MAP, nous permettent de faire les conclusions suivantes :

- Toutes les valeurs d'étalement obtenues sont à l'intérieur de la plage recommandée 27÷33cm ;
- À l'exception de deux mélanges 25PM et 30PM, tous les mélanges sont stables et ne présentent aucun risque de ressuage ou de ségrégation ;
- Les pourcentages 5% ; 10% ; 15% et 20% seront utilisés dans la phase du béton, alors que les deux pourcentages 25% et 30% sont écartés en raison du ressuage qui nuit l'homogénéité et réduit la résistance à la ségrégation du BAP.

### III.5) Effet de la poudre de marbre sur les propriétés des BAP :

Les essais effectués sur béton frais ont pour but l'étude de l'effet de la poudre de marbre sur ses propriétés rhéologiques. Les compositions des mélanges sont présentées dans le tableau 0-3, Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 0-4.

Tableau 0-3 – Compositions (en poids pour 1m<sup>3</sup>) des mélanges étudiés.

Constituant	Mélanges				
	0% PM	5% PM	10% PM	15% PM	20% PM
<b>Poudre de marbre(Kg)</b>	0	20.63	41.42	62.35	83.43
<b>Ciment(Kg)</b>	472.12	450.12	427.96	405.65	383.17
<b>Sable (Kg)</b>	882.05	882.05	882.05	882.05	882.05
<b>Gravier 8/15 (kg)</b>	540.61	540.61	540.61	540.61	540.61
<b>Gravier 3/8 (kg)</b>	272.52	272.52	272.52	272.52	272.52
<b>Eau(Kg)</b>	208.23	207.69	207.15	206.60	206.05
<b>SP(Kg)</b>	4.25	4.24	4.22	4.21	4.20

Tableau 0-4 – Résultats des essais à l'état frais pour les BAP à poudre de marbre.

Paramètre	Mélange				
	0% PM	5% PM	10% PM	15% PM	20% PM
<b>Étalement sans J-Ring (cm)</b>	70,5	71,1	72,7	73	73,5
<b>Observations visuelles</b>	mélange fluide et homogène	mélange fluide et homogène	mélange fluide et homogène	mélange fluide et homogène	mélange fluide et homogène
<b>T<sub>50</sub> sans J-Ring</b>	2,53	1,75	1,61	1,52	1,32
<b>Étalement avec J-Ring (cm)</b>	68,5	69,2	71,1	71,5	72,3
<b>B J-Ring</b>	1,52	1,5	1,35	1,32	1,22
<b>T<sub>50</sub> avec J-Ring</b>	4,09	3,63	2,4	2,22	2,01
<b>T<sub>v</sub> (s)</b>	6,61	5,96	5,72	5,41	5,07
<b>Taux de blocage</b>	0,77	0,81	0,82	0,81	0,81
<b>T<sub>20</sub> (s)</b>	0,76	0,61	0,5	0,47	0,39
<b>T<sub>40</sub> (s)</b>	1,71	1,53	1,48	1,43	1,38
<b>IS(%)</b>	5,14	6,32	6,16	11,18	13,54

### III.5.1) Effet de la poudre de marbre sur l'étalement :

L'effet de PM sur l'étalement est présenté sur la figure 0-6. D'après cette figure, on remarque que l'augmentation du taux de substitution du ciment par de PM conduit à une augmentation de la déformabilité du BAP, ce qui se traduit par la croissance du diamètre d'étalement. La meilleure déformabilité a été obtenue avec une teneur en PM de 20 %. Les valeurs obtenues varient entre 70,5 et 73.5 cm, ce qui permet de conclure que, toutes les valeurs obtenues sont à l'intérieur de la fourchette ciblée 65÷80cm [138]. Ces résultats témoignent de l'effet positif de l'utilisation de la PM dans l'objectif d'améliorer la déformabilité des BAP.

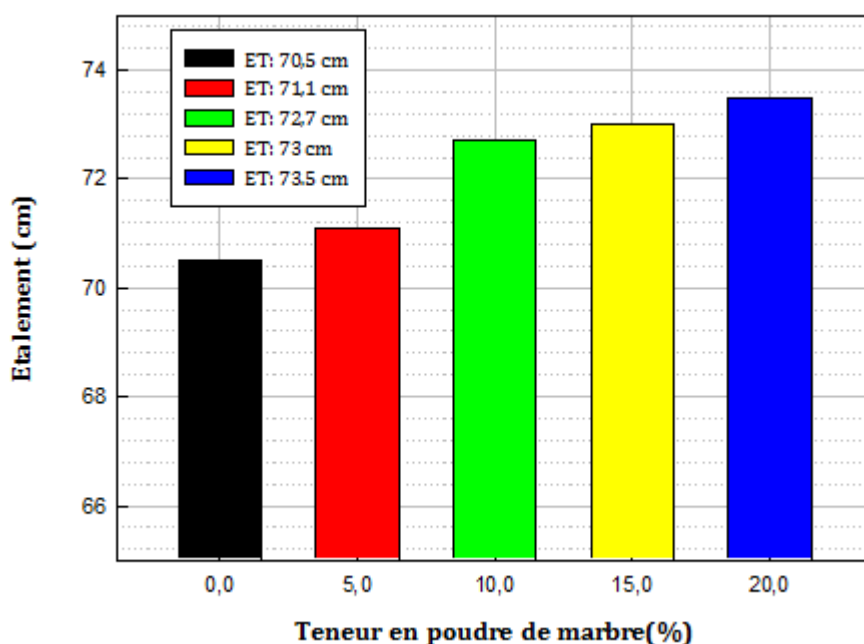


Figure 0-6 – Etalement des bétons autoplaçant à base de PM.

L'augmentation de la déformabilité peut être due à la finesse de la poudre de marbre qui est plus grande que celle du ciment. Cette finesse, qui améliore la granulométrie et la compacité, contribue de manière significative à l'amélioration de la rhéologie et la stabilité des bétons [21,152]. L'augmentation du volume de la pâte (en raison de la faible densité de la PM par rapport au ciment) permet d'écarter les particules des granulats les unes des autres conduisant à une diminution des frottements intergranulaires [150].

### III.5.2) Effet de la poudre de marbre sur la Résistance à la compression :

La figure 0-7 représente la variation de la résistance à la compression des BAP à base de poudre de marbre aux différents âges 1,7, 28, 56, et 90 jours. Nous remarquons que les meilleures résistances obtenues à tous les âges ont les résistances des BAP des références, À 28 jours la

diminution de résistance est de l'ordre de 1, 7, 27, 23 et 30% respectivement pour des contenances en PM de 5, 10, 15, et 20% par rapport au béton de référence. Cette diminution de la résistance à la compression est dû que la poudre de marbre appartient à la famille des fillers quasi inertes [12, 13, 91]. Ces fillers sont composées principalement de  $CaCO_3$ . Cet élément accélère l'hydratation du  $C_3S$ , ce qui améliore les résistances aux jeunes âges [45, 155]. Néanmoins, l'effet associé de ces fillers est la réduction du potentiel pouzzolanique qui cause la diminution des résistances à long terme [156].

Topçu et al [68] ont testé des BAP comportant la PM. Ces auteurs ont montré que la substitution du ciment par de PM conduit à une diminution de la résistance à la compression, ce qui est en conformité avec nos résultats. Les mêmes auteurs ont trouvé des résistances, à 28 jours, qui varient entre 30 et 60 MPa.

Ces résultats permettent d'utiliser chaque taux de remplacement dans une application bien définie. À titre d'exemple, des BAP contenant une teneur en PM de 20% peuvent être utilisés dans un ouvrage où la résistance souhaitée est de l'ordre de 25MPa. Pour un ouvrage nécessitant une résistance de 35MPa un taux de substitution de 10% semble adéquat.

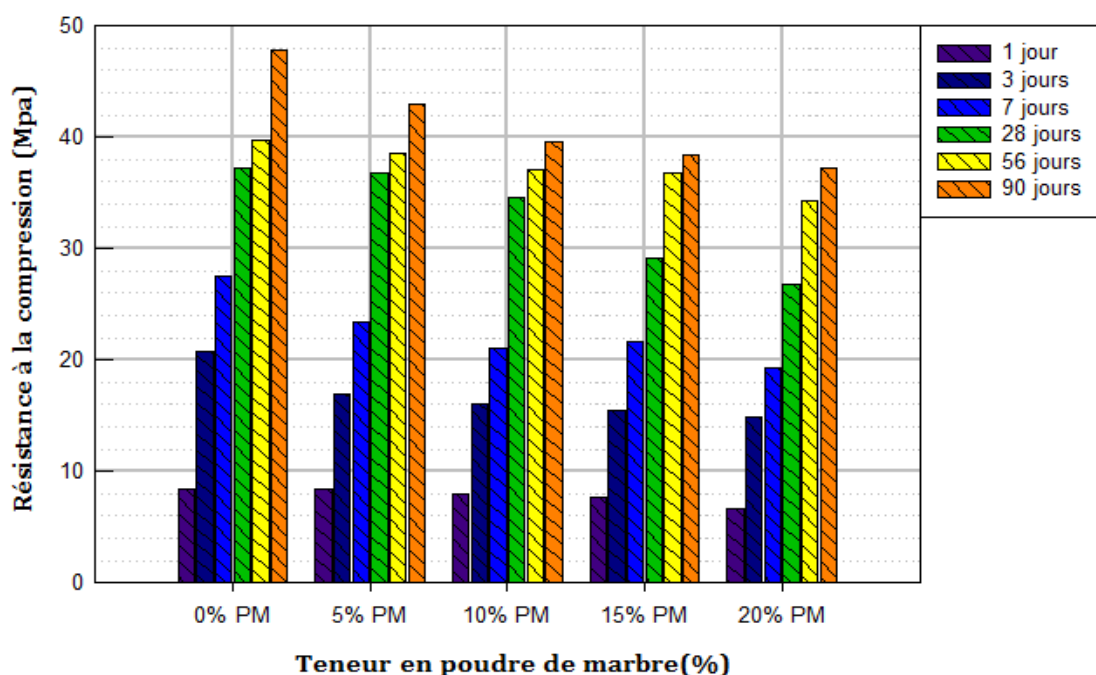


Figure 0-7 – Variation de la résistance à la compression aux différents âges.

### III.5.3) Effet de la poudre de marbre sur la Résistance à la traction :

Évolution des résistances à la traction en fonction de l'âge est présentée sur la figure 0-8. D'après les résultats obtenus on constate, pour toutes les compositions, une augmentation des

résistances à la traction en fonction de l'âge. On remarque aussi une diminution des résistances avec l'accroissement de la teneur en PM.

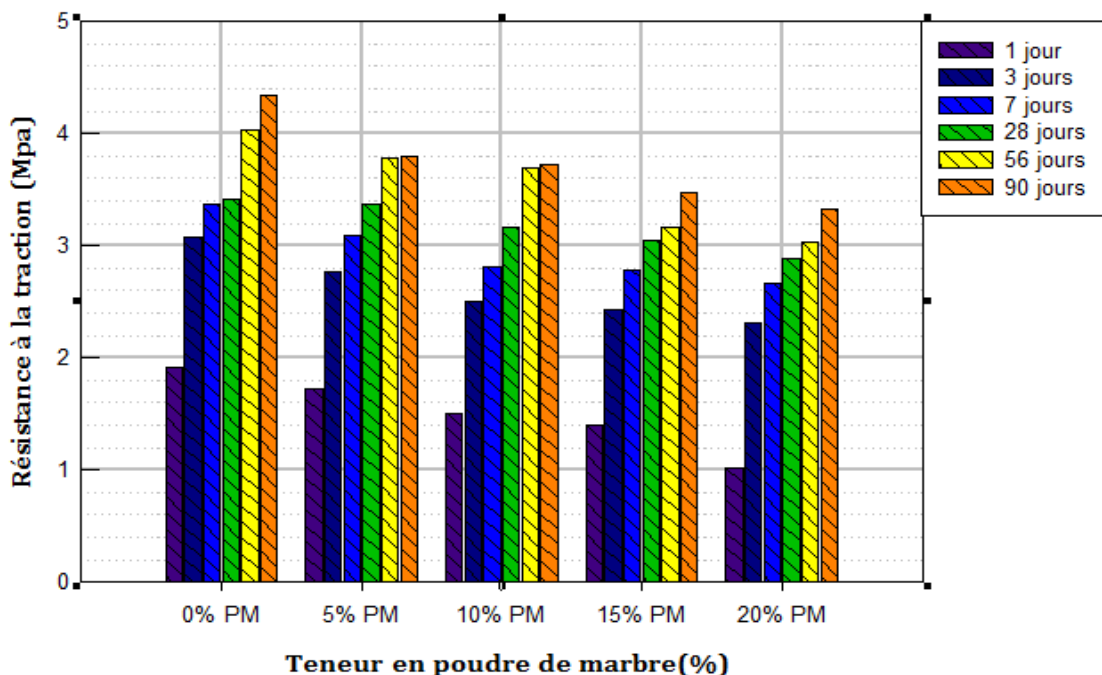


Figure 0-8 – Variation de la résistance à la traction aux différents âges.

**III.5.4) Effet de la poudre de marbre sur la masse volumique (densité) :**

La figure 0-9 illustre l'influence de PM sur la densité du BAP. D'après les résultats obtenus, on remarque une diminution de la masse volumique (densité) avec l'augmentation de la teneur en PM.

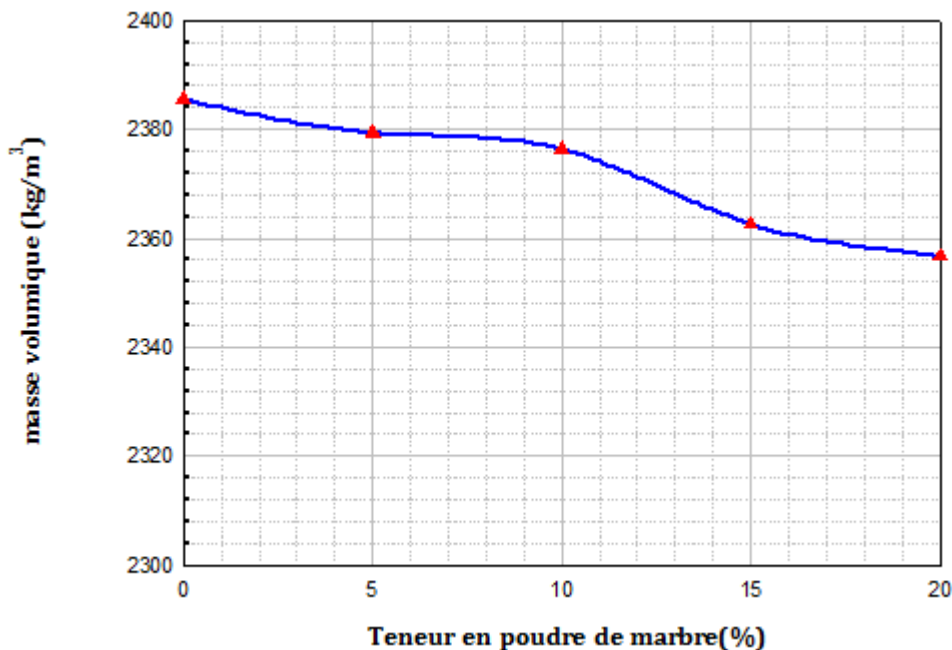


Figure 0-9 – Variation de la masse volumique (ou densité) en fonction de la teneur en PM.

Topçu et al [153] ont montré que la diminution de la masse volumique (densité) est accompagnée par une augmentation du volume d'air, ce qui réduit la compacité et augmente par conséquent la porosité du mélange. En addition, le décroissement de la densité est dû à l'utilisation d'un ajout minéral (PM) qui a une densité moins par rapport au ciment.

La diminution de la densité du BAP conduit à la réduction du poids propre des structures [13,68], ce qui permet de réduire le coût de production des BAP d'une part, et d'atténuer les effets sismiques liés aux poids des bâtiments de l'autre part.

### **III.6) Effet de la poudre de marbre sur la durabilité du BAP et MAP :**

#### **III.6.1) Introduction :**

La durabilité d'un ouvrage se caractérise par sa capacité à conserver dans les conditions prévues les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect, dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible.

Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du béton.

Nous étudions l'influence de poudre de marbre sur la durabilité des mortiers. Les principaux paramètres de durabilité étudiés sont l'absorption d'eau par capillarité et par immersion totale, la résistance vis-à-vis de l'attaque des sulfates ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et, l'attaque des acides ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{HCl}$ ) et carbonatation accélérée.

#### **III.6.2) Absorption d'eau :**

La capacité d'absorption de l'eau est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau. La capacité d'absorption permet de déterminer la porosité du béton. En effet, la connaissance de la porosité du béton s'avère utile pour pouvoir juger les différences relatives de la porosité des compositions de BAP qui sont susceptibles d'expliquer les autres caractéristiques de durabilité. Nous avons effectué deux essais d'absorption d'eau, il s'agit de l'absorption par totale (Absorption massique).

##### **III.6.2.1) Absorption capillaire :**

L'essai d'absorption d'eau par capillarité permet de suivre l'évolution de la porosité globale d'un béton. Dans ce travail, cet essai est effectué sur des prismes (4x4x16cm) soumis à une absorption d'eau unidirectionnelle.

L'influence de PM sur l'absorption d'eau par capillarité est présentée sur la figure 0-10. Les valeurs de cette figure montre une augmentation de l'absorption avec le temps, et ce pour tous les mélanges. On remarque que le mélange de référence est celui qui a le coefficient d'absorption le plus petit, alors que le coefficient d'absorption des autres mélanges est plus grand, et augmente au fur et à mesure que la teneur en PM augmente.

L'augmentation de taux de substitution de la poudre de marbre conduit à une augmentation des coefficients d'absorption des MAP, implique que mélange 20% en PM possède une porosité élevée, on obtient des mortiers poreux et moins denses. Donc moins résistants à l'infiltration des liquides.

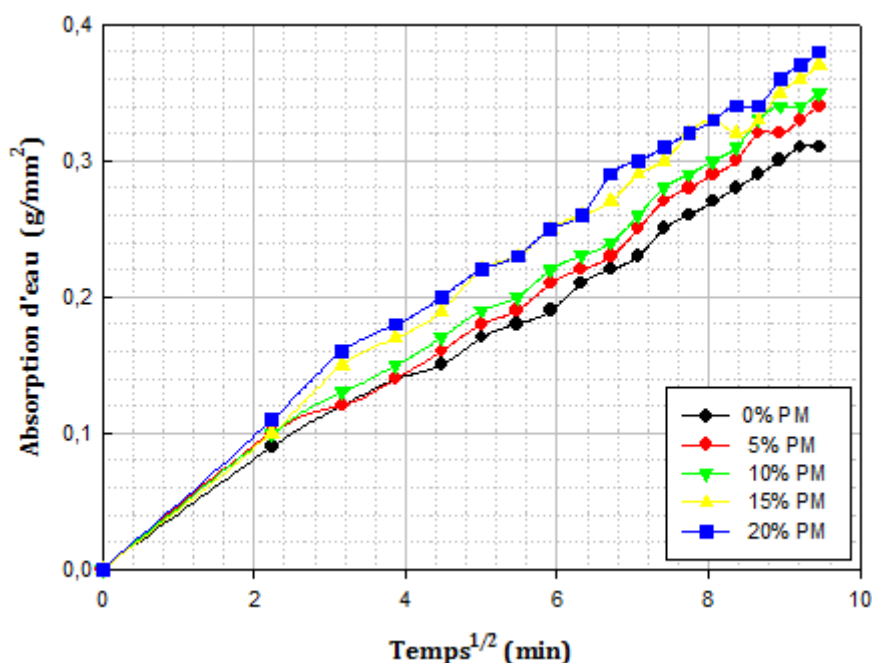


Figure 0-10 – Effet de la poudre de marbre sur l'absorption d'eau par capillarité.

