

Université Ziane Achour de Djelfa  
Faculté des sciences et de la technologie  
Département des sciences technologiques  
Références : FST/DST/M2/...../.....



جامعة الجلفة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم علوم التكنولوجيا

## Mémoire de fin d'études

Présenté au

Département : Sciences de la technologie

Domaine : Sciences et technique

Filière : Génie civil

Spécialité : Géotechnique et matériaux

Réalisé par

M'hamedi mokhtar & ben brahim oussama

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

*Titre:*

*Durabilité du Béton Autoplaçant à base de sable de dune finement broyé vis-à-vis des attaques chimiques*

Mr. Smaida A	MAA	Univ.Djelfa	Présiden
Mr. Dif F	MAA	Univ.Djelfa	Encadreur
Dr. Rabehi M	MAA	Univ.Djelfa	Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Dédicace

---

*Au nom d'ALLAH, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux*

## Spécialement

*À notre promoteur Monsieur dif fodil et akrache massoud*

### M'hamedî mokhtar:

*À mes très chers parents ( M'ohamed - Noura ).*

*À mes deux familles : La famille Mhamedî.*

*La famille lahoîl .*

*À mes freres : ahmeed, abdrahman .*

*À mes sœurs : zaina, ramlia, mariam, naaïma, massouda, fadila, alia .*

*À tous mes amis .Surtout : Hamza , Youssef, Abdulkader , saïd , mohamed , salem (1-2), elhaoïs , Anoir, bachier, cherif.*

### Ben brhim oussama :

*À mes très chers parents (rabeh(allah yarahmo)-sadjia).*

*À mes deux familles : La famille ben brahim .*

*La famille ben brahim.*

*À mes freres : othmane , ramzi .*

*À mes sœurs : sara .*

*À tous mes amis .Surtout : brahim, tarek, mohamed, moktar, ilyes, abdelghani, elhaoïs, adel, cherif, elhadî, Badri, omar, lahcen.*

# *Remerciements*

---

*Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, le Clément et le Miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous voudrions exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Monsieur DIF FOUJILE pour les orientations et les conseils qu'il a su nous prodiguer durant l'évolution de notre projet.*

*Nous remercions également le Dr REBIH ZAITRI pour les orientations et les conseils qu'il a su nous prodiguer durant l'évolution de notre projet.*

*Nous voudrions remercier tous nos professeurs qui ont contribué à notre formation.*

*Que tous les membres du jury trouvent ici l'expression de nos profonds respects pour avoir pris la peine d'examiner le manuscrit.*

*Nos remerciements vont également à tous ceux et celles qui de près ou de loin nous ont apporté aide et encouragement. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.*

## ملخص :

تعتبر ديمومة الخرسانة للمنشآت الواقعة في الأوساط العدوانية من أهم دراسات الأبحاث الحديثة حاليا . حيث قمنا بتحضير عينات من الخرسانة ذاتية التسوية تحتوي على نسب متباينة (10%,20%,30%) من مادة الرمال الكثبانية المسحوقة ناعما لمنطقة المصران على ( بعد 40 كلم من شمال الجلفة) كإضافة لمادة الإسمنت .

الهدف الرئيسي من هذا العمل التجريبي هو دراسة مدى تأثير مادة الرمال الكثبانية المسحوقة ناعما على الخصائص الميكانيكية مقاومة الضغط وديمومة الخرسانة ( التغير في الكتلة) في البيئة العدوانية .

من خلال النتائج التجريبية المخبرية المحصل عليها نستنتج ان مادة الرمال الكثبانية المسحوقة ناعما لها تأثير إيجابي على الخصائص الميكانيكية وتأثير مقبول لديمومة الخرسانة خاصة على المدى البعيد.

الكلمات المفتاحية : الاستدامة، الخرسانة ذاتية القولية، الخصائص الميكانيكية، الكثبان الرملية المسحوقة ناعما، الأوساط العدوانية.

## Résumé :

On a étudié la durabilité des constructions en bétons situés dans les milieux agressifs.

Nous avons préparé des échantillons du BAP avec différentes teneur de Sable de dune finement broyé de la région El Mosrane (40 km au Nord de Djelfa) comme substituent au ciment.

L'objectif principal de ce travail expérimental est d'étudier la valorisation de Sable de dune finement broyé sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression) et la durabilité du béton (variation de la masse) dans l'environnement agressif.

Grâce à des résultats expérimentaux obtenus, nous concluons que le sable de dune finement broyé a un effet positif sur les propriétés mécaniques et l'effet est quelque peu acceptable pour la durabilité du béton en particulier à long terme.

**Mots-clés :** durabilité, béton Autoplaçant, propriétés mécaniques, Sable de dune finement broyé, milieux agressifs.

## **Abstract :**

constructions durability was studied in concrete located in aggressive environments.

We have prepared samples of SCC with different contents of Sand of dune finely crushed of El Mosrane region (40 km north of Djelfa) as a substitute for cement.

The main objective of this experimental work is to study the enhancement of Sand of dune finely crushed of El Mosrane on mechanical properties (compressive strength) and the durability of concrete (mass change) in the aggressive environment.

Through experimental results, we conclude that the dune sand addition of finely ground has a positive effect on the mechanical properties and the effect is somewhat acceptable for concrete durability particularly in the long term.

**Keywords :** sustainability, Self-compacting, mechanical properties, Sand of dune finely crushed, mechanical properties.

# SOMMAIRE

---

Dédicace .....	i
Remerciements .....	ii
RÉSUMÉ.....	iii
ملخص.....	iii
ABSTRACT .....	iv
SOMMAIRE.....	v
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX .....	ix
INTRODUCTION.....	01
<b>CHAPITRE I : CONCEPT DES BÉTON AUTOPLAÇANTS.....</b>	<b>02</b>
I.1 Généralités sur les bétons.....	02
I.2 Généralité sur les bétons autoplaçant.....	03
I.2.1 historique des BAP .....	03
I.2.2 Définition du béton Autoplaçant.....	03
I.3 Constituants d'un béton autoplaçant .....	04
I.3.1 La Poudre (liant) .....	05
I.3.2 Les Granulats .....	09
I.3.3 L'eau de gâchage .....	09
I.3.4 Les Adjuvants.....	10
I.4 Spécificité de la composition d'un béton autoplaçant .....	11
I.4.1 Volume de pâte important .....	11
I.4.2 Ajouts de super plastifiant et de rétenteurs d'eau (agent de viscosité) .....	12
I.4.3 Faible volume en gravillons .....	12
I.5 Méthode de formulations des BAP.....	13
I.5.1 Différentes types des méthodes .....	14
I.6 Caractérisation du béton à l'état frais.....	16
I.6.1 caractéristiques rhéologiques des BAP.....	16
I.6.2 essais de caractérisations d'un BAP .....	17
I.6.2.1 L'essai d'étalement (slump flow) .....	17
I.6.2.2 L'essai boîte en L (L-box test).....	19
I.6.2.3 l'essai de stabilité .....	20
I.7 Propriétés du béton durci.....	21
I.7.1 La résistance mécanique .....	21
I.7.2 Le module élastique.....	22
I.8 Domaines d'application.....	22
I.9 Les innovations des BAP.....	23
I.10 Conclusion .....	24
<b>CHAPITRE II : DURABILITÉ DES BÉTON .....</b>	<b>25</b>
II.1 Introduction .....	25
II.2 Durabilité et économie .....	25
II.3 Béton durable et béton résistant.....	26
II.4 Attaques du béton par les sulfates.....	27
II.4.1 Définition.....	27
II.4.2 Mécanismes d'attaques .....	30
II.5 Attaque par les acides .....	30
II.5.1 Introduction .....	30
II.5.2 Mécanisme d'attaque des acides.....	31
II.5.3 Revue des essais.....	32
II.5.3.1 Attaque par les acides (ASTM C 267-96) .....	32

---

II.6	l'attaque des sels.....	35
II.6.1	L'eau de mer.....	35
II.7	Attaque par les ions chlorure .....	36
II.7.1	Définition.....	36
II.7.2	Source de l'attaque des ions chlores .....	36
II.7.3	Les essais de pénétration des ions de chlores .....	36
II.8	Conclusion .....	41
<b>CHAPITRE III : MATÉRIAUX UTILISÉS ET ESSAIS RÉALISÉS .....</b>		<b>42</b>
III.1	Introduction .....	42
III.2	Caractéristiques des matériaux .....	43
III.2.1	Ciment.....	43
III.2.2	les sable .....	43
III.2.3	Graviers.....	44
III.2.4	Sable de dune finement broyé.....	45
III.2.5	Superplastifiant .....	46
III.2.6	Eau de gâchage.....	47
III.3	Essais réalisés .....	47
III.3.1	Préparation des BAP.....	47
III.3.2	Essais réalisés à l'état frais .....	48
III.3.3	Essais réalisés à l'état durci.....	49
III.3.3.1	Essai de résistance à la compression .....	49
III.3.3.2	Essais de durabilité .....	40
III.3.4	Conclusion .....	50
<b>CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS.....</b>		<b>51</b>
IV.1	Introduction .....	51
IV.2	Formulation des BAP.....	51
IV.3	Résultats des essai des BAP .....	51
IV.3.1	Essai d'étalement .....	51
IV.3.2	Essai de la boîte en L .....	52
IV.3.3	Essai de la stabilité au tamis .....	52
IV.4	Essais mécaniques .....	53
IV.4.1	Résistance à la compression .....	53
IV.4.1.1	Résistances des BAP conservés dans l'eau saturée en chaux.....	53
IV.4.1.2	Résistances des BAP conservés dans une solution de 5%NaCl.....	55
IV.4.1.3	Résistances des BAP conservés dans une solution de 5%MgSO4.....	55
IV.4.2	Essais de durabilité .....	57
IV.4.2.1	Variation de la masse .....	57
IV.4.2.1.1	Variation de la masse des BAP dans une solution de l'eau H2O .....	57
IV.4.2.1.2	Variation de la masse des BAP conservés dans la solution 5%Nacl .....	58
IV.4.2.1.3	Variation de la masse des BAP conservés dans la solution 5%MgSO4.....	58
IV.4.3	Conclusion.....	60
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>		<b>61</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>		<b>63</b>

# LISTE DES FIGURES

<b>CHAPITRE I : CONCEPT DES BÉTON AUTOPLAÇANTS</b> .....	02
<b>Figure I.1:</b> Compositions du béton autoplaçant et du béton conventionnel .....	05
<b>Figure I.2:</b> Illustration de l'effet fillers .....	06
<b>Figure.I.3:</b> Pâte de ciment non adjuvantée .....	10
<b>Figure.I.4:</b> Pâte de ciment additionnée .....	10
<b>Figure I.5:</b> Volumes relatifs de pâte de ciment différents pour un béton vibré et un BAP.....	11
<b>Figure I.6:</b> Les utilisations des superplastifiants .....	12
<b>Figure I.7:</b> Comparaison entre le volume des gravions de BAP et celle d'un béton .....	13
<b>Figure.I.8:</b> Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton .....	17
<b>Figure.I.9:</b> Représentation schématique de l'essai d'étalement .....	18
<b>Figure I.10:</b> Détermination de l'étalement .....	18
<b>Figure I.11:</b> Entonnoir en forme V (V funnel) .....	18
<b>Figure I.12:</b> Essai de la boîte en L (L-box test) .....	19
<b>Figure.I.13:</b> essai en U (à gauche), essai de caisson (adroite) .....	20
<b>Figure.I.14:</b> Essai de stabilité au tamis .....	21
<b>Figure I.15:</b> Essai de ressuage à l'aéromètre.....	21
<b>CHAPITRE II : DURABILITÉ DES BÉTON</b> .....	25
<b>Figure.II.1:</b> Ettringite primaire non expansive dans la pâte de ciment, vue au microscope électronique à balayage .....	28
<b>Figure.II.2:</b> Ettringite secondaire non expansive dans la pâte de ciment, vue au microscope électronique à balayage .....	29
<b>Figure.II.3:</b> Ettringite secondaire expansive dans la pâte de ciment, vue au microscope électronique à balayage .....	29
<b>Figure.II.4:</b> L'attaque par les sulfates.....	30
<b>Figure I.5:</b> La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage.....	31
<b>Figure I.6:</b> L'attaque par les acides. [48].....	32
<b>Figure.II.7:</b> Variation de la perte en poids du BAP en fonction de la période d'immersion en 2% HCl, 5% HCl et de celle du témoin (eau distillée). .....	33
<b>Figure.II.8:</b> Variation de la perte en poids du BAP en fonction de la période d'immersion en 5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et de celle du témoin (eau distillée). .....	34
<b>Figure.II.9:</b> Variation de la perte en poids du BAP en fonction de la période d'immersion en 5% CH <sub>3</sub> COOH, 2% CH <sub>3</sub> COOH et de celle du témoin (eau distillée). .....	35
<b>Figure II.10:</b> Illustration des profondeurs de pénétration des ions chlorures .....	38
<b>Figure II.11:</b> Eprouvettes affectées par les ions chlorures .....	38
<b>Figure.II.12:</b> Illustration des profondeurs de pénétration des ions chlorures dans le BAPZ.....	40

<b>CHAPITRE III : MATÉRIAUX UTILISÉS ET ESSAIS RÉALISÉS</b> .....	42
<b>Figure I.1:</b> Les sables utilisés .....	43
<b>Figure I.2:</b> Analyse granulométrique des sables .....	44
<b>Figure I.3:</b> Les différents granulats utilisés .....	44
<b>Figure I.4:</b> Analyse granulométrique des graviers .....	45
<b>Figure I.5:</b> Le sable de dune avant et après broyage .....	46
<b>Figure I.6:</b> superplastifiant .....	46
<b>Figure I.7:</b> Malaxeur de béton à axe vertical (université de Djelfa) .....	48
<b>Figure I.8:</b> Essai de l'étalement au cône d'Abrams .....	49
<b>Figure I.9:</b> Essai de la capacité de remplissage à la boîte en L .....	49
<b>Figure I.10:</b> Essai de la résistance à la ségrégation au tamis .....	49
<b>Figure I.11:</b> la presse hydraulique de compression pour béton (Laboratoire des LNHC Djelfa) .....	50
<b>CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS</b> .....	51
<b>Figure IV.1:</b> Résultats de l'essai d'étalement des BAP .....	52
<b>Figure IV.2:</b> Résultats de l'essai de la boîte en L des BAP .....	52
<b>Figure IV.3:</b> Résultats de l'essai de la stabilité au tamis des BAP .....	53
<b>Figure IV.4:</b> Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des bétons .....	54
dans l'eau saturée en chaux.	
<b>Figure IV.5:</b> Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des bétons .....	54
dans l'eau saturée en chaux.	
<b>Figure IV.6:</b> Variation de la résistance à la compression des bétons dans la solution de .....	55
5% NaCl	
<b>Figure IV.7:</b> Variation de la résistance à la compression des bétons Dans la solution de .....	56
5% MgSO <sub>4</sub> .	
<b>Figure IV.8:</b> Variation de la résistance à la compression des bétons à 56 jours. ....	56
<b>Figure IV.9:</b> Variation de la masse des bétons conservés dans l'eau H <sub>2</sub> O. ....	57
<b>Figure IV.10:</b> Variation de la masse en fonction du période d'immersion dans 5% NaCl .....	58
<b>Figure IV.11:</b> Variation de la masse en fonction du période d'immersion dans 5% MgSO <sub>4</sub> .....	59
<b>Figure IV.12:</b> Le gain en masse échantillons du béton à 28 jours .....	59