### III.6.2.2) Absorption par immersion :

La mesure de la capacité d'absorption permet de mesurer la porosité ouverte du mortier. La capacité d'absorption varie en fonction du volume des pores, de leurs types et de leurs dimensions (micropores et pores capillaires).

Les résultats de l'essai d'absorption massique sont illustrés dans la figure 0-11. D'après les résultats obtenus, on remarque que l'augmentation de la quantité de PM substituée conduit à une augmentation de l'absorption d'eau.

L'absorption d'eau ou la porosité accessible à l'eau est un paramètre étroitement lié à la durabilité du matériau qui permet de quantifier le volume relatif des vides mais non sa

connectivité. Selon Assié [5] la première caractéristique qu'il convient de représenter en fonction de la résistance mécanique est la porosité accessible à l'eau. Ce paramètre est donc directement lié à la résistance mécanique du béton [157].

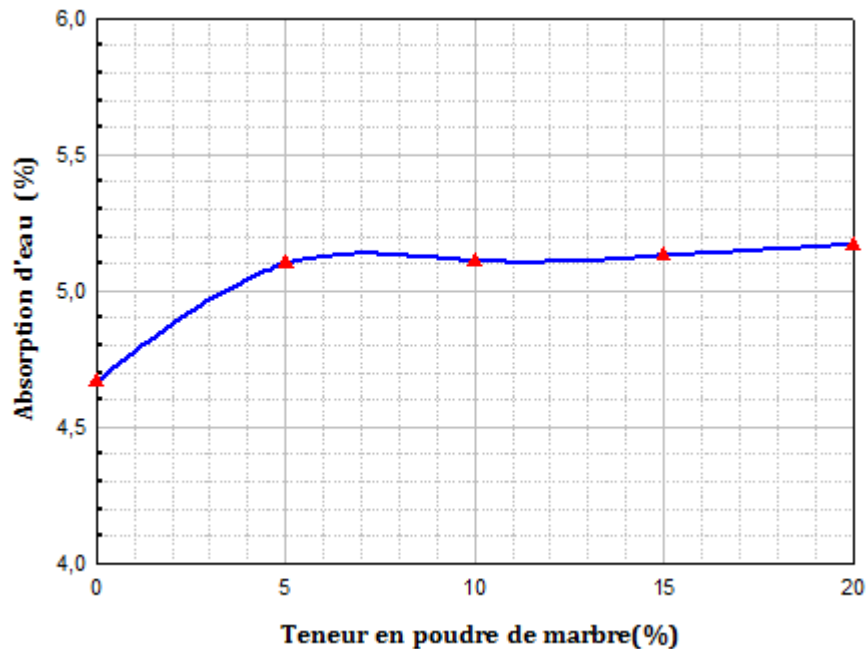


Figure 0-11 – Influence de la poudre de marbre sur l'absorption par immersion.

### III.6.3) Durabilité vis-à-vis de l'attaque des sulfates ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) :

Dans ce cas on s'intéresse à suivre la durabilité vis-à-vis de sulfates de sodium. Les mortiers sont soumis à l'immersion totale dans les solutions sulfatiques.

#### III.6.3.1) Variation en masse :

La variation en masse des mortiers immergés dans la solution du sulfate de sodium est évaluée périodiquement. La figure 0-12 montre cette variation en masse en fonction du temps. L'analyse des résultats, montre que tous les différents mortiers conservés dans la solution de 5% de sulfate de sodium ont eu un gain en masse. Ce gain est attribué à la formation du gypse et de l'ettringite secondaire suite à la réaction entre les hydrates et particulièrement la portlandite et les sulfates de la solution.

On constate que le mélange de référence est celui qui présente la valeur de gain de masse la plus mois. D'après ces résultats, on remarque également une augmentation de gain de masse au fur et à mesure que la teneur en PM augmente. Ces mortiers 5MP, 10PM, 15PM, 20PM sont caractérisés par une structure très poreuse, ce qui permet la formation et le dépôt des produits expansifs de la réaction sulfatique.

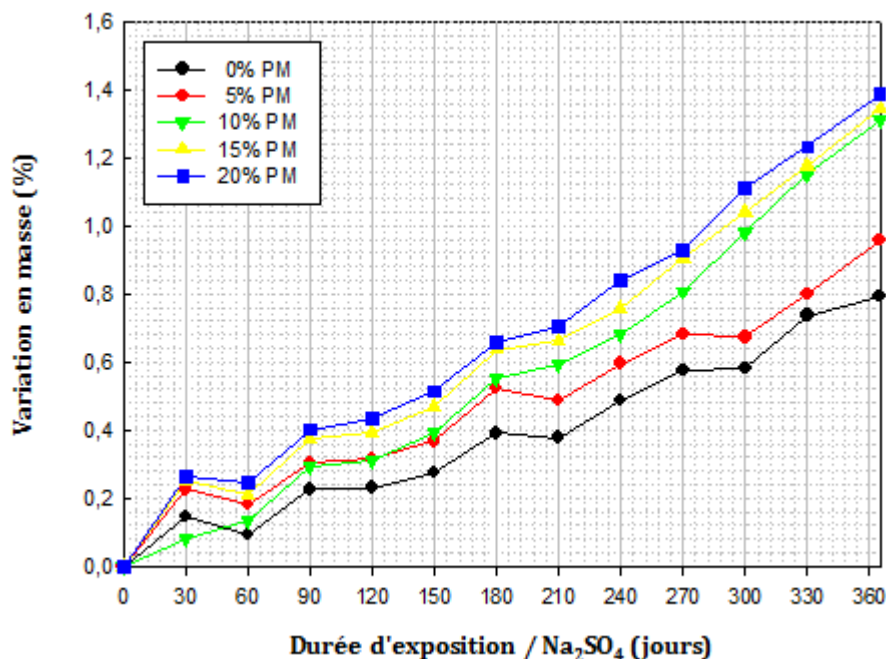


Figure 0-12 – Variation en masse des mortiers en fonction de la période d’immersion dans Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Le mortier de référence montre de faible gain de masse par rapport les mortiers à base PM, ceci dû à leur structure dense et moins poreuse (le coefficient d'absorption d'eau est faible par les autres, ce qui rend les mortiers plus étanches) qui empêche la pénétration des ions du sulfate pour réagir avec les hydrates de ciment.

Les résultats montrent que le comportement du béton dans les milieux sulfatiques dépend de la nature des agrégats et du type de ciment utilisés. Dans un environnement très sévère, l'utilisation des additions n'apporte pas toujours un effet bénéfique pour améliorer les performances vis-à-vis les dégradations [158,159].

La diffusion des ions du sulfate à l'intérieur du béton, est accompagnée avec la dissolution de la portlandite ou la décalcification des C – S – H.

Généralement, on observe une perte de la surface suivi par une chute des propriétés physiques et mécaniques [160, 161]. Les mortiers à base PM (calcaires) ont des pertes de masses supérieures à ceux des mortiers références 0%PM. Dans les réactions sulfatiques, les agrégats sont aussi impliqués dans le mécanisme surtout pour les additions calcaires qui contient un taux élevé de CaCO<sub>3</sub>, ce dernier constitue une source de calcium pour la formation de gypse et l'ettringite, et par conséquent en minimisant la dissolution du portlandite et la décalcification des C – S – H du ciment.

### III.6.3.2) Résistance à la compression :

L'évolution de la résistance des MAP contenant la PM en fonction de la période d'immersion dans la solution  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  de 5% de concentration est présentée sur la figure 0-13.

Les résultats obtenus sur des éprouvettes continuellement immergées dans la solution du sulfate de sodium de concentration 5%, montrent que le mortier de référence 0% PM a pris une allure, alors que les autres mortiers ont pris une autre allure totalement différente. En effet, la résistance du mortier de référence 0% PM présente une augmentation jusqu'à 28 jours, au-delà duquel la résistance commence à diminuer. L'augmentation de la résistance expliquée d'une part par la poursuite du phénomène de l'hydratation, et d'autre part par les réactions de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  avec la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et les aluminates de calcium hydratés et les C-S-H qui produisent deux éléments plus volumineux (le gypse et l'ettringite) que les réactants, ce qui comblent les micropores menant à une structure plus dense, ce qui influe positivement sur les résistances mécaniques. La diminution de résistance après 28 jours de ce mortier est dû à la réaction entre la portlandite issue de l'hydratation du ciment avec les sulfates pour former du gypse et de l'ettringite expansive causant des microfissures qui engendrent la réduction de la résistance [178, 179].

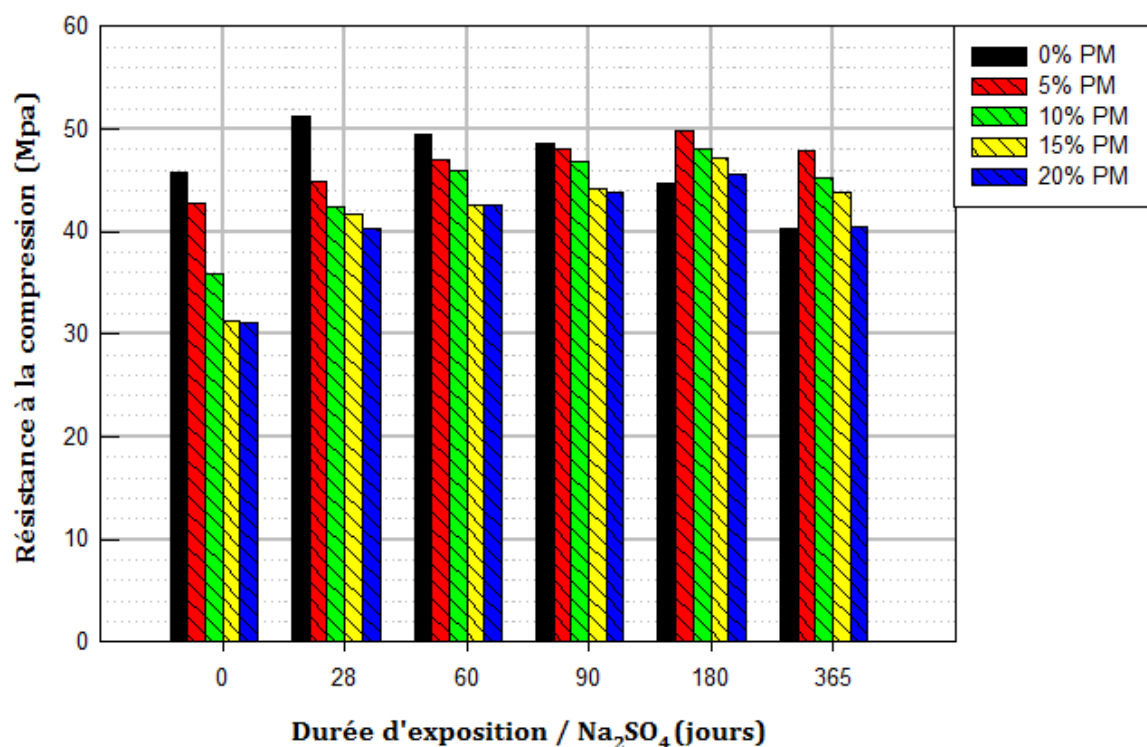


Figure 0-13 – Variation de la résistance à la compression des mortiers en fonction de la période d'immersion dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Pour les autres mortiers, on remarque une augmentation des résistances avec l'augmentation de l'âge d'immersion jusqu'à 180 jours, ce qui est due aux effets cités en haut. On constate également une diminution des résistances au fur et à mesure que la teneur en PM augmente.

En comparant les résultats du mortier de référence et ceux des mortiers contenant de PM, on constate que le mortier de référence n'a pas résisté longtemps contrairement aux autres mortiers que leurs résistances continuent à augmenter. Ceci est dû au fait que le mortier de référence contient une teneur élevée en ciment par rapport aux autres mortiers, ce qui résulte une pâte hydratée riche en portlandite, silicates de calcium hydratés, et aluminates de calcium hydratés, et comme sont ciblés par les ions de sulfate (provenant de la solution  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) important, et ses conséquences deviennent également plus graves. Au contraire, la substitution du ciment par de PM conduit non seulement à une diminution de la teneur de la pâte hydratée en portlandite, mais aussi celles des silicates de calcium hydratés et aluminates de calcium hydratés, Ces résultats témoignent de l'effet utile de l'incorporation de PM dans les BAP sulfates.

### **III.6.3.3) Examen visuel des MAP exposés à l'attaque sulfatique ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) :**

Un contrôle visuel des éprouvettes de MAP contenant la PM a été effectué après 365 jours d'immersion dans la solution  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Tous les mortiers immergés dans la solution ont les mêmes symptômes.

L'examen visuel des éprouvettes montre l'existence des fissures et des éclatements au niveau des coins et des arrêtes Ceci est dû au fait que ces lieux sont exposés à flux de pénétration des ions de sulfate, ce qui accélère leur dégradation.

La Figure 0-14 montre quelques dégradations constatées. L'apparition des fissures correspond à l'augmentation de volume des mortiers, le développement de ces fissures conduit à la dégradation des éprouvettes. On a remarqué aussi sur la surface des éprouvettes comme l'indique la figure 0-14, un dépôt blanc qui est apparu. On a pu identifier ce dépôt blanc à du gypse qui s'est formé sur la couche de surface, suite au déclenchement du mécanisme de détérioration par les sulfates.



Figure 0-14 – Examen visuel des mortiers exposés à 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

L'apparition des fissures sur la surface exposée est due à la formation des produits expansifs provoquant des contraintes de tension dans la partie centrale des éprouvettes relativement non attaquée par les sulfates, ce qui conduit au développement des fissures longitudinales et suivi par des fissures transversales et par conséquent l'éclatement et la désintégration des échantillons [89,113].

Généralement la surface supérieure d'éprouvette affectée par un ressuage. Les sulfates pénètrent facilement à travers cette face par rapport les autres, donc l'expansion sera bien développée à ce niveau. Une solution proposée c'est de diminuer le rapport E/C (augmenter la densité la teneur en  $\text{C}_3\text{A}$ ), afin d'améliorer le comportement vis-à-vis les attaques sulfatiques [79, 162].

#### **III.6.3.4) Analyse par diffraction des rayons X des mortiers exposés à l'attaque sulfatique ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) :**

L'analyse par diffraction des rayons X, est effectuée au laboratoire de physique de l'université de Laghouat, par un diffractomètre aux rayons X couplé à un système d'informatique permettant d'obtenir des diffractogrammes des échantillons analysés.

##### **III.6.3.4.1) Avant l'attaque des sulfates :**

L'identification des phases cristallines présentes dans un échantillon est effectuée par l'analyse aux rayons X, donnant les différents composés chimiques pouvant exister par la connaissance des distances réticulaire et de l'intensité des pics des diagrammes de diffraction. Pour tous les mortiers on a pris des échantillons en poudre de la couche de surface des éprouvettes aux quelles on a effectué l'essai aux rayons X, on a abouti à des diagrammes de diffractions presque identiques montrant tous l'existence des plus importantes phases avec une légère différence

dans l'intensité des pics. Le diffractogramme des mortiers conservés dans l'eau montrant les différences phases cités ci-dessous est représenté par le figure 0-15.

- Le quartz  $\text{SiO}_2$
- La Calcite  $\text{CaCO}_3$
- L'hydroxyde de Calcium  $\text{Ca(OH)}_2$  (Portlandite)
- L'ettringite

#### III.6.3.4.2) Après l'attaque des sulfates :

Le but essentiel de cette analyse est l'identification des différentes phases cristallines présentes dans un échantillon après l'exposition aux sulfates. Pour tous les différents types de mortiers, on a prélevé des échantillons en poudre de la surface des éprouvettes ayant atteintes l'âge de 365 jours. L'analyse aux rayons X, des différents mortiers après 365 jours d'immersion dans la solution du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , permet de conclure que les diffractogrammes des mortiers sont presque identiques. Les observations montrent l'apparition de deux nouvelles phases (voir figure 0-16), qui sont :

- Le gypse hydraté  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- L'ettringite secondaire de formule générale  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ .

Ces deux nouveaux composés cristallisés et expansifs, sont les résultats de la réaction des constituants de ciments avec les sulfates. Ils se sont formés à partir de germes de cristallisation dans des conditions de sursaturation de la solution environnante. Ceci peut engendrer au cours du temps des pressions de cristallisations suffisantes pour provoquer la fissuration et l'éclatement du matériau [180, 181].

Tian et Cohen [182] ont rapporté que le gypse peut provoquer l'expansion des bétons dans les environnements sulfatiques. Donc, une analyse de la microstructure est nécessaire pour déterminer la cause de l'expansion, est due à la présence du gypse ou de l'ettringite.

Irassar [183] en utilisant l'analyse par DRX, a trouvé une concentration élevée de gypse dans les couches de la surface des échantillons dégradés. La présence de l'ettringite a été détectée dans les couches internes des mêmes échantillons. Mais le gypse joue un rôle important dans le mécanisme de dégradation par des concentrations fortes des sulfates. L'existence de  $\text{CaO}$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , qui sont les deux principaux oxydes de  $\text{C}_3\text{S}$  et  $\text{C}_3\text{A}$  responsable à la formation de gypse dans un milieu riche en sulfate. Ce résultat suggère que le  $\text{C}_4\text{AF}$  peut aussi joue un rôle important dans les réactions sulfatiques.

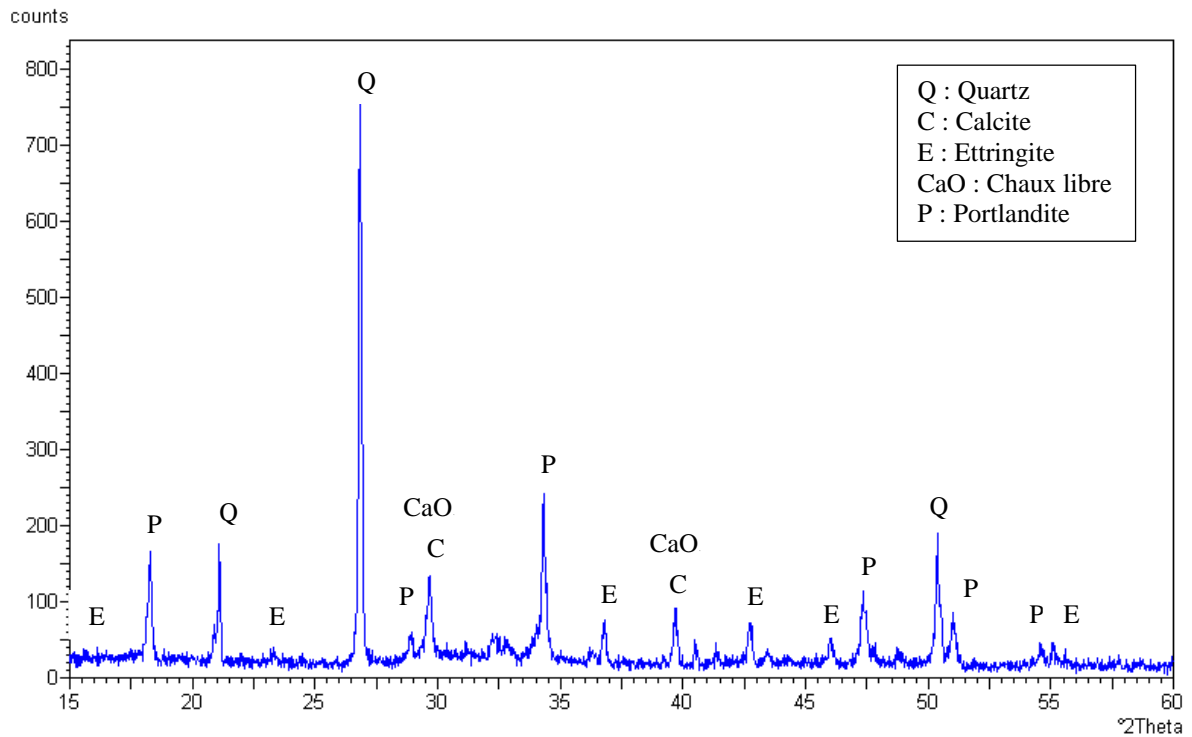


Figure 0-15 – DRX des mortiers conservés dans l’eau.

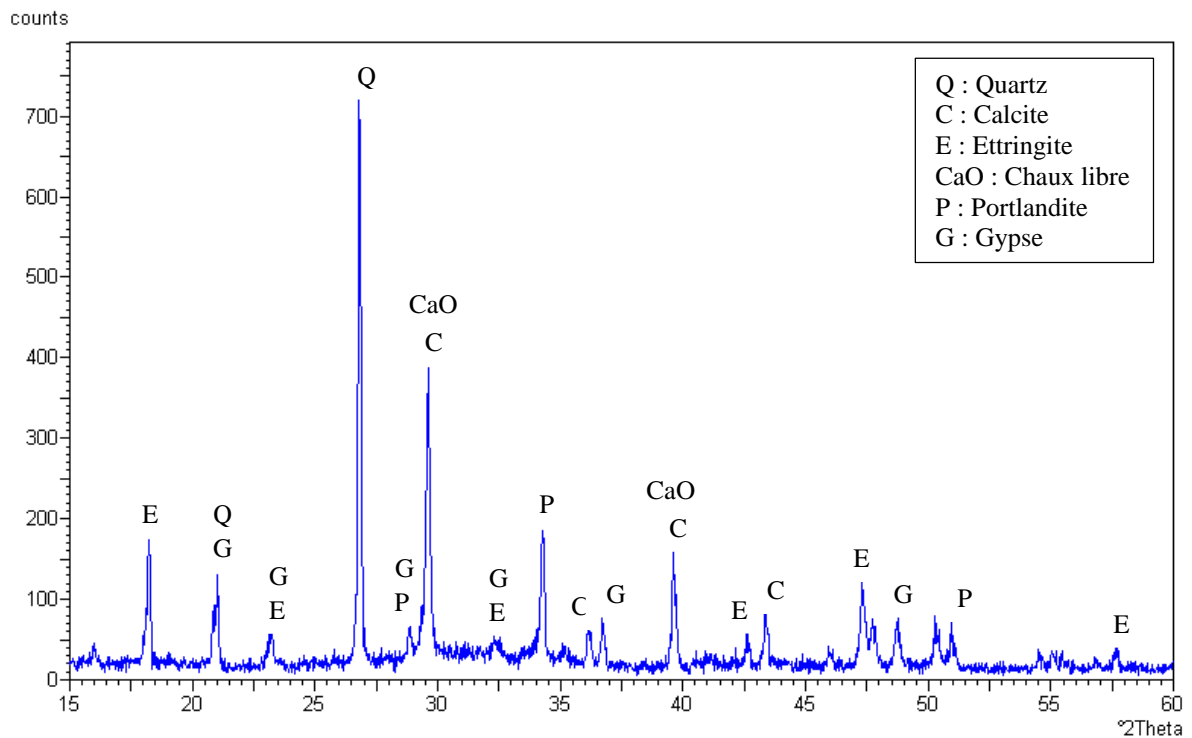


Figure 0-16 – DRX des mortiers 20% PM conservés dans les sulfates Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Khelifa [14] a analysé par DRX et par MEB sur des échantillons du BAP et BC immergés dans les solutions du sulfate de sodium (5%). L’auteur a détecté la présence de gypse dans les

échantillons du BAP étudié. L'ettringite a aussi été détecté pour les échantillons du BAP. La durabilité du béton est affectée par la formation des phases spécifiques tels que le gypse, l'ettringite, mais généralement la dégradation initiale du béton est causée par la formation de l'ettringite [184].

#### **III.6.4) Durabilité vis-à-vis de l'attaque des acides :**

La durabilité des mortiers autoplacants vis-à-vis de l'attaque des acides est analysée suivant deux types des acides : les acides sulfuriques et les acides chlorhydriques. Dans les deux cas les mortiers sont soumis à l'immersion totale.

Dans cette étude, nous évaluons l'effet de la poudre de marbre sur les propriétés des BAP dans les milieux acides. La résistance des différents mortiers a été évaluée en étudiant la perte en masse des mortiers immergés dans des solutions de 2,5% d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) et 1% d'acide chlorhydrique (HCl). L'analyse par diffraction aux rayons X (DRX)

##### **III.6.4.1) Attaque par l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) :**

###### **III.6.4.1.1) Variation en masse :**

Les pertes de masse des éprouvettes des mortiers placées dans une solution contenant 2.5%  $H_2SO_4$  est montré dans la figure 0-17.

La figure 0-17 montre la perte de masse des éprouvettes des mortiers à base de PM exposés à l'attaque de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) pendant 336 jours d'immersion totale. D'après les résultats on remarque pour tous les mortiers une perte de masse jusqu'à 336 jours, l'introduction de PM à provoquer la diminution de la perte de masse ce qui doit entraîner à l'amélioration de la résistance vis-à-vis l'attaque de l'acide sulfurique et que le mortier de référence (0%PM) présente la plus grande valeur de perte de masse de l'ordre de 47%. L'introduction de 20% de PM à diminuer la perte de masse d'une manière considérable de l'ordre de 31% par rapport à celle de mortier de référence.

Al-Tamimi et Sonebi [163] ont remarqué que les bétons autoplacants avec fillers calcaires présentent une bonne performance dans les milieux acides par rapport les bétons traditionnels. Ils ont enregistré une perte de masse de 9% pour le BAP et 21% pour le béton normal. Ceci est dû au faible rapport E/C utilisé dans le BAP et à la richesse en fillers.

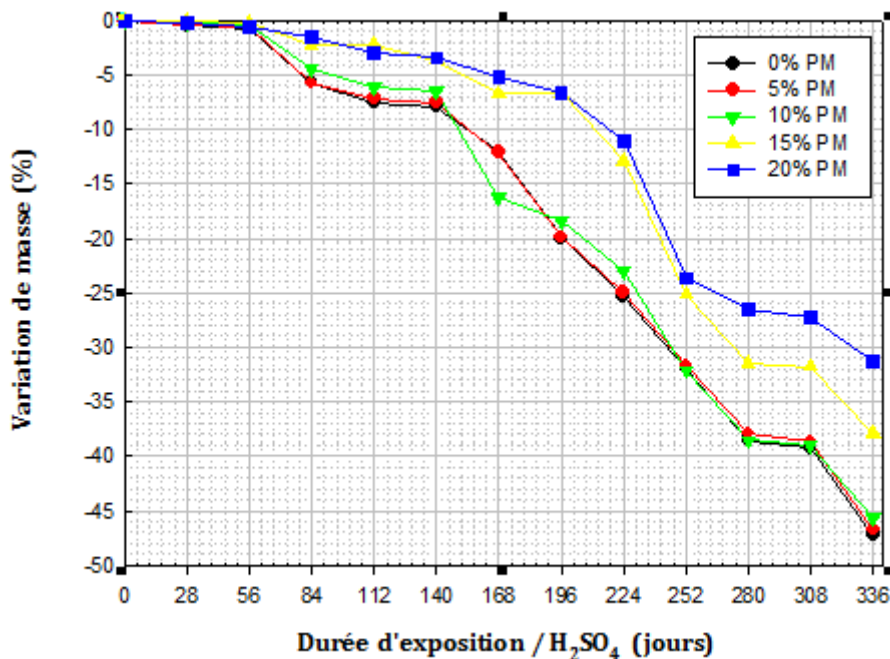


Figure 0-17 – Variation en masse des mortiers en fonction de la période d’immersion dans H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

III.6.4.1.2) L’examen visuel :

L’examen visuel des échantillons exposés à la solution d’acides, est un moyen pour évaluer leur durabilité dans les milieux agressifs. La dégradation de l’aspect extérieur donne une indication de perte des propriétés physiques et mécaniques du matériau. Les Figure 0-18 et 0-19 montrent l’état des échantillons après 336 jours d’immersion dans la solution de 2.5% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

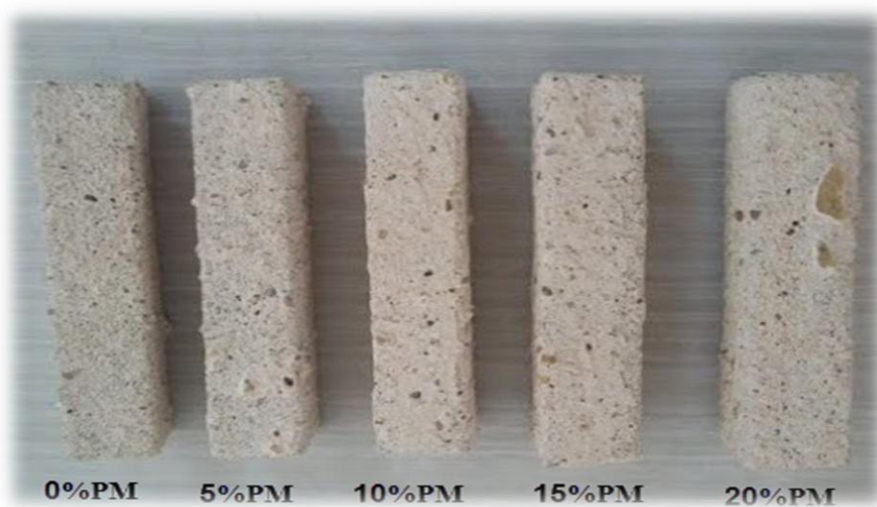


Figure 0-18 – Photos des éprouvettes après 336 jours d’immersion dans la solution de 2.5% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



Figure 0-19 – Photos des éprouvettes après 336 jours d’immersion dans la solution de 2.5% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

La figures 0-18 représente l’aspect d’un mortier de référence 0% PM et différents mortier à base PM après 336 jours d’immersion dans la solution de 2.5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Après 336 jours d’immersion le mortier de référence est nettement dégradé par rapport au mortier avec 15% et 20% de PM.

**III.6.4.2) Attaque par l’acide HCL :**

**III.6.4.2.1) Variation en masse :**

Pour l’évaluation de comportement des mortiers autoplacants à base de PM. La figure 0-20 illustre la variation de perte en masse de ces mortiers dans la solution de 1% Hcl pendant 336 jours.

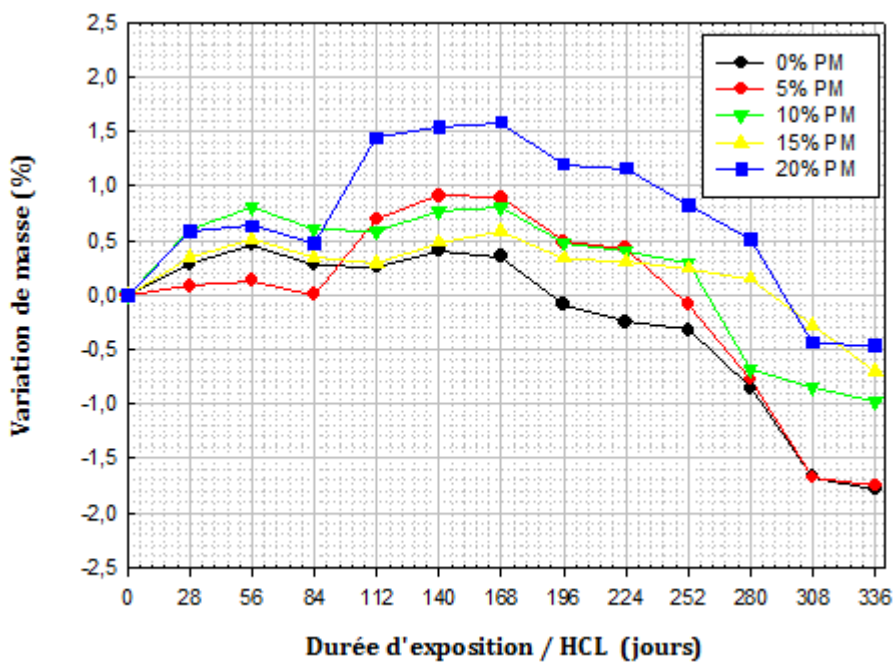


Figure 0-20 – Variation en masse des mortiers en fonction de la période d’immersion dans Hcl.

On ne constate que la substitution du ciment par la PM à diminuer la quantité de mortier perdu pendant l'attaque par les acides chlorhydrique. On constate aussi que le comportement de tous les mortiers autoplaçants affecté considérablement la perte de masse. Et le mortier de référence présente la plus grande valeur de la perte de masse à l'ordre de 1.78%. Le mortier avec 20% de la poudre de marbre légèrement perte de masse à l'ordre de 0.47%, cela signifie la bonne résistance des mortiers autoplaçant vis-à-vis l'attaque chlorhydrique.

#### III.6.4.2.2) L'examen visuel :

Les figures 0-21 et 0-22 montrent l'état des échantillons après 336 jours d'immersion dans la solution de 1% de Hcl. L'examen visuel montre que les échantillons immergés dans la solution de 1% de Hcl, ont subi à des faibles dégradations au niveau des coins et des arrêtes.

Les mortiers gardent pratiquement leur état de surface et leur forme initiale. Donc, le mécanisme de dégradation dû à l'attaque par Hcl se fait par pénétration de la solution à l'intérieur de la pâte à travers les pores de la surface exposée.

En comparant l'agressivité de  $H_2SO_4$  et Hcl, on peut conclure que la dégradation des mortiers exposés aux solutions acides est différente, ceci est dû à la différence de la concentration utilisée pour les deux acides d'une part, et d'autre part le mécanisme de dégradation est différent. En ce concerne l'attaque par  $H_2SO_4$ , ce dernier réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former le sulfate de calcium  $CaSO_4$ , qui jouent un rôle très nuisible provoquant la dégradation du mortier [53].

Pour l'attaque de Hcl, ce dernier absorbé par le mortier, va réagir rapidement avec l'hydroxyde de calcium pour donner le chlorure de calcium  $CaCl_2$ , qui est un sel soluble et moins nocif que le sulfate de calcium  $CaSO_4$  [53].



Figure 0-21 – Photos des éprouvettes après 336 jours d'immersion dans la solution de 1% de Hcl



Figure 0-22 – Photos des éprouvettes après 336 jours d’immersion dans la solution de 1% de Hcl.

### III.6.4.3) Analyse par diffraction des rayons X :

#### III.6.4.3.1) Avant l’attaque des acides :

L’identification des phases cristallines présentes dans un échantillon est effectuée par l’analyse aux rayons X, donnant les différents composés chimiques pouvant exister par la connaissance des distances réticulaire et de l’intensité des pics des diagrammes de diffraction. Pour tous les mortiers on a pris des échantillons en poudre de la couche de surface des éprouvettes ayant atteintes l’âge de 336 jours aux quelles on a effectué l’essai aux rayons X, on a abouti à des diagrammes de diffractions presque identiques montrant tous l’existence des plus importantes phases avec une légère différence dans l’intensité des pics. Le diffractogramme des mortiers conservés dans l’eau montrant les différences phases cités ci-dessous est représenté par le figure 0-23.

- Le quartz  $\text{SiO}_2$
- La Calcite  $\text{CaCO}_3$
- L’hydroxyde de Calcium  $\text{Ca(OH)}_2$  (Portlandite)
- L’ettringite

#### III.6.4.3.2) Après l’attaque des acides :

L’analyse aux rayons X, des différents mortiers après 336 jours d’immersion dans la solution des acides (Hcl ou  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), permet de conclure que les diffractogrammes des mortiers sont presque identiques. Les observations montrent l'apparition de deux nouvelles phases (voir figure 0-24, 0-25), qui sont :

- Le gypse hydraté  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- L’ettringite secondaire de formule générale  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$
- La calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) due au PM

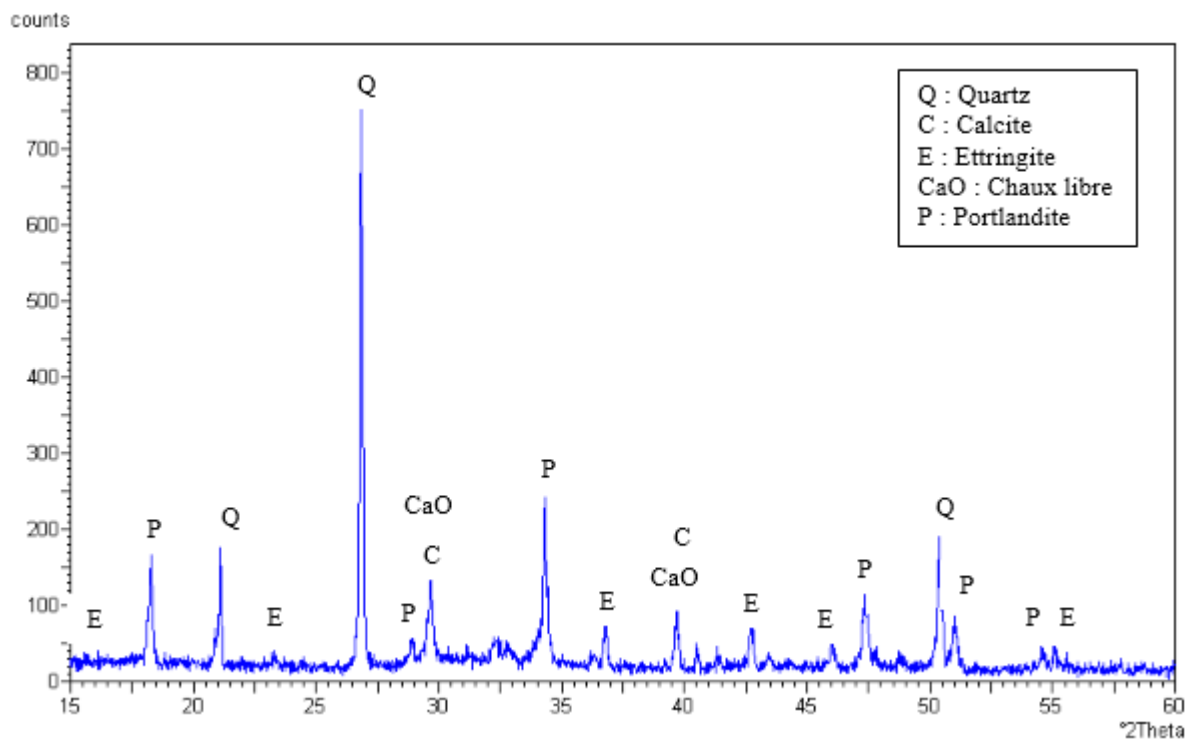


Figure 0-23 – DRX des mortiers conservés dans l’eau.