# LISTE DES TABLEAUX

<b>CHAPITRE II : DURABILITÉ DES BÉTON</b> .....	25
<b>Tableau II.1:</b> Coefficients de diffusion des ions chlorures [Ki] du BAPFC d'étude .....	39
<b>Tableau II.2:</b> Coefficients de diffusion des ions chlorures [Ki] du BAPZ d'étude.....	41
<b>CHAPITRE III : MATÉRIAUX UTILISÉS ET ESSAIS RÉALISÉS</b> .....	42
<b>Tableau I.1:</b> Propriétés physiques des ciments .....	43
<b>Tableau I.2:</b> Analyse chimique de ciment .....	43
<b>Tableau.I.3:</b> Caractéristiques physiques des sables .....	44
<b>Tableau.I.4:</b> Propriétés physiques des gravillons .....	45
<b>Tableau. I.5:</b> Analyse chimique du sable de dune finement broyé.....	46
<b>Tableau I.6:</b> Caractéristiques du superplastifiant .....	46
<b>Tableau I.7:</b> composition chimique de l'eau robinet .....	47
<b>Tableau.I.8:</b> Programme des essais réalisés à l'état frais .....	48
<b>CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS</b> .....	51
<b>Tableau IV.1:</b> Composition du BAP dans 1m3 .....	51

***INTRODUCTION***  
***GÉNÉRAL***

## **Introduction Général**

Le BAP peut être considéré comme un matériau de haute performance, qui s'écoule sous l'effet de son poids propre sans recours à aucune vibration mécanique. Cette mise en place sous seul effet de la gravité, nécessite une très grande fluidité des matériaux mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés sont obtenus par une quantité élevée de particules fines, Un rapport (Eau/Poudre) faible et un dosage élevé de super plastifiant et d'un agent stabilisateur de viscosité . Les BAP formulés dans le monde sont très riches en quantité cimentaire, par conséquent, la teneur importante du ciment provoque un accroissement de la température des bétons due à la chaleur d'hydratation et engendre en plus l'augmentation de son prix. Il est raisonnable donc de remplacer une partie du ciment par un ajout minéral tel que : le sable de dune broyé .

Afin d'améliorer la durabilité de ces BAP on évalue l'influence de l'ajoute de Sable de dune finement broyé de la région El Mosrane (40 km au Nord de Djelfa). Sur les caractéristiques du BAP vis-à-vis des milieux agressif.

On cherche à obtenir des résultats qui permettent de mettre en évidence l'effet bénéfique de l'ajout de Sable de dune finement broyé de la région El Mosrane dans les BAP Contre les milieux agressifs.

Nous présentons dans le premier chapitre de ce travail, des concept des béton Autoplaçant

Le deuxième chapitre de ce travail durabilité des béton.

Le troisième est consacré aux méthode d'essais pour la mise en œuvre du BAP, puis aux choix, et les caractéristiques des matériaux utilisés.

Le quatrième chapitre de ce travail, présentation des résultats et discussion d'essai vis-à-vis des attaque chimiques.

Enfin, nous clôturons ce travail par une conclusion général, et nous y rappelons les principaux résultats obtenus, en ouvrant la perspective de nouvelles études.

***CHAPITRE I :***  
***CONCEPT DES BÉTONS***  
***AUTOPLAÇANTS***

### **I.1. Généralités sur les bétons**

Le béton est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant.

Le liant peut être «hydraulique», car il fait prise par hydratation, il est appelé ciment, on obtient dans ce cas un béton de ciment, ou béton tout court. Le liant peut être aussi un hydrocarboné appelé aussi bitume, ce qui conduit à la fabrication du béton bitumineux.

La réaction chimique qui permet au béton (de ciment) de faire prise est assez lente : à peine 75 % de la résistance mécanique finale au bout de 7 jours. La vitesse de durcissement du béton peut cependant être affectée par la nature du ciment utilisé et par la température du matériau lors de son durcissement.

La valeur prise comme référence dans les calculs de résistance est celle obtenue à 28 jours (80 % de la résistance finale). Le délai de 28 jours a été choisi afin de pouvoir contrôler la résistance 4 semaines après avoir coulé le béton.

Il est possible de modifier la vitesse de prise d'un béton en lui incorporant à l'état frais des adjuvants (additifs). Il existe plusieurs types d'adjuvants qui permettent de modifier certaines propriétés physico-chimiques des bétons. On peut, par exemple, augmenter la fluidité du béton pour faciliter sa mise en œuvre en utilisant des superplastifiants hautement réducteurs d'eau, le rendre hydrofuge par l'adjonction d'un liquide hydrofuge ou d'une résine polymère, ou augmenter la quantité d'air occlus avec un entraîneur d'air

Le béton classique est constitué d'éléments de granulométrie différente mais continue [1]. Le spectre granulométrique se poursuit également avec la poudre de ciment et parfois avec un matériau de granulométrie encore plus fine comme la fumée de silice. Cette fine est récupérée au niveau des filtres électrostatiques dans l'industrie de l'acier. La continuité du spectre granulométrique peut être étendue vers les faibles granulométries de manière à améliorer la compacité, donc les performances mécaniques du béton [2].

L'eau joue un double rôle : hydratation de la poudre de ciment et amélioration de l'ouvrabilité. En l'absence d'adjuvant superplastifiant, la quantité d'eau est déterminée par les conditions de mise en œuvre. Un béton contient donc une part importante d'eau libre, ce qui tend à favoriser une forte porosité et donc une faible résistance du béton durci. En ajoutant un superplastifiant, appelé aussi haut réducteur d'eau, la quantité d'eau utilisée décroît et les performances mécaniques du matériau sont améliorées, c'est le cas des bétons à hautes performances (BHP)

**I.2. Généralité sur les bétons autoplaçant:****I.2.1. historique des BAP:**

Les chercheurs K. OZAWA ET K. MAEKAWA de Université de Kochi (Tokyo) ont développé le premier prototype de BAP pendant l'été de 1988. Ces résultats ont été présentés par K. OZAWA pour la première fois au 2<sup>ème</sup> Congrès de l'Asie de l'Est et Pacifique sur le Génie Civil et la Construction, tenu en Janvier 1989 à Chiangmai (Thaïlande). Trois années plus tard, en Mai 1992 au 4<sup>ème</sup>, Congrès International CANMET & ACI à Istanbul, l'intervention du K. Ozawa a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération de béton.

**I.2.2. Définition du béton autoplaçant:**

Le béton autoplaçant ou BAP est un béton capable de se mettre en place dans les coffrages les plus complexes et très encombrés uniquement sous l'effet de la pesanteur. Ainsi, ce type de béton ne requiert aucun moyen de vibration pour consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène [3].

Un BAP doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrées avec, cependant, une vitesse dépendante de la viscosité du mélange. Pour remplir cette condition, le béton doit être très fluide, c'est-à-dire très déformable. Or ceci n'est possible que si le rapport eau/ciment est élevé ou si le béton

contient un superplastifiant. Seulement, la fluidité n'est pas la seule propriété recherchée, car il faut bien s'assurer de l'homogénéité de l'ensemble pâte-granulats. De façon corollaire, le mélange du BAP doit être très cohésif et très stable lors de la mise en place et cela jusqu'à son durcissement.

Ceci implique que le BAP doit présenter le minimum de tassement et de sédimentation des particules solides et éviter de présenter un ressuage trop fort, car cela génère une hétérogénéité des propriétés mécaniques, telle qu'une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en

zone inférieure lors du coulage [4]. d'étalement au cône d'Abrams n'est pas suffisante. Un amoncellement de gros granulats au centre

Une bonne stabilité liée, entre autres, à la viscosité du mortier et de son seuil de cisaillement nécessite soit l'ajout d'un agent de viscosité afin d'améliorer la cohésion de l'ensemble, soit d'augmenter la teneur en matière cimentaire et de réduire la teneur en eau libre. Aussi une

bonne stabilité est liée à une optimisation de la compacité granulaire. Or l'augmentation de la teneur en liant n'est pas sans conséquence sur la durabilité, vu le dégagement de la chaleur et le risque de nuire à la capacité de remplissage [5].

Cette complexité amène à combiner différents paramètres pour obtenir la résistance à la compression recherchée. Mais avant d'atteindre cette étape, il est indispensable de s'assurer d'une part de la bonne capacité de remplissage de ces bétons, donc une déformabilité supérieure à celle des bétons ordinaires [6]. D'autre part, il faut s'assurer de la stabilité du mélange et éviter, par conséquent, la ségrégation [7, 8]. Très souvent, la satisfaction de ces deux exigences entraîne un compromis. Autrement dit, en plus de garantir un étalement compris entre 500 et 700 mm et d'assurer une très bonne capacité de remplissage, il faut que l'agent de viscosité introduit pour améliorer la viscosité ne réduise pas les performances mécaniques du béton [9, 10]. En effet, l'utilisation d'un agent colloïdal peut augmenter l'air occlus dans des proportions suffisantes pour réduire significativement la résistance du béton.

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires notamment par leurs propriétés à l'état frais [11]. Ces propriétés se caractérisent principalement par :

- ✚ Une mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement) ;
- ✚ Une stabilité (c'est-à-dire une résistance à la ségrégation et au ressuage).

Afin de pouvoir répondre à ces caractéristiques, la composition d'un BAP doit être soigneusement mise au point.

### **I.3. Constituants d'un béton autoplaçant**

En plus des matériaux constituant du béton conventionnel (gravillons, sable, ciment et L'eau) et pour satisfaire ses propriétés à l'état frais, le BAP contient d'autres éléments qui sont le super plastifiant et les additions minérales. Du fait que le BAP est constitué d'une quantité de fines élevée, son volume d'air est faible. La teneur en eau du BAP est en général proche à celle du béton courant. Pour minimiser les frottements inter granulaires, le BAP comporte un volume des granulats faible par rapport au béton conventionnel (FigI.1).

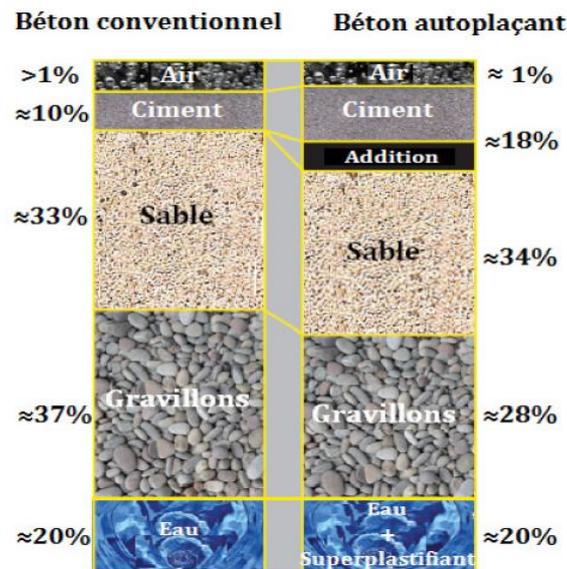


Figure I.1: Compositions du béton autoplaçant et du béton conventionnel [12].

### I.3.1. La Poudre (liant) :

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).

La finesse de la poudre joue un rôle important dans l'amélioration des caractéristiques des BAP. L'augmentation de la finesse de la poudre contribue à l'amélioration de la déformabilité, de l'ouvrabilité, de la résistance à la ségrégation et de la compacité du béton. Ozawa et al [13] ont rapporté que des BAP contenant des poudres fines (de grande finesse) présentent des grandes résistances à la ségrégation en raison de la grande quantité d'eau retenue par les grains de la poudre fine. Cependant, l'utilisation des poudres contenant beaucoup de particules fines inférieures à 20 $\mu$ m nécessite un dosage en SP élevé pour les disperser. Noumowe et al [14] ont montré que la quantité des particules fines inférieures à 100  $\mu$ m a un effet significatif sur la capacité de remplissage et la résistance à la ségrégation.

En général, la poudre est composée d'un ciment Portland seul ou d'un ciment Portland mélange avec des ajouts minéraux. Toutefois, pour économiser le coût de production des BAP et éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, la poudre est souvent un composé binaire, voire ternaire : ciment Portland mélange avec fumée de silice, laitier de haut fourneau, cendres volantes, filler calcaire.....etc.

### I.3.1.1. Le ciment :

Les performances des BAP sont liées à la composition du ciment. En effet, le superplastifiant est adsorbé par les composants C3A et C4AF après le malaxage, donc l'efficacité de dispersion du SP est liée à la teneur du ciment en C3A et C4AF. Ces composants affectent aussi le maintien d'ouvrabilité à cause de leur hydratation rapide. Selon l'EFNARC [15], tous les ciments qui sont conformes à la norme EN 197-1 peuvent être utilisés dans la production des BAP.

### I.3.1.2. Les Additions minérales (<80 µm) :

Les additions minérales sont des poudres très fines de taille inférieure à 80µm. Selon leur réaction pouzzolanique, ils se divisent en deux familles : additions pouzzolaniques et additions inertes ou quasi-inertes (fillers calcaires) [16].

#### I.3.1.2.1. Les fillers calcaires

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, de manière à répondre aux critères de conformité de la norme sur les additions minérales calcaires (NFP18-508), provenant du gisement de roches calcaire pouvant être dolomitiques, massives ou meubles. L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement, s'insère dans le squelette granulaire du ciment (Figure I.2) et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci [17].

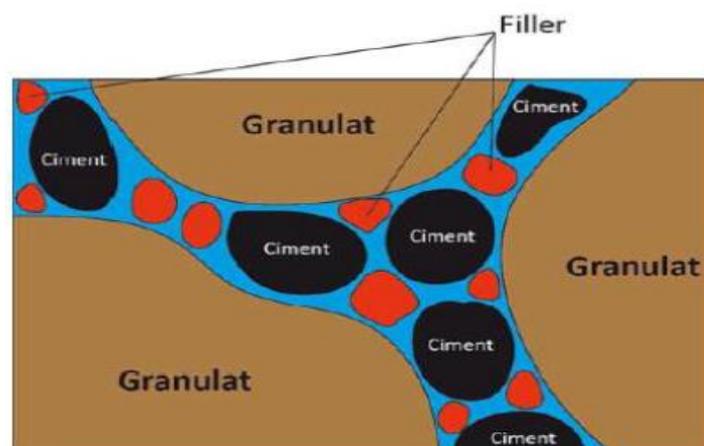


Figure I.2: Illustration de l'effet fillers [17].