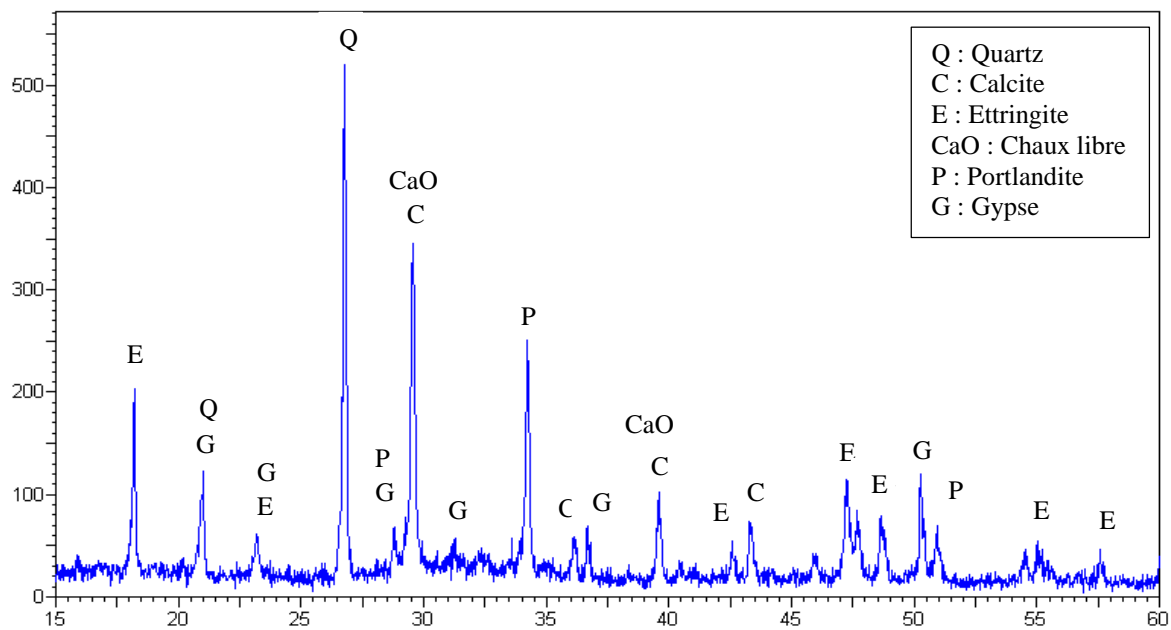


Figure 0-24 – DRX des mortiers 20% PM conservés dans l’acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

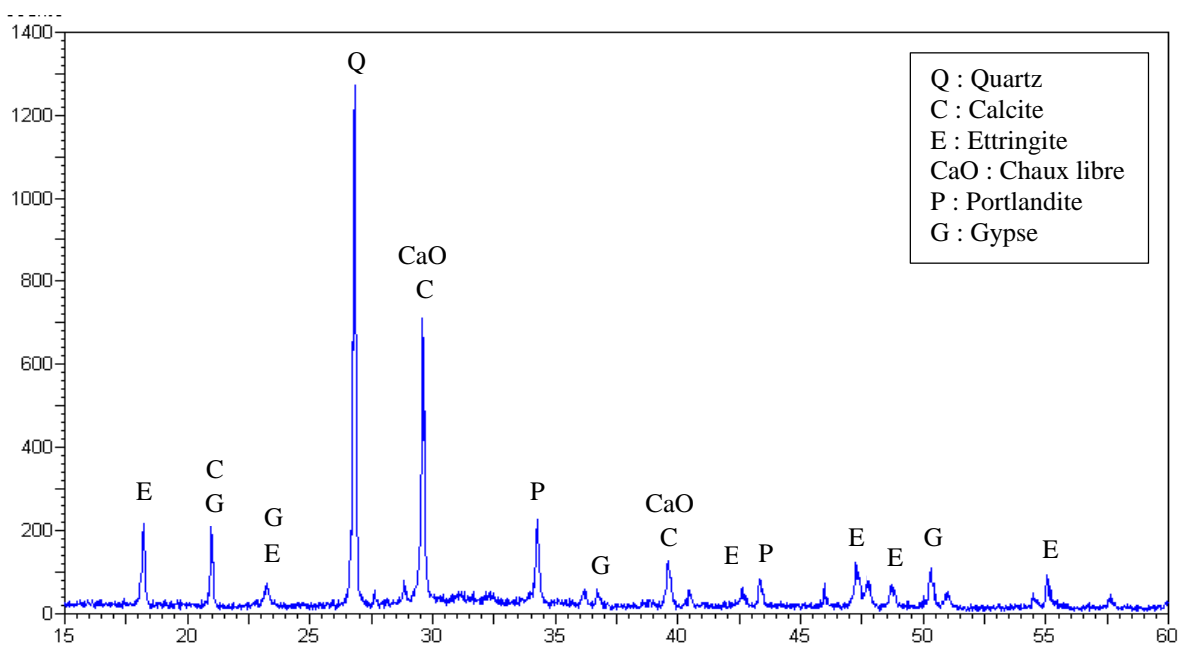


Figure 0-25 – DRX des mortiers 20% PM conservés dans l'acide Hcl

La présence d'une grande quantité de gypse explique la grande dégradation des surfaces exposées à l'acide  $H_2SO_4$ . En effet, en contact avec l'acide sulfurique, l'hydroxyde de calcium (la portlandite) réagit, pour former du sulfate de calcium qui est déposé comme gypse. En outre, le sulfate de calcium constitué par réaction va réagir avec la phase d'aluminat de calcium dans le ciment pour former du trisulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite), ce qui explique la présence de traces de cet élément, même après l'immersion dans l'acide  $H_2SO_4$  [119].

Al-Tamimi et Sonebi [163], Al-Tamimi et al. [185] ont analysé par DRX et par MEB sur des échantillons du BAP et BC immergés dans les solutions d'acide sulfurique et chlorhydrique. Dans la solution d'acide sulfurique, les auteurs [185] ont détecté la présence de gypse dans les échantillons du BAP et du BC. La thaumasite et l'ettringite ont été détecté uniquement pour les échantillons du BAP. Dans la solution d'acide chlorhydrique, la quantité de l'ettringite formée pour le BAP et BC est plus faible par rapport le cas de la solution d'acide sulfurique. Par contre, les auteurs ont remarqué une absence de gypse et de thaumasite pour les deux types de bétons. La dégradation initiale des mortiers exposés aux acides est généralement due à la formation de l'ettringite [186].

### III.6.5) Carbonatation accélérée :

Le dioxyde de carbone est l'un des agents agressifs, contenus dans l'air ambiant, qui réagit avec la pâte de ciment et dont les effets sur la durabilité du béton (armé) peuvent être néfastes. Cette espèce chimique entre en réaction avec les hydrates renfermés dans la matrice cimentaire (portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , et silicates de calcium hydratés C-S-H) pour former principalement des carbonates de calcium (ou calcite  $\text{CaCO}_3$ ).

La carbonatation du matériau béton a un effet important car elle réduit le pH de la solution interstitielle de la pâte de ciment. La diminution de PH ainsi engendrée peut conduire, dans des conditions idéales de température et d'humidité, à la dépasseivation et à la corrosion des armatures en acier.

Les bétons autoplaçants à base de poudre de marbre ont été soumis à un essai de carbonatation accélérée (voir figure 0-26). Les profondeurs de carbonatation ont été relevées périodiquement 7, 14, 28,42 et 56 jours, en pulvérisant une solution de phénolphtaléine.



Figure 0-26 – Réalisation de l'essai Carbonatation accélérée.

Comme la montre la Figure 0-27, la zone non carbonatée (saine) prend une couleur rose foncé, par contre la zone carbonatée reste incolore. La phénolphtaléine offre donc une lecture assez simple de la profondeur de carbonatation du fait que le front est net et génère de bons contrastes de couleur.



Figure 0-27 – Test à la phénolphthaléine et mesure du front de carbonatation (7x7x28 cm).

#### **III.6.5.1) Porosité accessible à l'eau :**

Ce facteur est très important comme indicateur de la carbonatation vu que le gaz carbonique pénètre dans le béton à travers ces pores. On constate que l'augmentation de taux de substitution de la poudre de marbre conduit à une augmentation des coefficients d'absorption des MAP, implique que mélange 20% en PM possède une porosité élevée, on obtient des mortiers poreux et moins denses. Donc moins résistants à l'infiltration des liquides et gaz (voir Figure 0-10 et 0-11).

#### **III.6.5.2) Etude de carbonatation :**

Deux paramètres ont été calculés, simultanément, la profondeur de carbonatation et la masse des échantillons comme indiqué ci-dessous.

##### **III.6.5.2.1) Profondeur de carbonatation :**

D'après figure 0-28 On ne constate que la substitution du ciment par la PM à augmente la profondeur de carbonatation en fonction du temps. On constate que. Et le mortier de référence présente la plus faible valeur de profondeur de carbonatation, ceci dû à leur structure dense et moins poreuse (le coefficient d'absorption d'eau est faible par les autres, ce qui rend les mortiers plus étanches). Plus le BAP est compact, plus la résistance du BAP élevée, plus la progression du front de carbonatation est lente.

Tout ce qui conduit à diminuer la porosité du béton retarde l'échéance de carbonatation, qui est mis en évidence à travers les résultats de la porosité mesurée pour les différentes compositions (voir Figure 0-10 et 0-11).

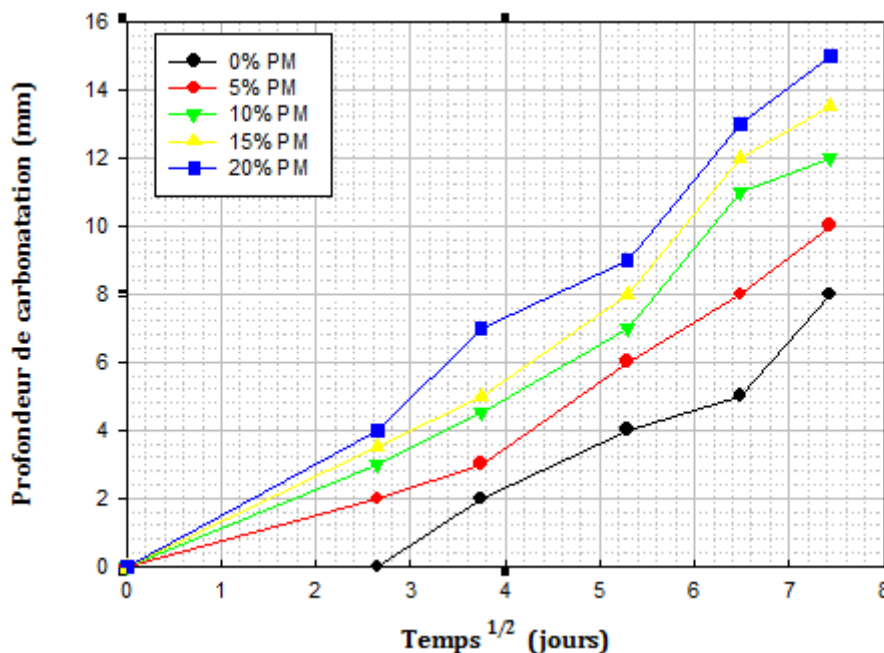


Figure 0-28 – : Profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée du temps de conservation des éprouvettes (7x7x28 cm).

#### III.6.5.2.2) Analyse par diffraction des rayons X :

Après 28 jours de conservation dans l'enceinte, des échantillons ont été pris à la surface de BAP carbonaté pour les différentes compositions du BAP carbonaté. Ils sont étudiés à l'aide d'un Diffractomètre à rayons X (DRX).

Celui-ci consiste à comparer les phases cristallines pour les différentes compositions du BAP, après la carbonatation comme indiqué sur les figures III-32 et III-33.

D'après les deux figures III-29 et III-30 illustrant les phases cristallines des échantillons de BAP carbonaté des deux compositions (5% PM et 20% PM), on remarque que les phases minéralogiques principales sont : le carbonate de calcium qui résulte suite à la carbonatation et de la portlandite. On constate aussi la présence de l'Ettringite et du C-S-H.

Vu la présence de la calcite  $\text{CaCO}_3$  sous plusieurs phase minéralogiques, on constate que les BAP de 20% PM sont plus carbonatés par rapport aux BAP 5% PM, qui possèdent une bonne compacité (moins de pores). D'autre part, la présence de la portlandite dans le BAP des deux compositions indique qu'il s'agit d'une consommation partielle de ce minéral. Puisque le prélèvement s'est fait après 28 jours, la carbonatation de la portlandite se poursuit jusqu'à sa consommation totale.

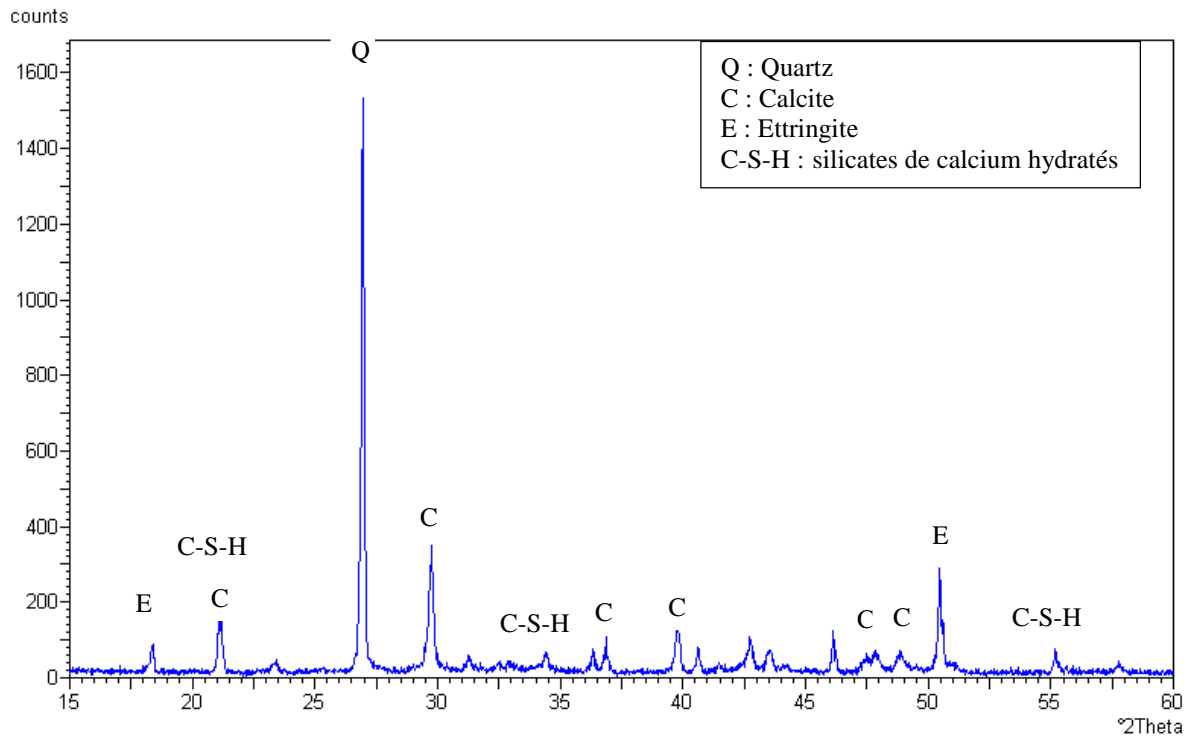


Figure 0-29 – DRX des BAP 5% PM carbonatés.

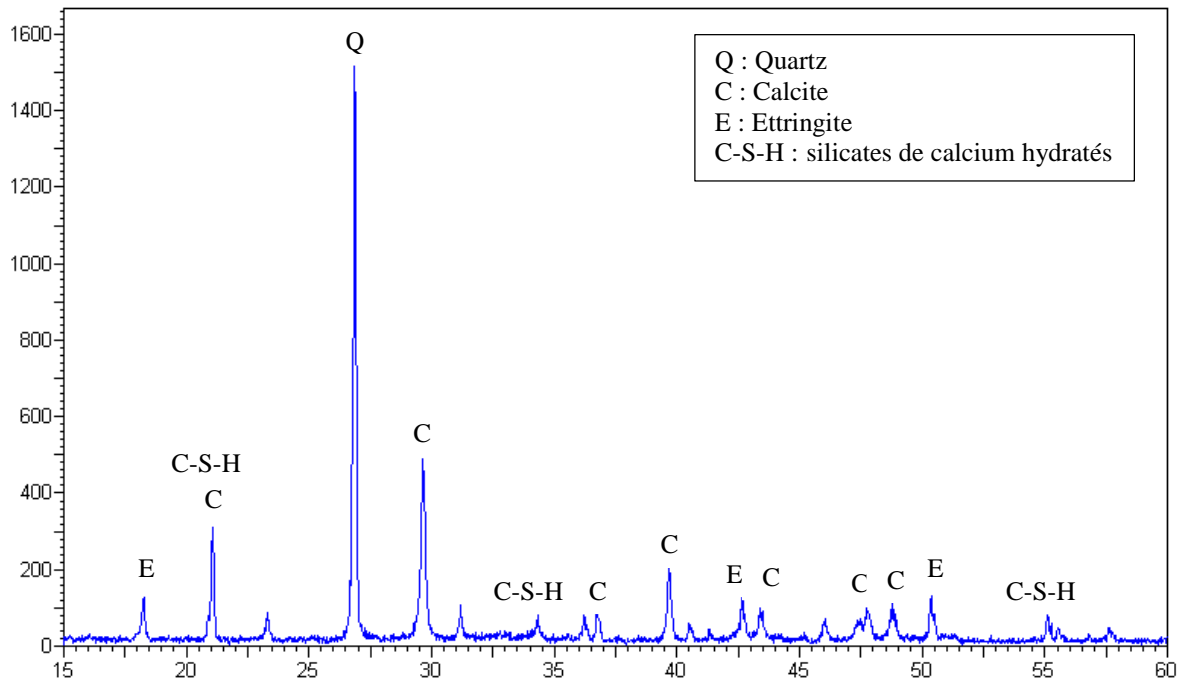


Figure 0-30 – DRX des BAP 20% PM carbonatés.

## III.6.5.2.3) Suivi de masse :

Les mesures de variations de la masse des échantillons de BAP sont calculées simultanément avec la mesure de la profondeur de carbonatation accélérée.

Les valeurs de gain de masse des BAP comportant différente teneur en PM, pour 7, 14, 28, 42 et 56 jours sont présentées sur la figure 0-31. D'après ces valeurs, on constate, pour tous les âges une augmentation de gain de masse avec l'accroissement de la teneur en PM. Cela est dû, d'une part à la production du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) suite à la carbonatation de la portlandite et d'autre part, le carbonate de calcium, qui résulte suite à la carbonatation, possède un volume molaire plus grand que celui de la portlandite comme indique le tableau III-5.

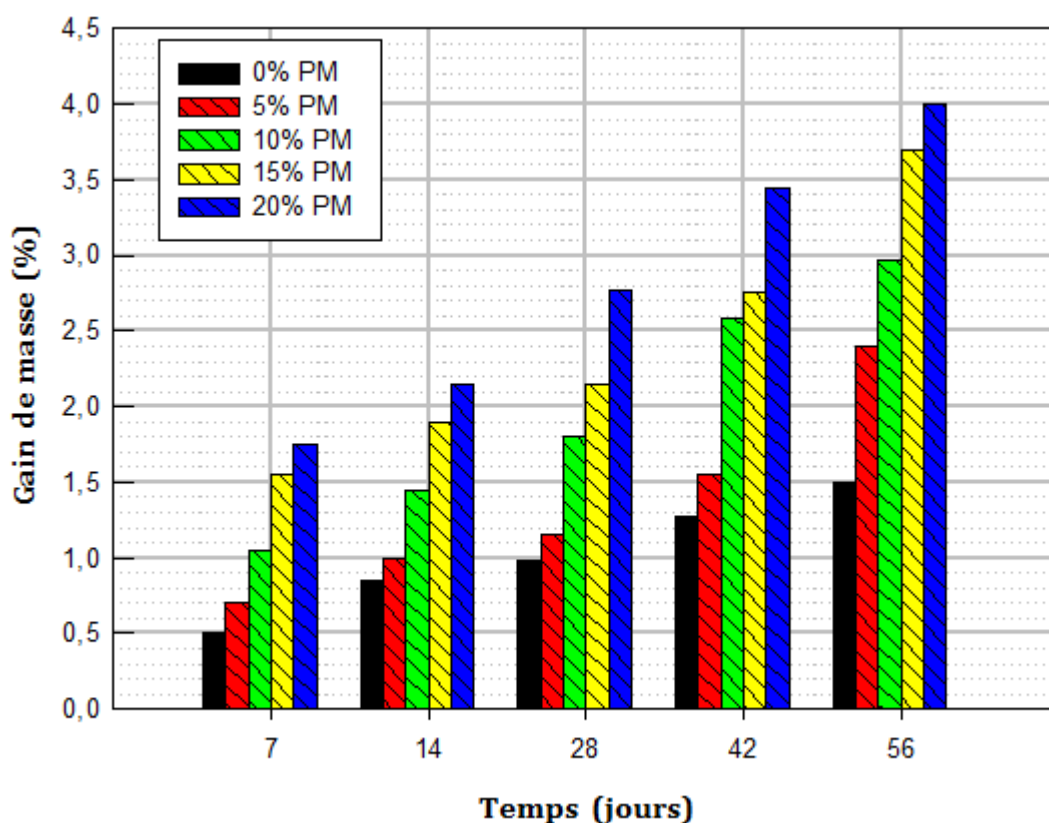


Figure 0-31 – : Gain de masse en fonction du temps de conservation des éprouvettes (7x7x28 cm).

Tableau 0-5 – Volumes molaires de la portlandite et la carbonate de calcium.

Cristaux	Formes cristallines	Volume molaire ( $\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ )
La portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$		33
Le carbonate de calcium $\text{CaCO}_3$	Calcite	35
	Vatérite	38
	Aragonite	34

Ce minéral réformé obture certains pores et le volume des plus petits pores est réduit d'un facteur 2 selon Baroghel [169]. Cette évolution de la masse volumique du béton est bénéfique puisqu'elle augmente sa résistance mécanique selon Lea [170] et colmate les pores en devenant plus compact et à l'abri des attaques des agents agressifs externes.

Nous observons que la carbonatation se traduit par une disparition de la portlandite. Ceci est compatible avec le diagnostic à la phénolphtaléine, qui montre que le pH est inférieur à 9, ce qui signifie que la portlandite a déjà été consommée. La présence de portlandite détectée en DRX est donc un bon traceur pour suivre l'avancement de la carbonatation. Ceci est bien entendu valable pour la carbonatation de la portlandite, qui est le premier stade de carbonatation.

#### IV.7) Synthèse des résultats :

Les résultats a permis de conclure que la méthode Okamura pouvait être utilisée dans dans la formulation avec un ajustement dans le pourcentage de sable dans les mortiers au lieu 40% proposé par Okamura on a trouvé qu'on doit utiliser 50% de rapport S/M.

La première phase expérimentale a été consacrée à l'étude de l'effet de la poudre de marbre sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers (MAP) et des bétons autoplacants (BAP) cette phase a permis de montrer que :

- La substitution du ciment par de la poudre de marbre a une conséquence bénéfique sur les propriétés du BAP à l'état frais telle que la déformabilité, la capacité de passage et l'ouvrabilité
- L'étalement des mortiers augmente avec l'augmentation de la teneur en poudre de marbre

- À l'état durci, l'addition de la poudre de marbre dans la composition des BAP conduit à une diminution des résistances à la compression et à la traction
- la teneur optimale en poudre de marbre est de 20%, ce pourcentage permet de produire un BAP de bonne rhéologie, de résistance à la compression similaire au béton conventionnel

La deuxième phase a pour objectif d'étudier l'influence de poudre de marbre sur la durabilité des MAP et BAP. Les principaux paramètres de durabilité étudiés sont l'absorption d'eau par capillarité et par immersion totale, la résistance vis-à-vis de l'attaque des sulfates ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et, l'attaque des acides ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{HCl}$ ) et carbonatation accélérée. Les principales conclusions que nous pouvons tirer sont les suivantes :

L'étude de l'absorption d'eau montre que l'augmentation de taux de substitution de la poudre de marbre conduit à une augmentation des coefficients d'absorption des MAP, implique que mélange 20% en PM possède une porosité élevée, on obtient des mortiers poreux et moins denses. La mesure de l'absorption d'eau est un moyen simple et facile qui permet de caractériser le mouvement de l'eau dans les matériaux. Plus l'absorption capillaire est élevée plus le matériau est susceptible à être rapidement envahi par les liquides en contact. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité.

La durabilité des mortiers vis-à-vis l'agression chimique a été évaluée par deux essais suivants :

- L'attaque par les sulfates de sodium  $\text{Na}_2\text{SO}_4$
- L'attaque par l'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et l'acide chlorhydrique  $\text{HCl}$

Les résultats montrent que l'utilisation de la poudre de marbre améliore la résistance vis-à-vis l'attaque par les sulfates de sodium.

Les résultats d'essais de l'attaque par l'acide sulfurique montre un bon comportement de résistance pour les mortiers à base de poudre de marbre vis-à-vis ce type d'attaque, et le mortier avec 20% PM présente le meilleur comportement.

Un effet similaire est remarqué pour les mortiers à base de pouzzolane exposés à une attaque par l'acide chlorhydrique mais avec une faible importance par rapport à l'attaque sulfurique.

En comparant l'agressivité de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{HCl}$ , on peut conclure que la dégradation des mortiers exposés aux solutions acides est différente, ceci est dû à la différence de la concentration utilisée pour les deux acides d'une part, et d'autre part le mécanisme de dégradation est différent. En ce qui concerne l'attaque par  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , ce dernier réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former

le sulfate de calcium  $\text{CaSO}_4$ , qui jouent un rôle très nuisible provoquant la dégradation du mortier.

Pour l'attaque de  $\text{HCl}$ , ce dernier absorbé par le mortier, va réagir rapidement avec l'hydroxyde de calcium pour donner le chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2$ , qui est un sel soluble et moins nocif que le sulfate de calcium  $\text{CaSO}_4$ .

Concernant la durabilité des BAP vis-à-vis carbonatation accélérée, Les résultats montrent que la substitution du ciment par la PM a augmenté la profondeur de carbonatation et gain de masse. Cela est dû, d'une part à la production du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) suite à la carbonatation de la portlandite et d'autres constituants. Et d'autre part, le carbonate de calcium, qui résulte suite à la carbonatation, possède un volume molaire plus grand que celui de la portlandite.

## Conclusion Générale

Les travaux de recherche de la présente thèse ont été menés dans le but d'atteindre deux principaux objectifs, le premier concerne la confection de bétons autoplaçants Binaire et d'adjuvants produit localement en Algérie et surtout en utilisant addition minérale (poudre de marbre) en abondance en Algérie. Le deuxième objectif est d'étudier l'effet d'addition de la poudre de marbre sur les propriétés rhéologique, mécanique (résistance à la compression et à la flexion) et la durabilité des BAP (résistance à des agents chimiques agressifs tels que les sulfates et les acides et carbonatation accélérée).

Suite à cette étude, nous avons pu tirer un certain nombre de conclusions relatives au comportement physico-mécanique et la durabilité des mortiers et bétons autoplaçant. Parmi ces résultats on peut citer :

- possibilité de l'utilisation de la méthode Okamura pour l'élaboration des MAP ou des BAP à base des matériaux locaux, avec un volume de sable dans les différents mélanges de 50% ;
- Un dosage en superplastifiant à base de polycarboxylates de 0,9% est convenable pour produire des mortiers et bétons autoplaçants ;
- La substitution de la poudre de marbre (5-20%) a apporté un effet bénéfique sur sur les propriétés du BAP à l'état frais telle que la déformabilité, la capacité de passage et l'ouvrabilité ;
- À l'état durci, le remplacement partiel du ciment par de la poudre de marbre mène à une diminution des résistances à la compression et à la traction et la densité ;
- la teneur optimale en poudre de marbre est de 20%, ce pourcentage permet de produire un BAP de bonne rhéologie, de résistance à la compression similaire au béton conventionnel ;
- La substitution de la poudre de marbre dans le ciment permet de réduire la quantité du ciment produite, et par conséquent le coût de production des BAP ;
- La substitution partielle du ciment par de la poudre de marbre mène à une augmentation de l'absorption de l'eau par capillarité et par immersion ;
- l'utilisation de la poudre de marbre améliore la résistance vis-à-vis l'attaque par les sulfates de sodium, on constate que le mortier de référence n'a pas résisté longtemps contrairement aux autres mortiers que leurs résistances continuent à augmenter ;

- Tous les mortiers présentent une dégradation progressive avec le temps d'immersion dans la solution acide. La substitution partielle de ciment par la PM améliore la résistance aux attaques des acides ;
- L'examen visuel a montré une faible dégradation des échantillons des mortiers conservés dans la solution HCl par rapport à ceux exposés à la solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ;
- La substitution partielle du ciment par de la PM mène à une diminution de résistance à carbonatation.

Vu les résultats obtenus de cette étude, L'incorporation partielle de la poudre de marbre dans la composition des bétons autoplaçants peut apporter une solution pour certains travaux dans les régions a ce matériau est très abondant. Le pourcentage optimal de la poudre de marbre permettant d'améliorer les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais est de 20%. Ce pourcentage peut toute fois varier de 5% à 20% à l'état durci en fonction de la résistance et la durabilité désirées.

## **Recommandations et Perspectives**

Cette recherche a été limitée à l'étude de l'influence de la poudre de marbre sur le comportement rhéologique, mécanique et durabilité des BAP. D'autres aspects restent à élucider et par conséquent, nous recommandons, pour de futurs travaux, ce qui suit :

- Etude du retrait ;
- Perméabilité à l'eau ;
- Perméabilité à oxygène ;
- Perméabilité des ions de chlorures ;
- L'effet des cycles séchage-mouillage ;
- L'effet gel-dégel.

# Annexes

---

# ANNEXE (A) : Exemple de calcul de formulation du mortier autoplaçant

## A.1 Introduction :

La formulation du mortier a été faite sous le logiciel Excel. La méthode consiste à fixer préalablement le rapport E/L par volume ( $V_{\text{eau}}/V_{\text{liant}}$ ), et de faire calculer ensuite les quantités de chaque constituant et le rapport E/L en poids. Si celui-ci se coïncide avec le rapport E/L en poids adopté dans la formulation, le rapport E/L par volume fixé au début est accepté, sinon il faut faire changer le rapport E/L en volume jusqu'à obtenir le rapport E/L en poids désiré. Bien entendu, ces étapes ne peuvent être abordées sans connaître les propriétés physiques des matériaux constituants du MAP telles que la densité, la teneur en eau, le coefficient d'absorption. La formulation des MAP est résumée comme suivant :

## A.2 Inputs :

Les inputs de cette formulation sont en plus des propriétés physiques des matériaux, le rapport sable/mortier (S/M), le dosage en superplastifiant (ou rapport SP/L) et le pourcentage d'air ( $V_{\text{air}}/V_{\text{mortier}}$ ).

### A.2.1 Les Données :

Les masses volumiques absolues des constituants :

- ✓ Ciment :  $\rho_c=3100 \text{ kg/m}^3$  ;
- ✓ Poudre de marbre :  $\rho_{pm}=2700 \text{ kg/m}^3$  ;
- ✓ Sable :  $\rho_s=2600 \text{ kg/m}^3$  ;
- ✓ Superplastifiant :  $\rho_{sp}=1070 \text{ kg/m}^3$  ;
- ✓ Eau :  $\rho_e=1000 \text{ kg/m}^3$  ;

Coefficient d'absorption du sable  $Abs= 0.60$

Le rapport Sable/mortier (S/M)=0.5

Le rapport E/Liant (E/L)=0.4 en poids Le superplastifiant (MEDAFLOW30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : %Sp=0.9% du poids de liant.

## A.3 Outputs :

Les outputs sont les quantités des divers constituants du MAP et le rapport E/L en poids. La quantité de chaque constituant est calculée comme suivant :

---

### A.3.1 Liant :

Le pourcentage en volume du liant :

$$\frac{V_{liant}}{V_{mortier}} (\%) = \frac{\left(100 - 100 \times \frac{S}{M} - \frac{V_{air}}{V_{mortier}}\right)}{\left(1 + \frac{E}{L_{par\ volume}}\right)} \quad (A.1)$$

La quantité de liant L en kg :

$$Q_{liant}(kg) = \frac{V}{100} \times \frac{V_{liant}}{V_{mortier}} \times \rho_{liant} \quad (A.2)$$

Où :  $V$  : volume du mortier en  $m^3$  et  $\rho_{liant}$  : masse volumique du liant en  $kg/m^3$ .

Si le liant est constitué entièrement du ciment, la masse volumique utilisée est celle du ciment et la quantité obtenue est aussi celle du ciment. Dans le cas où le liant est constitué du mélange binaire ou ternaire ciment + additions minérales, la masse volumique du liant est calculée selon le pourcentage de chaque élément.

### A.3.2 Sable :

La quantité de sable S en kg :

$$Q_{sable}(kg) = V \times \frac{S}{M} \times \rho_{sable} \quad (A.3)$$

Où :  $V$  : volume du mortier en  $m^3$  et  $\rho_{sable}$  : masse volumique de sable en  $kg/m^3$ .

### A.3.3 Superplastifiant :

La quantité de superplastifiant est SP :

$$Q_{sp}(kg) = \frac{\frac{SP}{L} (\%) \times Q_{liant}}{100} \quad (A.4)$$

---

### A.3.4 Eau :

L'eau ajoutée au mortier est divisée en deux parties une première partie, qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau en volume :

$$\frac{V_{eau}}{V_{mortier}} (\%) = \frac{\left(100 - 100 \times \frac{S}{M} - \frac{V_{air}}{V_{mortier}}\right)}{\left(1 + \frac{E}{L_{par\ volume}}\right)} \times \frac{E}{L_{par\ volume}} \quad (A.5)$$

La quantité d'eau théorique nécessaire au gâchage pour un volume donné  $V$  est la suivante :

$$Q_{eau\ théorique} = \frac{V}{100} \times \frac{V_{eau}}{V_{mortier}} \times \rho_{eau} \quad (A.6)$$

Où :  $V$  : volume du mortier en  $m^3$  et  $\rho_{eau}$  : masse volumique de l'eau en  $kg/m^3$ .

Cette quantité doit être corrigée pour tenir compte la teneur en eau du sable et du superplastifiant et l'absorption du sable.

$$Q_{eau\ corrigée} = Q_{eau\ théorique} + \left(Q_{sable} \times \frac{C_{sable} - \omega_{sable}}{100}\right) - \left(\frac{\alpha \times Q_{sp}}{100}\right) \quad (A.7)$$

Où :  $C_{sable}$  : coefficient d'absorption du sable en % ;  $\omega_{sable}$  : teneur en eau du sable en % ;  
 $\alpha$  : la teneur en eau du superplastifiant en %;

Le tableau suivant est une feuille d'Excel donnant la composition du MAP (outputs), une fois que les données sont introduites (inputs).

Nom du mélange	MAP 0 (100%C)	Phase 1 : Optimisation de la poudre marbre	
Date			
<b>Inputs</b>			
Constituants	Densités relatives	Coefficients d'absorptions	Teneur en eau
Sable	2,6	0,6	0,00
Ciment	3,1	/	/
Ajout 1 : poudre de marbre	2,7	/	/
Ajout 2 : Y	2,5	/	/
Ajout 3 : Z	2,9	/	/
Superplastifiant	1,07	/	70
	<b>S/M</b>	<b>0,5</b>	<input type="text"/>
	<b>SP/P</b>	<b>0,9</b>	<input type="text"/>
Composition de la poudre			
	Ciment Portland	100	<input type="text"/>
	Ajout 1 : poudre de marbre	0	<input type="text"/>
	Ajout 2 : Y	0	<input type="text"/>
	Ajout 3 : Z	0	<input type="text"/>
E/P volume	1,241	<input type="text"/>	<input type="text"/>

<b>Outputs</b>			
		<b>V(l)</b>	<b>1,20</b>
Constituants	Poids en Kg pour 1m <sup>3</sup>	Poids en g pour un volume donné	
Sable	1300,000	1560,0	
Ciment	691,656	830,0	
Ajout 1 : poudre de marbre	0,000	0,0	
Ajout 2 : Y	0,000	0,0	
Ajout 3 : Z	0,000	0,0	
Eau	280,328	336,4	
Superplastifiant	6,225	7,5	
<b>Rapport E/P en poids</b>	<b>0,400</b>		
Vérification du volume total		70% d'eau en g	235,5
Volume du sable	500,00	30% d'eau en g	100,9
Volume du ciment	223,11		
Volume de l'ajout 1	0,00		
Volume de l'ajout 2	0,00		
Volume de l'ajout 3	0,00		
Volume de l'eau	276,89		
<b>∑ volumes des constituants</b>	<b>1000,00</b>	formulation incorrecte	

---

## **ANNEXE (B) : Exemple de calcul de formulation du béton autoplaçant**

### **B.1 Introduction :**

La formulation du béton autoplaçant suit pratiquement les mêmes étapes de la formulation du mortier autoplaçant. En bref, la méthode consiste à fixe au départ le rapport E/L par volume ( $V_{\text{eau}}/ V_{\text{poudre}}$ ), et de calculer ensuite la quantité de chaque élément entrant dans la composition du BAP et le rapport E/L en poids à partir des propriétés physiques de chaque constituant. Le rapport E/L par volume doit être varié jusqu'à ce que le rapport E/L en poids se coïncide avec celui adopté dans la formulation. La méthode de formulation du BAP peut être résumée comme suivante :

### **B.2 Inputs :**

Les inputs de cette formulation sont en plus des propriétés physiques des matériaux le rapport sable/mortier par volume (ou  $V_{\text{sable}}/ V_{\text{mortier}}$ ), le dosage en superplastifiant (ou rapport SP/L), le pourcentage d'air et la compacité des gravillons.

#### **B.2.1 Les Données :**

Les masses volumiques absolues des constituants :

- ✓ Ciment :  $\rho_c=3100 \text{ kg/m}^3$  ;
- ✓ Poudre de marbre :  $\rho_{pm}=2700 \text{ kg/m}^3$  ;
- ✓ Gravier :  $\rho_g=2700 \text{ kg/m}^3$  ;
- ✓ Sable :  $\rho_s=2600 \text{ kg/m}^3$  ;
- ✓ Superplastifiant :  $\rho_{sp}=1070 \text{ kg/m}^3$  ;
- ✓ Eau :  $\rho_e=1000 \text{ kg/m}^3$  ;

Coefficient d'absorption du sable  $Abs= 0.60$

Coefficient d'absorption du gravier  $Abg= 2.30$

Le rapport Sable/mortier (S/M)=0.5

Le rapport E/Liant (E/L)=0.4 en poids Le superplastifiant (MEDAFLOW30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : %Sp=0.9% du poids de liant.

---

### B.3 Outputs :

Les outputs sont les quantités des divers constituants du BAP et le rapport E/L en poids.

La quantité de chaque constituant est calculée comme suivant :

#### B.3.1 Gravier :

En suivant la méthode générale de formulation, la quantité de gravillons est limitée à 50% de leur compacité (masse volumique compactée).

$$Q_{gravier}(kg) = 0.5 \times V \times \rho_{compactée} \quad (B.1)$$

Où :  $Q_{gravier}$  : quantité des graviers pour un volume  $V$  donné en kg,  $\rho_{compactée}$ : masse volumique compactée des graviers en kg/m<sup>3</sup> et  $V$ : volume du béton en m<sup>3</sup>.