- **Influence des fillers calcaires sur le béton frais :**

L'utilisation d'un filler permet par définition de combler les vides entre les grains de dimensions plus importantes du ciment. Cela conduit à la réduction de la demande en eau de

la pâte de ciment ainsi obtenue. Cet effet bénéfique est expliqué par SCHMIDT [18] : « Les particules fines déplacent une partie d'eau des vides entre les particules les plus grosses, la rendant disponible comme lubrifiant interne additionnel. Ainsi le béton est moins ferme et la conservation d'eau est améliorée », les fines calcaires contribuent également au maintien de l'homogénéité des bétons en augmentant la cohésion et en s'opposant à la ségrégation [19].

Selon M.Nehdi [20] Neto et Campitelli observent la réduction du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la teneur en filler calcaire, et aussi l'augmentation de la viscosité plastique au-delà d'une certaine valeur de la finesse du calcaire. Brookbans (cité par [20]), a étudié l'effet de l'addition de 5 à 28% de poudre calcaire au ciment sur les propriétés du béton frais, il a observé que le temps de prise est réduit quand on augmente le taux de fillers et que ces derniers réduisent beaucoup la quantité d'eau et probablement n'ont pas un effet d'entraîneur d'air. Puisque les fillers calcaires sont composés de particules de dimensions inférieures à 125µm, leur surface spécifique va jouer un rôle prépondérant sur l'écoulement en suspension; Pour des finesses proches, le besoin en eau est plus important pour les mortiers avec additions de pouzzolanes que pour les mortiers avec additions calcaires quel que soit la nature du ciment utilisé dans le mélange [21].

- **Influence des fillers calcaires sur les propriétés mécaniques :**

Il est montré que l'utilisation de filler permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges cimentaires (pâte, mortier, béton). Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler et le maximum de résistance est généralement atteint avec un taux de substitution de 10%. Au-delà, l'effet du filler n'entraîne pas de modification des résistances ou alors entraîne une diminution. Cette influence positive du filler sur les résistances mécaniques des bétons peut être expliquée par deux phénomènes :

- Amélioration de la densité de la matrice générale du béton et plus spécifiquement de la zone de transition pâte-granulats [22].
- Influence sur l'hydratation du ciment en servant de site de nucléation mais également en modifiant les produits d'hydratation formés [23].

#### **I.3.1.2.2. La pouzzolane naturelle**

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25%), d'alumine et d'oxyde de fer [24].

Tous les matériaux appelés ( pouzzolanes ) ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut, dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés:ajouts de produits chimiques ,broyage à une finesse plus élevée et traitement thermique.

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes:

❖ **Propriétés hydrauliques des pouzzolanes:**

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de la chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

❖ **Propriété physiques de remplissage :**

en plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité

### **I.3.1.2.3. laitiers de haut fourneau**

Le laitier granulé de haut-fourneau est un sous-produit des usines sidérurgiques formé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances minérales. Une fois sorti du four, il subira un refroidissement rapide qui lui donne une structure vitreuse apte à réagir avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment ; Selon la norme européenne ENV 197-1 [25], Le laitier de haut-fourneau est un matériau hydraulique latent, c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il a subi une activation convenable.

❖ **Influence de laitier de haut fourneau sur le béton frais:**

Il est bien prouvé que l'ouvrabilité des bétons au laitier est bien améliorée comparée à celle des bétons sans laitier. Selon boukendakdji [26] la teneur en laitier a un effet direct sur la demande en eau du mélange où le rapport E/C diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier ce qui est expliqué par les surfaces vitreuses lisses à faible taux d'absorption des grains du laitier ce qui permet le glissement inter granulaire dans le mortier et par conséquent une faible demande en eau et une meilleure cohésion. Ce qui les rend bénéfiques pour la formulation des bétons autoplaçant, puisqu'ils permettent de baisser la viscosité et augmente la plasticité de la pâte par la diminution de la quantité de clinker réactive au jeune âge et réduction d'étringite formé.

❖ **Influence de laitier de haut fourneau sur la durabilité:**

Le mélange de ciment et de laitier qui, contenant plus de silice et moins de chaux que le ciment Portland seul, produit plus de C-H-S. La microstructure résultante de la pâte de ciment hydraté est dense, ce qui permet d'améliorer la résistance à long terme et particulièrement la durabilité. En effet d'une part le risque de réaction alcali-silice peut être éliminé

indépendamment de la teneur en alcali du ciment portland ou de la réactivité des granulats .D'autre part, l'attaque des sulfates est réduite ; les ciments contenant 40% ou plus de laitier ont généralement une bonne résistance aux sulfates et en particulier si la teneur en C3A est faible [27].

### **I.3.2. Les Granulats :**

L'ouvrabilité et la résistance à la ségrégation des BAP sont largement influencées par le volume, la forme, la granulométrie, la taille, l'humidité, le rapport Gravillon/Sable (G/S) et la finesse des granulats.

#### **I.3.2.1. Le volume des granulats :**

Le volume de sable est l'un des facteurs clés qui caractérisent les MAP. Un volume de sable adéquat doit donner à la fois un mortier très fluide et homogène. Si le volume de sable dépasse certaine limite, le contact entre les particules de sable augmente, ce qui conduit vers la diminution de la déformabilité des MAP [28]. Okamura [28] recommande un volume de sable représentant 40% de celui du mortier. ont rapporté que quel que soit la forme de gros granulats, la diminution de la capacité de passage est due à l'augmentation du volume de gros granulats. Yurugi et al [29] ont rapporté que la réduction du volume de gravillons dans les BAP est plus efficace que la diminution du rapport S/M pour augmenter la capacité de passage à travers des milieux confinés. Okamura et Ozawa [30] ont limité le volume de gros granulats à 50% du volume des solides contenus dans le béton.

#### **I.3.2.2. Rapport Gravillon/Sable :**

Le rapport G/S est lié à la compacité du squelette granulaire. Pour les BAP, un rapport G/S proche de 1 permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire et de réduire par conséquent la quantité de la pâte liante nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitée [31].

#### **I.3.2.3. La Finesse des granulats :**

Des sables possédant un module de finesse variant entre 2,4 et 2,6 ont été utilisés avec succès dans la production des BAP. Cependant, un sable fin est recommandé pour assurer une résistance satisfaisante à la ségrégation [32].

### **I.3.3. L'eau de gâchage :**

La teneur en eau d'un BAP a un grand effet sur la fluidité et la résistance à la ségrégation de celui-ci. Lorsque la teneur en eau est trop élevée, la résistance à la ségrégation devient faible et la pâte ou le mortier se sépare facilement des gravillons, ce qui favorise le risque de blocage auprès des armatures. Si la teneur en eau est trop faible, le mélange aura une fluidité insuffisante, même avec l'utilisation du superplastifiant [33].

### I.3.4. Les Adjuvants :

Ces sont des produits chimiques que l'on ajoute au mortier ou béton pendant le malaxage avec de petites quantités afin de modifier certaines propriétés à l'état frais ou à l'état durci. Parmi les adjuvants les plus utilisés dans la production des BAP, il y a les superplastifiants et les agents de viscosité.