Cette quantité qui englobe deux classes granulaires des graviers est divisée comme suit :

$$Q_{\frac{8}{15}}(kg) = \frac{2}{3} \times Q_{gravier} \quad (B.2)$$

$$Q_{\frac{3}{8}}(kg) = \frac{1}{3} \times Q_{gravier} \quad (B.3)$$

Le volume des gravillons est le suivant :

$$Q_{gravier}(l) = V_{8/15} + V_{3/8} = \left( \frac{Q_{8/15}}{\rho_{8/15}} + \frac{Q_{3/8}}{\rho_{3/8}} \right) \times 1000 \quad (B.4)$$

Le pourcentage des graviers en volume est :

$$\frac{V_{gravier}}{V_{béton}} (\%) = \frac{V_{gravier}(l)}{10} \quad (B.5)$$

#### B.3.2 Sables :

Le pourcentage du sable en volume est :

$$\frac{V_{sable}}{V_{béton}} (\%) = \frac{S}{M} \times \left(100 - \frac{V_{graviers}}{V_{béton}} - \frac{V_{air}}{V_{béton}}\right) \quad (B.6)$$

La quantité du sable pour un volume donné V est calculée par la formule suivante :

$$Q_{sable}(kg) = \frac{V}{100} \times \frac{V_{sable}}{V_{béton}} \times \rho_{sable} \quad (B.7)$$

Où : V: volume du béton en m<sup>3</sup> et  $\rho_{sable}$ :masse volumique du sable en kg/m<sup>3</sup>.

### B.3.3 Liant :

Le pourcentage en volume de Liant est calculé par la formule suivante :

$$\frac{V_{liant}}{V_{béton}} (\%) = \frac{S}{M} \times \frac{\left(100 - \frac{V_{graviers}}{V_{béton}} - \frac{V_{air}}{V_{béton}}\right)}{\left(1 + \frac{E}{L_{par\ volume}}\right)} \quad (B.8)$$

La quantité de liant pour un volume donné V est donnée comme suit :

$$Q_{liant}(kg) = \frac{V}{100} \times \frac{V_{liant}}{V_{béton}} \times \rho_{liant} \quad (B.9)$$

Où : V: volume du béton en m<sup>3</sup> et  $\rho_{liant}$ :masse volumique du liant en kg/m<sup>3</sup>.

Si le liant est constitué entièrement du ciment, la masse volumique utilisée est celle du ciment et la quantité obtenue est aussi celle du ciment. Dans le cas où le liant est constitué du mélange binaire ou ternaire ciment + additions minérales, la masse volumique du liant est calculé selon le pourcentage de chaque élément.

### B.3.4 Superplastifiant :

Connaissant le rapport SP/L (en %), la quantité du superplastifiant est calculée comme suit :

$$Q_{sp}(kg) = \frac{\frac{SP}{L} (\%) \times Q_{liant}}{100} \quad (B.10)$$

---

### B.3.5 Eau :

Le pourcentage en volume de l'eau est donné par la relation suivante :

$$\frac{V_{eau}}{V_{béton}} (\%) = \frac{S}{M} \times \frac{\left(100 - \frac{V_{graviers}}{V_{béton}} - \frac{V_{air}}{V_{béton}}\right)}{\left(1 + \frac{E}{L_{par\ volume}}\right)} \times \frac{E}{L_{par\ volume}} \quad (B.11)$$

La quantité d'eau théorique nécessaire au gâchage pour un volume donné V est la suivante :

$$Q_{eau\ théorique} = \frac{V}{100} \times \frac{V_{eau}}{V_{béton}} \times \rho_{eau} \quad (B.12)$$

Où :  $V$  : volume du mortier en  $m^3$  et  $\rho_{eau}$  : masse volumique de l'eau en  $kg/m^3$ .

Cette quantité doit être corrigée pour tenir compte la teneur en eau du sable et du superplastifiant et l'absorption du sable.

$$Q_{eau\ corrigée} = Q_{eau\ théorique} + \left(Q_{sable} \times \frac{C_{sable} - \omega_{sable}}{100}\right) - \left(\frac{\alpha \times Q_{sp}}{100}\right) \quad (B.13)$$

Où :  $C_{sable}$  : coefficient d'absorption du sable en % ;  $\omega_{sable}$  : teneur en eau du sable en % ;  
 $\alpha$  : la teneur en eau du superplastifiant en % ;

Cette quantité corrigée est divisée en deux parties, la première qui représente 70% est ajoutée au début du malaxage, alors que la deuxième partie est mélangée avec le superplastifiant, et additionnée au cours du malaxage.

Le tableau suivant est une feuille d'Excel donnant la composition du BAP (outputs), une fois que les données sont introduites (inputs).

Date de malaxage				
<b>Inputs</b>				
Constituants	Densités relatives	Coefficients d'absorptions	Teneur en eau	
Sable	2,6	0,6	0,00	
Gravier 8/15	2,7	2,3	0,00	
Gravier 3/8	2,7	1,5	0,00	
Ciment	3,1	/	/	
Ajout 1 : poudre de marbre	2,7	/	/	
Ajout 2 : Y	2,7	/	/	
Ajout 3 : Z	2,75	/	/	
Superplastifiant	1,07	/	70	
	Pourcentage de l'air (%)	1		
	Compacité du gravier	50		
	S/M	0,5		
	SP/P	0,9		
	Composition de la poudre			
	Ciment Portland	90		
	Ajout 1 : poudre de marbre	10		
	Ajout 2 : Y	0		
	Ajout 3 : Z	0		
E/P volume	1,225			
<b>Outputs</b>				

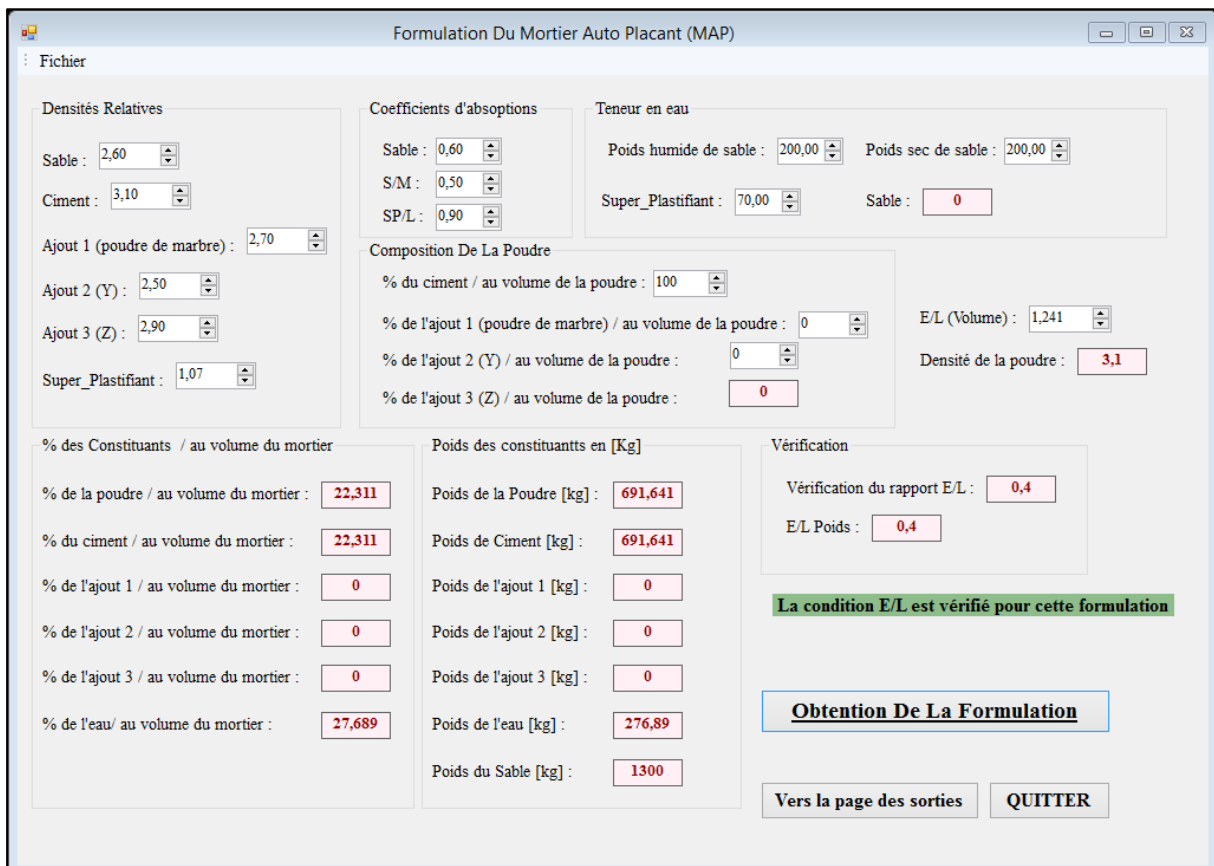
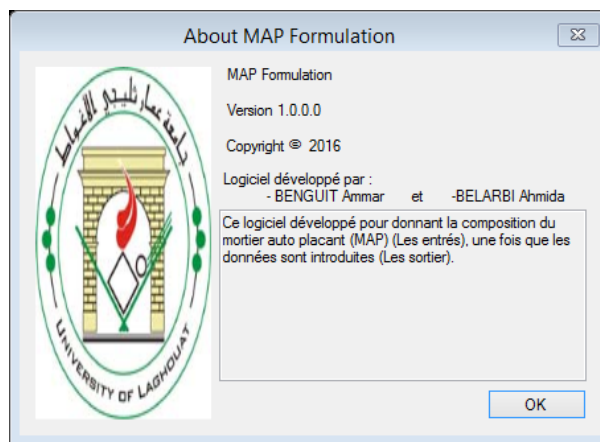
		<b>V(l)</b>	<b>10,00</b>
Constituants	Poids en Kg pour 1m <sup>3</sup>	Poids en g pour un volume donné	
Sable	882,05	8820,5	
Gravier 8/15	540,61	5406,1	
Gravier 3/8	272,52	2725,2	
Ciment	427,96	4279,6	
Ajout 1 : poudre de marbre	41,42	414,2	
Ajout 2 : Y	0,00	0,0	
Ajout 3 : Z	0,00	0,0	
Eau	207,15	2071,5	
Superplastifiant	4,22	42,2	
Rapport E/P en poids		0,400	
<b>Vérification du volume total</b>			
Volume du sable		33,925	
Volume du gravier 8/15		20,022	
Volume du gravier 3/8		10,093	
Volume du ciment		13,805	
Volume de l'ajout 1		1,534	
Volume de l'ajout 2		0,000	
Volume de l'ajout 3		0,000	
Volume de l'eau		19,360	
Volume de l'air (%)		1,000	
Σ volumes des constituants		99,739	
		70% d'eau en g 30% d'eau en g	
		formulation correcte	

## ANNEXE (C)

### C.1 Introduction :

Ce logiciel développé avec langage C# " C Sharp " sous Microsoft Visual Studio 2013 Professional qui donnant la composition du mortier auto plaçant (MAP) (Les entrés), une fois que les données sont introduites (Les sortie).

### C.2 présentation l'interface de logiciel



Densités Relatives		Coefficients d'absptions		Teneur en eau	
Sable :	2,60	Sable :	0,60	Poids humide de sable :	200,00
Ciment :	3,10	S/M :	0,50	Poids sec de sable :	200,00
Ajout 1 (poudre de marbre) :	2,70	SP/L :	0,90	Super_Plastifiant :	70,00
Ajout 2 (Y) :	2,50	Composition De La Poudre		Sable :	0
Ajout 3 (Z) :	2,90	% du ciment / au volume de la poudre :	100	E/L (Volume) :	1,241
Super_Plastifiant :	1,07	% de l'ajout 1 (poudre de marbre) / au volume de la poudre :	0	Densité de la poudre :	3,1
% des Constituants / au volume du mortier		Poids des constituants en [Kg]		Vérification	
% de la poudre / au volume du mortier :	22,311	Poids de la Poudre [kg] :	691,641	Vérification du rapport E/L :	0,4
% du ciment / au volume du mortier :	22,311	Poids de Ciment [kg] :	691,641	E/L Poids :	0,4
% de l'ajout 1 / au volume du mortier :	0	Poids de l'ajout 1 [kg] :	0	<b>La condition E/L est vérifié pour cette formulation</b>	
% de l'ajout 2 / au volume du mortier :	0	Poids de l'ajout 2 [kg] :	0	<b>Obtention De La Formulation</b>	
% de l'ajout 3 / au volume du mortier :	0	Poids de l'ajout 3 [kg] :	0	Vers la page des sorties	
% de l'eau / au volume du mortier :	27,689	Poids de l'eau [kg] :	276,89	QUITTER	
		Poids du Sable [kg] :	1300		

Formulation Du Mortier Auto Placant (MAP)

Fichier

Mélange en poids pour un volume V [L]=1000 [L] :

Volume en [L] pour 1[m <sup>2</sup> ]	Poids en [Kg] pour 1[m <sup>2</sup> ]	Poids du mélange en [Kg] pour 1[m <sup>2</sup> ] après la correction :
Sable : 500	Sable : 1300	Sable : 1300
Ciment : 223,11	Ciment : 691,641	Ciment : 691,641
Ajout 1 (poudre de marbre) : 0	Ajout 1 (poudre de marbre) : 0	Ajout 1 (poudre de marbre) : 0
Ajout 2 (Y) : 0	Ajout 2 (Y) : 0	Ajout 2 (Y) : 0
Ajout 3 (Z) : 0	Ajout 3 (Z) : 0	Ajout 3 (Z) : 0
Eau : 276,89	Eau : 276,89	Eau : 280,33
Super_Plastifiant : 0	Super_Plastifiant : 6,224769	Super_Plastifiant : 6,224769

Vérification du volume du mélange : 1000

Coefficients de correction :

Sable : -7,8 Super\_Plastifiant : 4,36

Mélange en poids pour un volume V [L] :

Volume en [L]	Poids en [g]	Volume du mélange (MAP) à mesurer
Sable : 0,6	Sable : 1560	1,20
Ciment : 0,27	Ciment : 829,97	Poids d'eau en [g] :
Ajout 1 (poudre de marbre) : 0	Ajout 1 (poudre de marbre) : 0	70% d'eau en [g] : 235,48
Ajout 2 (Y) : 0	Ajout 2 (Y) : 0	30% d'eau en [g] : 100,92
Ajout 3 (Z) : 0	Ajout 3 (Z) : 0	
Eau : 0,31	Eau : 336,4	
Super_Plastifiant : 0,01	Super_Plastifiant : 7,47	

Volume total du mélange (MAP) : 1,19 Poids total du mélange (MAP) : 2733,84

Vers la page des entrés QUITTER

### D.3Présentation scripte générale de logiciel :

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
```

```
namespace MAP_Formulation
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
```

```
// Hide Tab Header on C# TabControl
```

```
tabControl1.Appearance = TabAppearance.FlatButtons;
tabControl1.ItemSize = new Size(0, 1);
tabControl1.SizeMode = TabSizeMode.Fixed;

button2.Enabled = false;
}
```

```
private void numericUpDown3_ValueChanged(object sender, EventArgs e)
{
    textBox8.Text = (100 - Convert.ToSingle(numericUpDown3.Value) -
Convert.ToSingle(numericUpDown4.Value) - Convert.ToSingle(numericUpDown5.Value)).ToString();
```

```

    }

privatevoid numericUpDown4_ValueChanged(object sender, EventArgs e)
{
    textBox8.Text = (100 - Convert.ToSingle(numericUpDown3.Value) -
Convert.ToSingle(numericUpDown4.Value) - Convert.ToSingle(numericUpDown5.Value)).ToString();
}

privatevoid numericUpDown5_ValueChanged(object sender, EventArgs e)
{
    textBox8.Text = (100 - Convert.ToSingle(numericUpDown3.Value) -
Convert.ToSingle(numericUpDown4.Value) - Convert.ToSingle(numericUpDown5.Value)).ToString();
}

privatevoid button1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    textBox22.Text = Math.Round((((Convert.ToSingle(numericUpDown8.Value) *
Convert.ToSingle(numericUpDown3.Value)) + (Convert.ToSingle(numericUpDown9.Value) *
Convert.ToSingle(numericUpDown4.Value)) + (Convert.ToSingle(numericUpDown10.Value) *
Convert.ToSingle(numericUpDown5.Value)) + (Convert.ToSingle(numericUpDown11.Value) *
Convert.ToSingle(textBox8.Text))) / 100),2).ToString();
    textBox9.Text = Math.Round((100 * (1 - Convert.ToSingle(numericUpDown1.Value)) / (1 +
Convert.ToSingle(numericUpDown6.Value))),3).ToString();
    textBox13.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox9.Text) *
Convert.ToSingle(numericUpDown3.Value) / 100),3).ToString();
    textBox14.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown4.Value) *
Convert.ToSingle(textBox9.Text) / 100),3).ToString();
    textBox15.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown5.Value) *
Convert.ToSingle(textBox9.Text) / 100),3).ToString();
    textBox16.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox8.Text) * Convert.ToSingle(textBox9.Text) /
100),3).ToString();
    textBox10.Text = Math.Round((100 * ((1 - Convert.ToSingle(numericUpDown1.Value)) *
Convert.ToSingle(numericUpDown6.Value)) / (1 + Convert.ToSingle(numericUpDown6.Value))),3).ToString();
    textBox20.Text = Math.Round((10 * Convert.ToSingle(textBox22.Text) *
Convert.ToSingle(textBox9.Text)),3).ToString();
    textBox17.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown3.Value) *
Convert.ToSingle(textBox20.Text) / 100),3).ToString();
    textBox18.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown4.Value) *
Convert.ToSingle(textBox20.Text) / 100),3).ToString();
    textBox19.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown5.Value) *
Convert.ToSingle(textBox20.Text) / 100),3).ToString();
    textBox21.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown11.Value) *
Convert.ToSingle(textBox8.Text) / 100),3).ToString();
    textBox11.Text = Math.Round((10 * Convert.ToSingle(textBox10.Text)),3).ToString();
    textBox12.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown1.Value) *
Convert.ToSingle(numericUpDown7.Value) * 1000),3).ToString();

// verification E/P
    textBox23.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox10.Text) / Convert.ToSingle(textBox9.Text) /
Convert.ToSingle(textBox22.Text)),3).ToString();
    textBox24.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox11.Text) /
Convert.ToSingle(textBox20.Text)),3).ToString();

if(textBox23.Text == textBox24.Text)
{
    label78.Text = "La condition E/L est vérifié pour cette formulation";

// la couleur de text dans Label
    label78.ForeColor = Color.FromArgb(0, 0, 0);

// la couleur de Fond dans Label

```

```

label78.BackColor = Color.DarkSeaGreen;

        button2.Enabled = !false;

        textBox1.Text = (1000 * Convert.ToSingle(numericUpDown7.Value) *
Convert.ToSingle(numericUpDown1.Value)).ToString();
        textBox2.Text = (Convert.ToSingle(textBox20.Text) * Convert.ToSingle(numericUpDown3.Value) /
100).ToString();
        textBox3.Text = (Convert.ToSingle(textBox20.Text) * Convert.ToSingle(numericUpDown4.Value) /
100).ToString();
        textBox4.Text = (Convert.ToSingle(textBox20.Text) * Convert.ToSingle(numericUpDown5.Value) /
100).ToString();
        textBox5.Text = (Convert.ToSingle(textBox20.Text) * Convert.ToSingle(textBox8.Text) / 100).ToString();
        textBox6.Text = textBox11.Text;
        textBox7.Text = (Convert.ToSingle(textBox20.Text) * Convert.ToSingle(numericUpDown2.Value) /
100).ToString();

        textBox24.Text = Math.Round(Convert.ToSingle(textBox24.Text), 3).ToString();
        textBox23.Text = Math.Round(Convert.ToSingle(textBox23.Text), 3).ToString();