#### I.3.4.1. Les super plastifiants:

Ce sont des réducteurs d'eau à haute efficacité, et se présentent généralement sous forme de liquide. Ils sont composés de longues molécules organiques de masse élevée. Les plus couramment utilisés sont les sels de sodium ou de calcium du polynaphtalène sulfoné, et les sels de sodium de la polymélamine sulfonée. Les copolymères acrylate -ester ou polyacrylates ont récemment été introduits sur le marché. Le mode d'action des super plastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit:

Lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment, qui présentent un grand nombre de charges opposées (positives et négatives) sur leur surface, tendent à s'agglomérer sous forme d'amas (floculation). Par conséquent, cette floculation piège un certain volume d'eau entre les grains de ciment (eau captive) qui n'est plus disponible pour assurer une bonne maniabilité au béton.

Les super plastifiants en s'adsorbant à la surface des grains de ciment brisent cette dynamique. Ils neutralisent les différentes charges et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules et, par conséquent, la dispersion des grains de ciment libère de l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la maniabilité.[34]

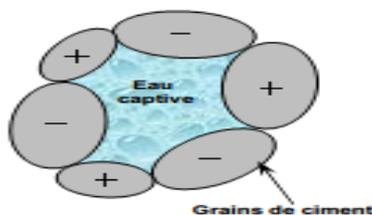


Figure.I.3: Pâte de ciment non adjuvantée

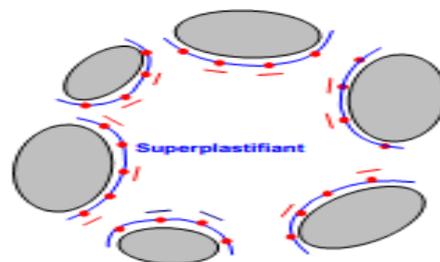


Figure.I.4 : Pâte de ciment additionnée d'un super plastifiant

### I.3.4.2. L'agent colloïdal ou de viscosité:

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

L'utilisation d'agents de viscosité a pour but de stabiliser le béton en fixant l'eau dans le mélange, ce qui diminue le phénomène de ressuage et donne une plus grande cohésion au béton. Ces produits sont à la base de longues molécules polymères (polysaccharides) ou de dérivées cellulosiques. Ils se présentent généralement sous forme de poudre. L'intérêt de leur utilisation est parfois discuté du point de vue de leurs conséquences sur la rhéologie. Toutefois, il est démontré qu'ils permettent, dans le contexte de la production industrielle, de diminuer la sensibilité des bétons autoplaçants aux variations de teneur en eau.

En général, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de superplastifiant croît avec celle de l'agent de viscosité. Un dosage trop important en agent de viscosité empêche la pâte de se déformer et entraîne une perte de fluidité, il peut conduire aussi à un entraînement d'air excessif. Les agents de viscosité permettent un maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps estimé à environ une heure [30].

## I.4. Spécificité de la composition d'un béton autoplaçant: ..

Après plusieurs recherches effectuées en laboratoires, les essais ont montré que pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un béton autoplaçant doit avoir certaines caractéristiques[35].

### I.4.1. Volume de pâte important:

Nous entendons par pâte le mélange : ciment, eau, additions et air occlus, un volume de pâte important permet d'écarter les granulats les uns des autres et de diminuer les forces de frottements qui ont tendance à limiter l'étalement du béton [36]

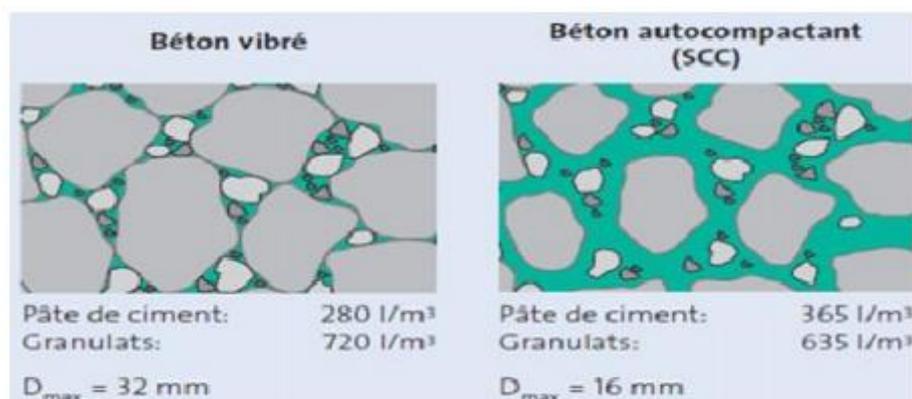


Figure I.5: Volumes relatifs de pâte de ciment différents pour un béton vibré et unBAP [36]

### I.4.2. Ajouts de super plastifiant et de rétenteurs d'eau (agent de viscosité):

Afin de modifier la fluidité d'un BAP, il est nécessaire d'utiliser un superplastifiant qui augmente l'ouvrabilité du béton mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage. Pour minimiser l'effet négatif du superplastifiant, on ajoute généralement un agent de viscosité (appelé aussi agent colloïdal). [Holcim]

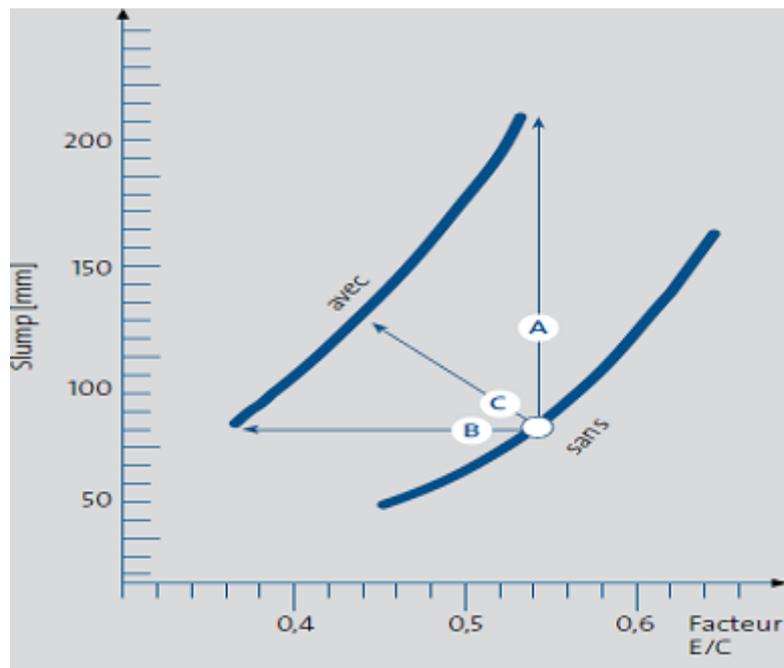


Figure I.6: Les utilisations des superplastifiants. [Holcim]

A: Augmentation de la fluidité (teneur en eau égale).

B : Diminution de la teneur en eau (à fluidité égale).

C : Diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité.

### I.4.3. Faible volume en gravillons:

Lors de l'écoulement du béton dans des zones confinées, les gros granulats ont tendance à interrompre l'écoulement du béton. Pour minimiser les risques de blocage, nous optons pour des granulats de diamètre inférieur à 20 mm. En général, le rapport (gravillon/sable) est de l'ordre de 1 dans les BAP [37].