// Volume en [L] pour 1[m³]

textBox31.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown1.Value) * 1000) , 2).ToString();
        textBox30.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox17.Text) /
Convert.ToSingle(numericUpDown8.Value)) , 2).ToString();
        textBox29.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox18.Text) /
Convert.ToSingle(numericUpDown9.Value)) , 2).ToString();
        textBox28.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox19.Text) /
Convert.ToSingle(numericUpDown10.Value)) , 2).ToString();
        textBox27.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox21.Text) /
Convert.ToSingle(numericUpDown11.Value)) , 2).ToString();
        textBox26.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox10.Text) * 10) , 2).ToString();

// Coefficients de correction pour sable
        textBox32.Text = Math.Round((((Convert.ToSingle(textBox40.Text) -
Convert.ToSingle(numericUpDown13.Value)) * Convert.ToSingle(textBox12.Text)) / 100) , 2).ToString();

// Coefficients de correction pour Super_Plastifiant
textBox25.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown16.Value) * Convert.ToSingle(textBox7.Text) /
100) , 2).ToString();

// Poids du mélange en [Kg] pour 1[m³] après la correction
        textBox39.Text = textBox1.Text;
        textBox38.Text = textBox2.Text;
        textBox37.Text = textBox3.Text;
        textBox36.Text = textBox4.Text;
        textBox35.Text = textBox5.Text;
textBox34.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox6.Text) - (Convert.ToSingle(textBox32.Text) +
Convert.ToSingle(textBox25.Text))) , 2).ToString();
        textBox33.Text = textBox7.Text;

// Vérification du volume du mélange
textBox41.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox26.Text) + Convert.ToSingle(textBox27.Text) +
Convert.ToSingle(textBox28.Text) + Convert.ToSingle(textBox29.Text) + Convert.ToSingle(textBox30.Text) +
Convert.ToSingle(textBox31.Text)), 2).ToString();

// Vérification du volume du mélange après la correction
textBox42.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox33.Text) + Convert.ToSingle(textBox34.Text) +
Convert.ToSingle(textBox35.Text) + Convert.ToSingle(textBox36.Text) + Convert.ToSingle(textBox37.Text) +
Convert.ToSingle(textBox38.Text) + Convert.ToSingle(textBox39.Text)), 2).ToString();
    }
else
    {
        label78.Text = "La condition E/L non vérifié pour cette formulation";
    }

```

---

```

// la couleur de text dans Label
    label78.ForeColor = Color.FromArgb(0, 0, 0);

// la couleur de Fond dans Label
label78.BackColor = Color.Red;

        button2.Enabled = false;
    }
}

private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
{
}

private void numericUpDown14_ValueChanged(object sender, EventArgs e)
{
// Teneuren eau pour Sable
    textBox40.Text = Math.Round(((Convert.ToSingle(numericUpDown14.Value) -
Convert.ToSingle(numericUpDown15.Value)) * 100 / (Convert.ToSingle(numericUpDown15.Value))), 3).ToString();
}

private void numericUpDown15_ValueChanged(object sender, EventArgs e)
{
// Teneuren eau pour Sable
    textBox40.Text = Math.Round(((Convert.ToSingle(numericUpDown14.Value) -
Convert.ToSingle(numericUpDown15.Value)) * 100 / (Convert.ToSingle(numericUpDown15.Value))), 3).ToString();
}

private void numericUpDown17_ValueChanged(object sender, EventArgs e)
{
// Mélange enpoids
    textBox56.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown17.Value) *
Convert.ToSingle(textBox39.Text)), 2).ToString();
    textBox55.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown17.Value) *
Convert.ToSingle(textBox38.Text)), 2).ToString();
    textBox54.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown17.Value) *
Convert.ToSingle(textBox37.Text)), 2).ToString();
    textBox53.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown17.Value) *
Convert.ToSingle(textBox36.Text)), 2).ToString();
    textBox52.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown17.Value) *
Convert.ToSingle(textBox35.Text)), 2).ToString();
    textBox51.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown17.Value) *
Convert.ToSingle(textBox34.Text)), 2).ToString();
    textBox50.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown17.Value) *
Convert.ToSingle(textBox33.Text)), 2).ToString();

// Poids d'eau en [g]
    textBox63.Text = Math.Round((70 * Convert.ToSingle(textBox51.Text) / 100), 2).ToString();
    textBox62.Text = Math.Round((30 * Convert.ToSingle(textBox51.Text) / 100), 2).ToString();

// Volume en [L]
    textBox49.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(numericUpDown17.Value) *
Convert.ToSingle(numericUpDown1.Value)), 2).ToString();
    textBox48.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox55.Text) /
(Convert.ToSingle(numericUpDown8.Value) * 1000)), 2).ToString();
    textBox47.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox54.Text) /
(Convert.ToSingle(numericUpDown9.Value) * 1000)), 2).ToString();
    textBox46.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox53.Text) /
(Convert.ToSingle(numericUpDown10.Value) * 1000)), 2).ToString();
    textBox45.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox52.Text) /
(Convert.ToSingle(numericUpDown11.Value) * 1000)), 2).ToString();
    textBox44.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox51.Text) /
(Convert.ToSingle(numericUpDown12.Value) * 1000)), 2).ToString();

```

---

```
        textBox43.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox50.Text) /
(Convert.ToSingle(numericUpDown13.Value) * 1000)), 2).ToString();

// Volume total du mélange (MAP)
textBox57.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox43.Text) + Convert.ToSingle(textBox44.Text) +
Convert.ToSingle(textBox45.Text) + Convert.ToSingle(textBox46.Text) + Convert.ToSingle(textBox47.Text) +
Convert.ToSingle(textBox48.Text) + Convert.ToSingle(textBox49.Text)), 2).ToString();

// Poids total du mélange (MAP)
textBox58.Text = Math.Round((Convert.ToSingle(textBox50.Text) + Convert.ToSingle(textBox51.Text) +
Convert.ToSingle(textBox52.Text) + Convert.ToSingle(textBox53.Text) + Convert.ToSingle(textBox54.Text) +
Convert.ToSingle(textBox55.Text) + Convert.ToSingle(textBox56.Text)), 2).ToString();

private void button3_Click(object sender, EventArgs e)

if (MessageBox.Show("voulez-vous fermer cette application?", "MAP Application", MessageBoxButtons.YesNo,
MessageBoxIcon.Question) == DialogResult.Yes)
this.Close();

private void button2_Click(object sender, EventArgs e)

        tabControl1.SelectedIndex = 1;

private void button4_Click(object sender, EventArgs e)

        tabControl1.SelectedIndex = 0;

private void button5_Click(object sender, EventArgs e)

if (MessageBox.Show("voulez-vous fermer cette application?", "MAP Application", MessageBoxButtons.YesNo,
MessageBoxIcon.Question) == DialogResult.Yes)