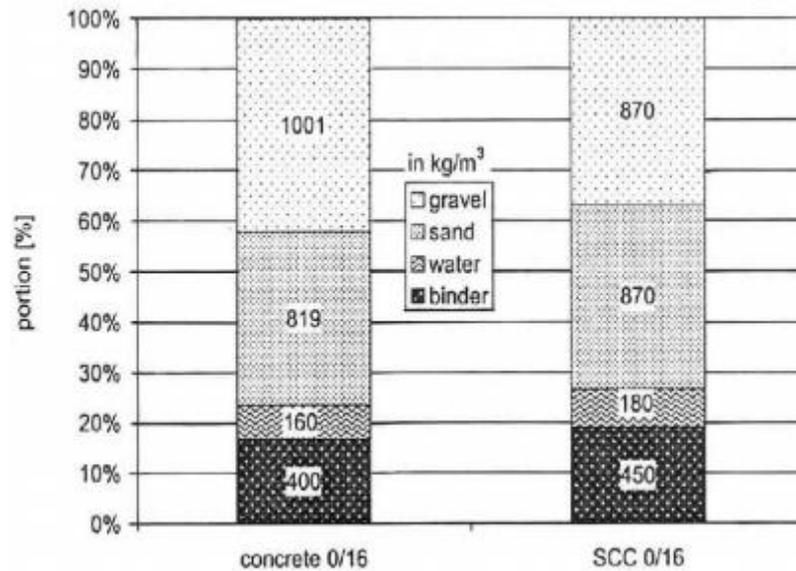


Figure I.7: Comparaison entre le volume des gravions de BAP et celle d'un béton [38]

### I.5. Méthode de formulations des BAP :

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

Deux grandes familles prévalent actuellement :

- La première [Hayakawa 95, Nagataki 95] concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m<sup>3</sup>) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent 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 conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants. [39]
- Une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables. vibré (d'après Jacobs, 1999) cité à [S.A SSIE, 2004].

**I.5.1. Différentes types des méthodes :****a)- Méthode Japonaise :**

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

**1. Dosage des gravillons** Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m<sup>3</sup> de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.[05]

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m<sup>3</sup>.

Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm ,nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

**2. Dosage du sable:**

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

**3. Dosage du liant:**

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m<sup>3</sup>).

Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

**4. Dosage de l'eau et du super plastifiant :**

Les dosages en eau et en super plastifiant 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.[40]

**b)- Méthode Suédoise: proposée par [Petersson et al, 1996]:**

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par [Tangtermsirikul et al, 1995].

En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée.

Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat.

**c)- Méthode Française :**

Méthode française (LCPC) : proposée par [De Larrard et al, 1994] :

Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- ✚ les distributions granulaires
- ✚ les proportions du mélange
- ✚ la compacité propre
- ✚ la densité apparente

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- ✚ la proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple)
- ✚ le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- ✚ le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé
- ✚ les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à  $5 \cdot 10^4$ . La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/ phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle.

La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes.

#### **d)- Autres Méthodes**

D'autres méthodes de formulation, que nous ne développerons pas dans cette étude bibliographique, ont été publiées tels que la méthode reposant sur la théorie de « l'excès de pâte » : proposée par [Oh et al, 1999] ; la méthode d'évaluation simple utilisée par [Ouchi et al, 1999] ( étudie l'interaction entre les granulats et les particules fines du mortier frais) etc.[41]

### **I.6. Caractérisation du béton à l'état frais :**

#### **I.6.1. caractéristiques rhéologiques des BAP :**

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique.

Le comportement rhéologique d'un matériau (Figure I.8) est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement,  $\tau_0$ .

Le fluide est considéré comme Binghamien si la courbe d'écoulement est une droite, qui a pour équation:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}^b$$

Avec  $\tau$  la contrainte de cisaillement (Pa),  $\tau_0$  le seuil de cisaillement (Pa),  $\eta_p$  la viscosité plastique ( $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) et  $\dot{\gamma}$  la vitesse de déformation ( $\text{s}^{-1}$ ).

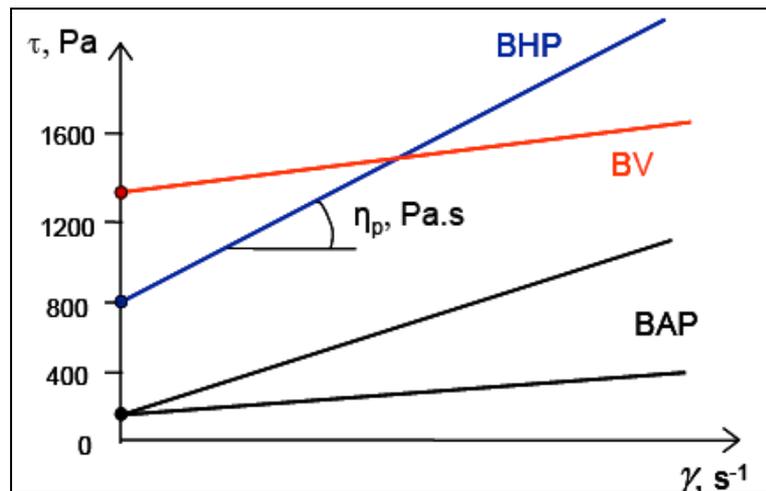


Figure I.8: Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton [42]

En ce qui concerne les bétons autoplaçant, certains auteurs ont montrés que leur équation de comportement suit le modèle de Herschel-Bulkley dont l'équation de comportement est la suivante :

$$\tau = \tau_0 + a\dot{\gamma}^b$$

Où a et b sont des constantes de comportement.

Toutefois, ce modèle est plus exigeant que celui de Bingham car il nécessite la détermination d'un paramètre supplémentaire.

### I.6.2. essais de caractérisations d'un BAP :

Les bétons autoplaçant sont caractérisent à l'état frais par trois essais essentielles (selon les recommandations de AFGC) [43]

- Essai d'étalement
- Essai de boîte en L
- Essai de stabilité au tamis.

#### I.6.2.1. L'essai d'étalement (slump flow):

L'essai le plus courant permettant de caractériser la mobilité en milieu non confiné est l'essai d'étalement (slump flow) à l'aide du cône d'Abrahams (Figure I.9). En effet, la valeur de l'étalement, donnée par la mesure du diamètre de la galette de béton (Figure I.10), s'avère être plus représentative que celle de l'affaissement.

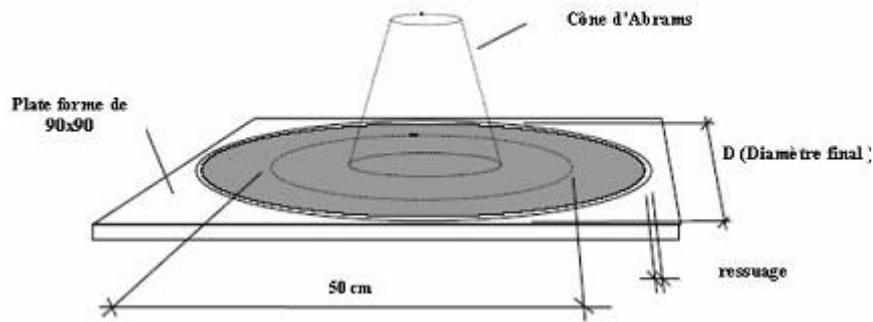


Figure I.9 : Représentation schématique de l'essai d'étalement.



Figure I.10: Détermination de l'étalement.

Les valeurs d'étalement sont habituellement fixées entre 60 et 75 cm, sans auréole de laitance ou d'amoncellement de gros granulats au centre en fin d'essai [43]. La vitesse d'étalement du béton est également une indication souvent prise en compte ( $t_{50}$  par exemple : temps pour atteindre une galette de diamètre 50 cm).

D'autres essais permettent d'évaluer la mobilité du béton en milieu non confiné comme celui de l'entonnoir en forme de V (V funnel) (Figure I.11) [44].