this.Close();
```

---

## Bibliographie

- [1] Okamura H., Ouchi M., Self-Compacting Concrete. Development, present use and future, Proceedings of the First International RILEM Symposium on S-Compacting Concrete, Stockholm, Suède pp. 3-14, 1999;
- [2] Phan .M, Trung Hieu., Bétons fluides la rhéologie et la stabilité des pâtes, Thèse de doctorat, Université Paris VI, 2006,
- [3] Zemirline .S, Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton fluide (autoplaçant), mémoire de magister , Université de Médéa, 2008 ;
- [4] Boukhelkhal .A, Rheologie, Caractérisation Physico-Mécanique et Durabilité Des Bétons autoplaçants à Base De La Poudre DE Marbre, mémoire de magister , Université de Laghouat, 32p, 2012 ;
- [5] Assié .S., Durabilité des bétons autoplaçant, Thèse de doctorat de L'institut national des sciences appliquées (INSA), Toulouse, France, 2004 ;
- [6] Belaidi .A. S, Contribution à l'étude rhéologique et durabilité de béton autoplaçant : Apport des ajouts cimentaires ternaires et des fillers locaux et industriels, Thèse de doctorat, Université de Blida, 2013,
- [7] «Bétons Auto-plaçants,» Recommandations Provisoires, Document Scientifiques et Techniques, ISSN en cours, Juillet 2000.
- [8] Pleau .R, D. Beaupré, K. Khayat, B. Bona et P. Lacombe, Entrainement de la résistance au gel des béton autonivelants, Colloque sur les Bétons Autonivelants, Kamal Khayat, Sherbrooke, Quebec, 1<sup>er</sup> Novembre 1996 ;
- [9] El Barrak M., (2005), Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais, Thèse de doctorat, Université Toulouse III –Paul Sabatier, France ;
- [10] Khayat, K.H., and Yahia, A, Effect of welan gum–high-range water reducer combinations on rheology of cement grout, ACI Materials Journal 1997; 94(5);
- [11] Okamura, H., and Ozawa, K, Fine mortar rheology in Mix-design for self-compacting concrete, Concrete Library of JSCE 1995; 25: 107-120;

- 
- [12] Uysal, M., Yilmaz, K., and Ipek, M, The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials* 2011; 27(1): 263-70;
- [13] Uysal, M., and Yilmaz, K, Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Composites* 2011; 33: 771-6;
- [14] Khelifa .M, Effet de L'attaque Sulfatique Externe Sur La durabilite Des Bétons Autoplaçants, constantine, thèse de doctorat 20 juin 2009 ;
- [15] CEBTP, Bétons autoplaçants, rapport 98 004/98 006 » 1995, EYROLLES ;
- [16] Okamura, H, Ferguson lecture for 1996: self-compacting high-performance concrete, *Concrete International* 1997; 19(7): 50-54;
- [17] Okamura, H., and Ouchi, M, Self-compacting concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology* 2003, 1(1): 5-15;
- [18] Okamura, H., and Ozawa, K, Self-compacting High Performance Concrete, *Structural Engineering International* 1996; 4: 269-70;
- [19] Sedran T. Les Bétons Autonivelants. *Bulletin LCPC* 196, réf. 3889 :53–60,(mars-avril 1995) ;
- [20] Tangtermsirikul S. a. V. B., Blocking criteria for aggregate phase of Self-Compacting high performance Concrete, *Proceeding of Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering, SC-4, Bangkok, Thailand, December, 19-20, 1995;*
- [21] Sonebi M. and Bartos P.J.M, Hardened SCC and its bond with reinforcement., *Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 7*, :275–289, (2005). Stockholm, Suède;
- [22] B. P. a. T. A. Sonebi M., Flexural Response and Performance of Reinforced Beams Cast with Self-Compacting Concrete, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete Edition Ozawa K. and Ouchi M.*, :517–526, October, 2001; 34:1219-27;
- [23] Sedran, T., and De Larrard, F, Mix design of self-compacting concrete, *Proceedings of the International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete, Paisley. Eds. P.J.M. Bartos, D.L. Marr, and D.J. Cleland*, 1996; 439–50;

- 
- [24] De Larrard, F., Hu, C., and Sedran, T, Best Packing and Specified Rheology: Two Key Concepts in High-Performance Concrete Mix-Design, Adam Neville Symposium, Advances in Concrete Technology, Las Vegas, June, 1995;
- [25] Sheinn, A.M.M, Rheological modelling of self-compacting concrete, Doctoral Thesis of National University of Singapore, Singapore, 2007;
- [26] Rilem, Self Compacting Concrete,» State-of-the-Art report of Rilem Technical Commitee 174-SCC Self Compacting Concrete Edited by A°,Skarendhal and Ö.Petersson, RILEM Publications S.A.R.L;
- [27] Braquenier J.-c., Le Béton Autoplaçant ou Autocompactant, Recherche et Etude, p14-22, Automne 2000 ;
- [28] Ailey, J.D., Schindler, A.K., and a. Brown, D.A, An evaluation of the use of self-consolidating concrete (SCC) for drilled shaft applications , Highway Research Center and Department of Civil Engineering at Auburn University, Research Report N°1, 2005;
- [29] Khayat, K.H., and Tangtermsirikul, S, Fresh concrete properties, State of the Art Report (23)of RILEM Technical Committee 174-SCC, Edited by A. Skarendahl and O. Petersson, RILEM Publications S.A.R.L, Cachan Cedex, France, 2000; 17–22,
- [30] Khayat, K.H, Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete, ACI Materials Journal 1999, 96(3): 346–53;
- [31] Khayat, K.H., Hu, C., and Monty, H, Stability of self-consolidating concrete, advantages, and potential applications , in: the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, karendahl A, Petersson O, editors, RILEM Publications S.A.R.L., France, 1999; 143–52;
- [32] Rouisi .F, Formulation et propriétés mécaniques d'un Beton autoplaçant,», thèse de magister, Université Yahia Farés de Médéa, 2007 ;
- [33] Noguchi .T. O, Rheological approach to passing ability between reinforcing bars of self-compacting concrete, Proceedings of the first Intternational RILEM Symposium on Self-Compacting Concret. Stockholm,Sued,pp.59-70,1999 ;
- [34] Thierry .S., Les Béton Autonivelants (BAN) Synthèse Bibliographique, Liaison Labo P et Ch 196, pp. 53-60, Mars - Avril 1995 ;

- 
- [35] AFGC. Bétons autoplaçants - Recommandations provisoires. Annales du bâtiment et des travaux publics, (juin 2000). 63 p,
- [36] Khayat .K, Technologie Avancée du Béton, GC1711, Université de Sherbrooke, Octobre1995 ;
- [37] Ozawa .K. H. K, Development of High Performance Concrete, Jornal of the Faculty of Engineering, Vol XLI, N°3 University of Tokyo 1992,
- [38] 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;
- [39] Petersson .O, Limestone powder as filler in self-compacting concrete – Frost resistance and compressive strength, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, pp. 277-284, 23-25, Tokyo, Japon, octobre 2001;
- [40] Baradan.B., A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete , Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjaví ;
- [41] Riefler .A, Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete, novembre 2002;
- [42] Keonig .G., K. Holschemcher, F. Dehn, and D. Wbe. (2001), Self-compacting concrete time development of material properties and bond behavior, Proceeding of 2<sup>nd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Tokio,Japan :507-516;
- [43] Pineaud .A. (2007), Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants et application à l'industrie de la préfabrication, In Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France, page 271. 2007 ;
- [44] Sonebi .M. and PJM. Bartos. Hardened scc and its bond with reinforcement. Pro-ceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden: 275,289, 1999;
- [45] De Larrard. F. Concrete mixture - proportioning - A scientific approach. Modern Concrete Technology Series, N°9: E&FN SPON, 1999;
- [46] Pera .J, Husson .S, and Guilhot .B. Influence of finely ground limestone on cement hydration. Cement and Concrete Composites, Vol. 21 N°2:99-105, 1999;

- 
- [47] Persson .B., Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), pp. 239-250, 13-15, Stockholm, Suède, septembre 1999;
- [48] Association Française de Génie Civil, Bétons autoplaçants - Recommandations provisoires, Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000 ;
- [49] G. Pons, E. Proust, and S. Assié. Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete Proceeding of 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Reykjavik, Iceland :645-654, 2003;
- [50] Assié .S. (2005), Durabilité comparative des bétons autoplaçants et des bétons vibrés de même résistance mécanique. In XXII Ies Rencontres Universitaires de Génie civil, AUGC ;
- [51] Benkechkache .G, Houari .H, (2009) Comparaison Des Retraits Et Fluages Des Bétons Autoplaçants Et Des Bétons Ordinaires Vibres, Sciences & Technologie, pp 9-16 ;
- [52] El Barrak .M. (2005), Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais, Thèse de doctorat à l'université Toulouse III-Paul Sabatier, France ;
- [53] Benchaa .B., Influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons autoplaçants, thèse de doctorat ,Laghouat, 2014 ;
- [54] Zhu W., Quinn J., and Bartos P.J.M. Transport properties and durability of self-compacting concrete». Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, :451–458, (23-25 October 2001). Tokyo, Japan;
- [55] Zhu W. and Bartos P.J.M. Permeation properties of self-compacting concrete. Cement and Concrete Research, 33 :921–926, (2003);
- [56] Tang L., Andalen A., Johansson J.O., and Hjelm S. Chloride diffusivity of self-compacting concrete. Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 7, :187–198, (13-15 September 1999). Stockholm, Suède;
- [57] Audenaert K. and De Shutter G., Chloride penetration in self compacting concrete,. Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 33, :818–825, (17-20 August, 2003). Reykjavik, Iceland ;
- [58] Aitcin P. C., Neuville A., and Acker P. , Les différents types de retrait du béton,. Bulletin du LCPC 215, réf. 4184 :41–51, (mai-juin 1998) ;

- 
- [59] Audenaert K. and De Shutter G., Influence of moisture on the carbonation of self-compacting concrete, Proceeding (SP 212) of the Dixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete , :451–465, (juin 2003). Greece ;
- [60] Khelifa M.R., Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants. PhD thesis, Université D'Orléans et Université de Constantine, Juin, 2009;
- [61] Trägårdh J., Microstructural features and related properties of self-compacting concrete, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson , Stockholm, Sweden, 1999, pp. 175 – 186;
- [62] De Schutter G., Audenaert K, boel V., Vandewalle L., Transport properties in self-compacting concrete and relation with durability: overview of a Belgian research project, Proceedings of 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 799 – 807;
- [63] Rougeau P., Maillard J.L., Mary-Dippe C. Comparative study on properties of self-compacting concrete and high performance concrete used in precast construction, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson Stockholm, Sweden, 1999, pp. 251 – 261;
- [64] Mortsell E., Rodum E., Mechanical and durability aspects of SCC for road structures, Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, 2001, pp. 459 – 468;
- [65] Attiogbe E.K., See H.T., Daczko J.A., Engineering properties of self-consolidating concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM Center, 2002, pp. 371 – 376.;
- [66] Trägårdh J., Skoglund P., Westerholm M., Frost resistance, chloride transport and related microstructure of field self-compacting concrete, Proceedings of 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 881 – 891;
- [67] Hanzic, L., and Ilic, R, Relationship liquid sorptivity and capillarity in concrete, Cement Concrete Research 2003; 33(9): 1385–8;
- [68] Topcu, I.B., Bilir, T., Uygunoglu, T, Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete, Construction Building Materials 2009; 23(5): 1947–53;

- 
- [69] Turkmen, I., and Kantarci, A, Effect of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete, *Building and Environment* 2007; 42(6): 2378–83;
- [70] Safiuddin, M., West, J.S., and Soudki, K.A, Durability performance of self-compacting concrete, *Journal of Applied Sciences Research* 2008; 4(12): 1834–40;
- [71] Kapoor, Y., Munn, C., and Charif, K, Self-Compacting concrete – an economic approach, *Proceedings of Seventh International Conference on Concrete in Hot and Aggressive Environments*, Manama, Kingdom of Bahrain, October 13–15, 2003; 509–19;
- [72] De Larrard, F, *Construire en béton. L’essentiel sur les matériaux*, Presses de l’École Nationale Ponts et Chaussées, France, 2002 ;
- [73] Hasni L., *Bétons Autoplaçants : Synthèse Bibliographique, Rapport de Recherche N° 98-004 /98-006*, CEBTP, présenté aux journées du PN BAP, 1999, p. 64 ;
- [74] Pigeon M., Marchand J., Pleau R., Frost resistant concrete, *Construction and Building Materials*, 10, 1996, pp. 339 – 348;
- [75] Brameshuber W., Uebachs S., The influence of air voids on the properties of self-compacting concrete containing fly ash, *Proceedings of 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33)*, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 870 –880;
- [76] Brunetaud X. ,*Etude de l’influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l’amplitude de la réaction sulfatique interne au béton*, . PhD thesis,Ecole Centrale des Arts et Manufactures - Ecole Centrale de Paris, 08 Décembre 2005 ;
- [77] Pavoine A.,*Evaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l’ettringite*,. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2003;
- [78] Neville A., The confused world of sulfate attack on concrete, *Cement and Concrete Research*, 34, 2004, pp. 1275 – 1296:
- [79] Sahmaran M., Kasap O., Duru K., Yaman I.O., Effects of mix composition and water–cement ratio on the sulphate resistance of blended cements, *Cement and Concrete Composites*, 29, 2007, pp. 159 – 167;
- [80] Santhanam M., Cohen M.D., Olek J., Sulfate attack research – Whiter now? *Cement and Concrete Research*, 31, 2001, pp. 845 – 851 ;

- 
- [81] Baron J., Ollivier J.P., Les bétons, Bases et données pour leur formulation, Ed. Eyrolles. 1996, p. 570;
- [82] Tumidajski, P.J., Chan, G.W., and Philipose, K.E, An effective diffusivity for sulfate transport into concrete, *Cement and Concrete Research* 1995; 25(6): 1159–63;
- [83] Mehta, P.K., and Monteiro, P.J.M, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, Third edition, USA, 2006;
- [84] Verbeck, G.J, Field and laboratory studies of the sulphate resistance of concrete, *Proceeding of a Symposium in Honour of Thorbergur Thorvaldson*, Candana, 1967; 113–24;
- [85] Brown, G.E., and Oates, D.B, *Concrete International* 1983; 5: 36–9.
- [86] Al-Akhras .N,M, Durability of metakaolin concrete to sulfate attack, *Cement and Concrete Research* 2006;
- [87] Neville, A.M, *Propriétés des Bétons*, traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles, 2000;
- [88] Monteiro, P.J.M., and Kurtis, K.E, *Cement and Concrete Research* 2003; 33: 987-93;
- [89] Planel D. Les effets couples de la précipitation d'espèces secondaires sur le comportement mécanique et la dégradation chimique des bétons, . PhD thesis, Université de Marne La vallée, UFR des Sciences et Technologies, 04 Juin 2002 ;
- [90] Nagai, T., Kojima, T., and Miura, T, Application of high-strength/super-workable concrete to thin-wall prestressed concrete products, *Magazine of Concrete Research* 1999; 51(3): 153-62;
- [91] Uysal, M., and Sumer, M, Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures, *Construction and Building Materials* 2011; 25: 4112-20;
- [92] Papadakis V.G., Vayenas C.G., Fardis M.N. (1991) Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete, *ACI Materials Journal*, V. 88, No. 2, March-April 1991;
- [93] Thierry M., Dangla P., Villain G., Platret G., Massieu E., Druon M., Baroghel-Bouny V. (2004) Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 252-253, septembre-octobre-novembre-décembre 2004, pp. 153-187 ;

- 
- [94] Thiéry M. (2006) Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires, Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA 52 ;
- [95] T. Chaussadent, Analyse des mécanismes de carbonatation du béton, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. Compte Rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM Toulouse 1997 ;
- [96] Ounoughi .K, Baroghel Bouny .V, Gawsewitch .J, Chaussadent .T, et Croquette .G, Influence du rapport eau/ciment, du type de ciment et de la microstructure sur la carbonatation des bétons, Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages Journées « durabilité » 8 et 9 Mars 2000. Bordeaux CETE du sud- ouest;
- [97] Laura Sullivan-Green et al, Accelerated protocol for measurement of carbonation through a crack surface, Cement and Concrete Research 37 (2007) 916–923.
- [98] Shamsad Ahmad, Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review, Cement & Concrete Composites 25 (2003) 459–471;
- [99] Othman Omikrine Metalssi, Étude des couplages hydratation – échanges hydriques - carbonatation dans les mortiers modifiés polymères , Thèse de doctorat, -Université de La Rochelle – UFR Sciences - Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment, 29 Novembre 2006 ;
- [100] Emmanuel Roziere, Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle, Thèse de doctorat, Ecole centrale Nantes et Université de Nantes, 29 Novembre 2007 ;
- [101] Ollivier J.P., Vichot A., La durabilité des bétons, édition Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 2008 ;
- [102] Baron J., Gagne R., et Ollivier J.-P. (1996) Chapitre 11 – Viser la durabilité, dans ATILH, sous la direction de J. Baron et J.-P. Ollivier, Les Bétons, Bases et données pour leur formulation, Ed. Eyrolles, Chapitre 11, pp. 307-363 ;
- [103] Coquillat G., (1999) Rapport du CEBTP, Recherche collective Bétons avec additions, Béton B 25 – Type « Bâtiment », Rapport final ;
- [104] Papadakis V. G., (2000) Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress, Cement and Concrete Research 30, 291-299;

- 
- [105] O. Burkan Isgor et al, Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures, *Cement & Concrete Composites* 26 (2004) 57–73;
- [106] Dheilily R M., Tudo J., Sebai Y. and Queneudec M. “Influence of storage conditions on the carbonation of powdered Ca (OH)<sub>2</sub>”. *Construction and Building Materials*, (16):155161, 2002;.
- [107] Smith D.G.E et Evans A.R (1986).,Purple concrete in a middle east town,. *Concrete*, n°2, pp.36-39;
- [108] Rahman A.A. and Glasser F.P (1989). ,Comparative studies of the carbonation hydratedcements ,. *Advances in Cement Research*, vol2, n°6, pp.49-54;
- [109] Neville A.M. (1995). ”Properties of concrete». Fourth and final edition, P844.
- [110] Adenot F., Buil M., Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water, *Cement and Concrete Research*, 22, 1992, pp. 489 – 496;
- [111] Kamali S., Gérard B., Moranville M., Modelling of the leaching kinetics of cement-base materials – Influence of materials and environment, *Cement and Concrete Research*, 25, 2003, pp. 451 – 458 .
- [112] Nguyen V.H., Nedjar B., Colina H., Torrenti J. M., A separation of scales analysis for the modelling of calcium leaching in concrete, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 195, 2006, pp.7196 – 7210;
- [113] Rozière E., Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, 2007, p. 250
- [114] Carde C., François R., Effect of leaching of calcium hydroxide from cement paste on mechanical and physical properties, *Cement and Concrete Research*, 27, 1997, pp. 539 –550;
- [115] Kamali S., Modélisation de la lixiviation de matériaux cimentaires, application à différents ciments dans différents environnements, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2003 ;
- [116] Rilem 2008, Durability of Self-Compacting Concrete - State-of-the-Art, Report of RILEM Technical Committee 205-DSC, Edited by G. De Schutter and K. Audenaert, 2008, p. 208;

- 
- [117] Boel V., Audenaert K., De Shutter G., Acid attack of self-compacting concrete, ICCRRR international conference on Concrete Repair, Rehabilitation and retrofitting, Eds. Alexander et al., Cape Town, South Africa, 2005, pp. 107 – 113;
- [118] Bassuoni M.T., M.L. Nehdi, Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction, *Cement and Concrete Research*, 37, 2007, pp. 1070 – 1084;
- [119] Bassuoni M.T., Nehdi M.L., Amin M., SCC: using limestone to resist sulfuric acid, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Construction Materials*, 2007, Issue CM3, N° 160, pp. 113 – 123;
- [120] Belaribi O., Belas Belaribi N., Mebrouki A., Bouhamou N., Sifodil D., Comportement d'un béton autoplaçants vis-à-vis des attaques acides, XXIXe Rencontres universitaires de génie civil, Tlemcen, Algérie, 2011, pp. 32-42 ;
- [121] Boel V., Microstructure of self-compacting concrete in relation with gas permeability and durability aspects, PhD thesis, Ghent University, Belgium, 2006, p. 320;
- [122] Ueda H., Kimachi Y., Ushijima S., Shyuttoh K., Proposition of durability test method on concrete attacked by acid rain and test results of super quality concrete, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on self-compacting concrete*, Ed. K. Ozawa & M. Ouch, resistance self-compacting concrete Tokoyo, Japan, October 2001, pp. 469 – 474;
- [123] Assié S., Escadeills G., Marchese Waller V., Durability properties of low-resistance self-compacting concrete, *Magazine of Concrete Research*, 58, 2006, pp. 1 – 7;
- [124] Boukendakdji, O, Étude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : Optimisation des conditions opératoires, Thèse de doctorat de l'Université Saad Dahlebde Blida, Algérie, 2010 ;
- [125] Domone, P.L, Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies, *Cement and Concrete Composites* 2006; 28(2):197-208;
- [126] Domone, P.L., And Jin, J, Properties of mortar for self-compacting concrete, *Proceedings of Rilem International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, Sweden, 13-15 September, 1999; 109-20;
- [127] Felekoglu .B, Turkel .S. and Baradan .B , Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete , *Building and Environment*, 2007, vol 42, pp. 1795–1802;

- 
- [128] I.Aiad . S.Abd El-Aleem and H.El-Didamony , Effect of delaying addition of some concrete admixtures on the rheological properties of cement pastes ,Cement and Concrete Research, 2002, vol 32, pp. 1839–1843;
- [129] Carlsward, J., Emborg, M., Utsi, S., and Oberg, P, “ Effects of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete ”, In: the Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Wallevik OH, Nielsson I, editors, RILEM Publications S.A.R.L, Bagneux, France, 2003; 143-53;
- [130] Bensebti S.E., Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux, Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2008, p. 157 ;
- [131] akada K., Walraven J.C., Influence of mixing efficiency on the properties of flowable cement pastes, Proceedings of the Second International Symposium on Self Compacting Concrete, Japan, 2001 pp. 545 – 554;
- [132] De Larrard F ,Cazacliu B.,Chopin D., Chateau E., Production of SCC, PRO 3, In proceeding of International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Editor(s): O. Wallevik and I. Nielsson, RILEM Publications SARL, 2003, pp. 481 – 494;
- [133] Domone, P.L., Jin J., Chai H.W. Optimum mix proportioning of self-compacting concrete, Innovation in Concrete Structures: Design and Construction, Proceeding of creating with concrete, University of Dundee, Dundee, September 1999, pp. 277 – 285;
- [134] Chai H. Design and testing of SCC. PhD thesis, University College of London (UCL), April 1998. 259 pages;
- [135] Sonebi M. and Bartos P.J.M. «Filling ability and plastic settlement of self compacting concrete». Materials and Structures, 35 :462–469, (2002);
- [136] EFNARC. ,The European guidelines for self compacting concrete., European federation for specialist construction chemicals and concrete systems , (2005).www.efnarc.org, 68p.
- [137] AFGC, Association française de Génie Civil, Bétons Autoplaçants ;Recommandations provisoires, documents scientifiques et techniques, 2002, p. 63 ;
- [138] EFNARC, Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete, European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures, EFNARC, Norfolk, UK, February 2002, 32pp;
- [139] AFNOR, Béton et constituants du béton, Tome 2, 5<sup>ème</sup> édition, Paris, 2002,

- 
- [140] GranDuBé, Grandeurs associées à la durabilité des bétons, sous la direction de G. Arliguie et H. Hornain, Presses de l'ENPC, 2007, p. 437 ;
- [141] ASTM C 642-97, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, American Society for Testing and Materials, USA, 1997;
- [142] ASTM 2004, Standard test methods for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution, ASTM C 1012-04, 2004;
- [143] ASTM 1997, Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts and monolithic surfacing and polymer concretes, ASTM International, West Conshohocken, P A, USA, 1997;
- [144] ASTM 2007, Standard practice for making and curing, concrete test specimens in the laboratory, , ASTM International, West Conshohocken, P A, USA, ASTM C 192, 2007;
- [145] Higgins D.D., Crammond N.J. (2002) Resistance of concrete containing ggbs to the thaumasite form of sulfate attack, paper presented at The First International Conference on Thaumasite in Cementitious Materials, Watford, UK, June 2002;
- [146] Boukendakdji O., Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un BAP: Optimisation des conditions opératoires, Thèse de doctorat, Université de Blida, 2010, p. 182 ;
- [147] Westerholm M., Lagerblad B., Silfwerbrand J., and Forssberg E. «Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars». Cement and Concrete Composite, 30 :274–282, (2008);
- [148] Fang W., Jianxiong C., and Changhui Y. «Studies on Self-Compacting High Performance Concrete with high volume mineral additives». Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 7 , :569–578,(13-15 September 1999). Stockholm, Suède;
- [149] Spengler A. and Schiessl P., Sand-rich Self Compacting Concrete, . :387–392,(October, 2001). Tokyo, Japan;
- [150] Lane, R.O., and Best, J.F, Properties and use of fly ash in Portland cement concrete, Concrete International 1982; 4(7): 81–92:

- 
- [151] Yahia, A., Tanimura, M., and Shimoyama, Y, Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and w/c ratio, *Cement and Concrete Research* 2005; 35(3): 532–9;
- [152] Sahmaran, M., Christianto, H.A., and Yaman, I.O, The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars, *Cement and Concrete Composites* 2006; 28(5): 432–40;
- [153] Khayat, K.H., and Manai, K, Les bétons autonivlants: propriétés, caractérisation et applications, *Colloque sur les bétons autonivlants, Université deSherbrooke, Canada, Novembre, 1996, 28pp ;*
- [154] Sonebi, M., Grünewald, S., and Walraven, J, Filling ability and passing ability of Self-Compacting Concrete, *ACI Materials Journal*, March/April 2007; 162-70;
- [155] Bonavetti, V., Donza, H., Menindez, G., Cabrera, O., and Irassar, E.F. Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy, *Cement and Concrete Research* 2003; 33(6): 865–71;
- [156] Heikal, M., El-Didamony, E., Morsy, M.S, Limestone-filled pozzolanic cement, *Cement and Concrete Research* 2000; 30(11): 1827–34;
- [157] Bessa A., Bigas J.P., Gallias J.L., Evaluation de la contribution liante des additions minérales à la porosité, à la résistance en compression et à la durabilité des mortiers, *XXII<sup>èmes</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil : Ville et Génie Civil, Université Marne la Vallée, France, 3-4 Juin 2004 ;*
- [158] Girardi F., Vaona W., Di Maggio R., Resistance of different types of concretes to cyclic sulfuric acid and sodium sulfate attack, *Cement and Concrete Composites*, 32, 2010, pp. 595 – 602;
- [159] Glasser F.P., Marchand J., Samson E., Durability of concrete – Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions, *Cement and Concrete Research*, 38, 2008, pp. 226 – 246;
- [160] Mbessa M, Pera J., Durability of high-strength concrete in ammonium sulfate solution, *Cement and Concrete Research*, 31, 2001, pp. 1227 – 1231;
- [161] Miletic´ S, Ilic´ M, Ranogajec J, Marinovic-Neducin R, Djuric´ M., Portland ash cement degradation in ammonium-sulfate solution, *Cement and Concrete Research*, 28, 1998, pp. 713 – 725;

- 
- [162] Lee S.T., Moon H.Y., Swamy R.N., Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss, *Cement and Concrete Composites*, 27, 2005, pp. 65 –76;
- [163] Al-Tamimi, A., Sonebi, M., Assessment of Self-Compacting Concrete Immersed in Acidic Solutions, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(4), 2003, pp. 354 – 357;
- [164] Ait-Mokhtar A. ,Durabilité des matériaux, Transfert d'agents agressifs dans les matériaux cimentaires ,. Habilitation à diriger des recherches en sciences, 2002;
- [165] Morgan S. and Gardner J. « Carbon cycle » présentation ;
- [166] Powers T.C (1962). , A hypothesis properties of cement pastes,. In: proc, 4<sup>th</sup>Int.Symp. Chem.Cement, Washington, 1960, vol.2, pp.577-613;
- [167] Miragliotta R. ,Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués – prise en compte des effets de paroi ,. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle, 2000;
- [168] Houst Y.F. , Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie , Thèse de Doctorat, Université de Lausanne (1992);
- [169] Baroghel V-B , Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances ,. Thèse de doctorat, 1997;
- [170] Lea F. M. ,The Chemistry of Cement and Concrete,. Edward Arnol,(1970);
- [171] Hornain H ,Carbonatation accélérée et résistances mécaniques, In: Rilem International Symposium, Carbonation of Concrete, Cement and Concrete Association, Slough, paper5.2; (1976).;
- [172] De Ceukelaire Van., Nieuwenburg D.,Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete,. *Cement and Concrete Research*, vol.23, 1993, pp 442-452;
- [173] Medgyesi I. (1986). , Nouveaux résultats dans la protection contre la corrosion ,. 10<sup>th</sup> Triennial Congress of the International Council for Building Research (USA), Vol 6 , pp2179 2185;
- [174] Gonzales J.A et al. , Some considerations on the effect of chloride ions on the corrosion of steel reinforcements embedded in concrete structures ,.Magazine of concrete. Research, vol.50, n°3, Septembre, 1998, pp 189-199;
- [175] Almusallam A.A. , Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars, *Construction and Building Materials*,vol.15, Janvier 2001, pp 361-368;

- 
- [176] Rita S. de Cassia. ,Contribution à l'analyse probabiliste de la performance des ponts en béton armé, Thèse de doctorat ENPC 2000;
- [177] Tuutti K. ,Corrosion of steel in concrete, Swedish Cement and Concrete,. Research Institute;
- [178] Turker F., Aköz F., Koral S., Yüzer N., Effects of magnesium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume, Cement and Concrete Research, 27, 1997, pp. 205 – 214;
- [179] Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M., Al-Zahrani M. M., Sharif A. M., Shameem M., Ibrahim M., Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate, Cement and Concrete Composites, 25, 2003, pp. 429 –437;
- [180] Duval R. and Hornain H., Durabilité du béton vis-à-vis des eaux agressives, dans la durabilité des bétons, sous la direction de J. Baron et J.P. Ollivier, presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1992, pp. 351 – 389;
- [181] Divet Loic, Activité sulfatique dans les bétons consécutive à l'oxydation des pyrites contenues dans les granulats synthèse bibliographique, bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 201, 1996, pp. 45 – 60;
- [182] Tian B., Cohen M.D., Does gypsum formation during sulphate attack on concrete lead to expansion Cement and Concrete Research, 30, 2000, pp. 117 – 123;
- [183] Irassar E.F., Bonavetti V.L., Gonzalez M., Microstructural study of sulphate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature, Cement and Concrete Research, 33, 2003, pp. 31 – 41;
- [184] Schmidt K., Lathenbach B., Romer M., Scrivener K., Investigation of external sulfate attack on limestone blended cements, Concrete in aggressive aqueous environments, performance, testing and modeling, Editors: M.G. Alexander and A. Bertron, France, 2009, pp. 37 – 44;
- [185] Al-Tamimi, A. Sonebi, M., Tagnit-Hamou A., Saric Coric M., Durability investigation of self-compacting concrete using scanning electron microscope, Second International IMS conference on : Applications of traditional and high performance materials in harsh environment, Dubai, UAE, 2006, p. 24;
- [186] Siad H., Mesbah H.A., Khelafi H., Mouli M., Influence of curing and fine materials on the acid resistance of self-compacting concrete, Concrete in aggressive aqueous environments,

---

performance, testing and modeling, Editors: M.G. Alexander and A. Bertron, France, 2009, pp. 433 – 427;