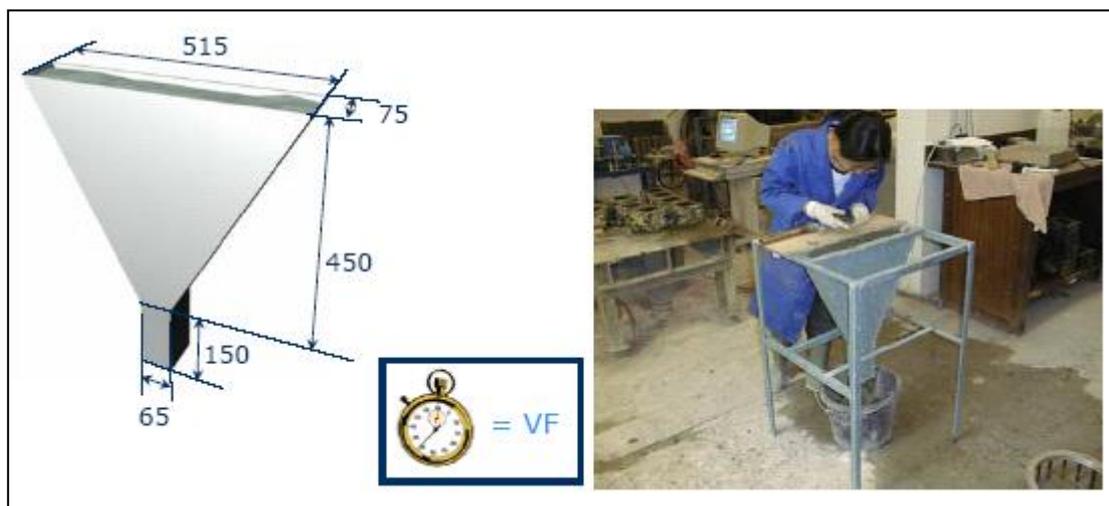


Figure I.11: Entonnoir en forme V (V funnel) [45]

### I.6.2.2. L'essai boîte en L (L-box test) :

Cet essai a pour but de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique. Cette caractérisation est traduite par la capacité de ce béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent permettre de déceler des problèmes de blocage (par formation de voûtes des granulats) lors de l'écoulement.

L'essai de la boîte en L (Figure I.11) 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)

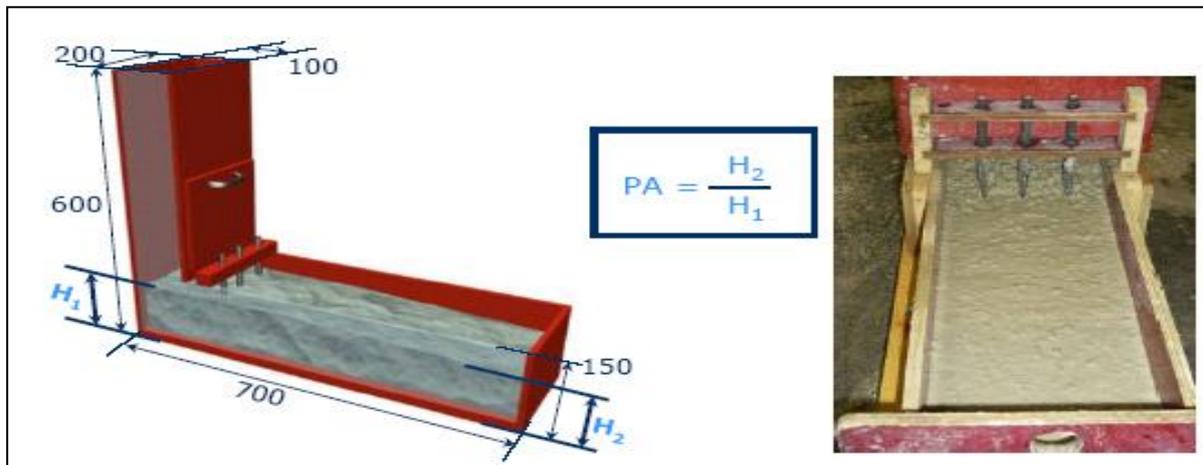


Figure I.12: Essai de la boîte en L (L-box test) [45]

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs  $H_2/H_1$ , voir Figure I.8) doit être supérieur à 0,8 [45]. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

Il existe d'autres essais qui permettent de caractériser la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des BAP. Les essais sont (Figure I.13) :

- L'essai de tube en U.
- L'essai de caisson.
- Essai de la passoire.

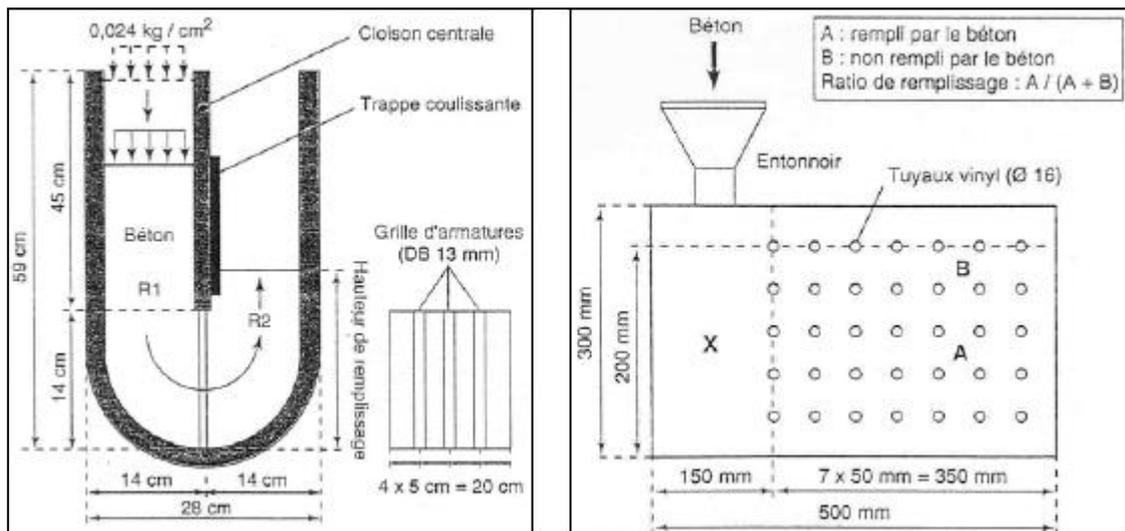


Figure I.13: essai en U (à gauche), essai de caisson (adroite)

### I.6.2.3 l'essai de stabilité:

L'aptitude d'un BAP à rester homogène une fois coulé ; est aussi importante que celle durant la mise en place. L'homogénéité du matériau conditionne en effet ses propriétés à l'état durci (résistance mécanique, retrait, durabilité, etc.). Le béton doit donc être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée

#### a. Résistance à la ségrégation:

L'essai de stabilité de référence n'existe pas encore mais la résistance à la ségrégation statique d'un BAP doit impérativement être caractérisée. Différents tests peuvent être utilisés pour caractériser cette capacité d'un BAP à rester homogène après sa mise en place jusqu'au début de prise.

Un de ces essais est celui dit de « stabilité au tamis », développé par GTM (Figure I.13) [07], qui consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (noté  $P_{\text{LAITANCE}}$  par la suite) d'un échantillon de béton ( $4,8 \pm 0,2$  kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes :

- $0\% < P_{\text{LAITANCE}} < 15\%$  : stabilité satisfaisante,
- $15\% < P_{\text{LAITANCE}} < 30\%$  : stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser sur site),
- $P_{\text{LAITANCE}} > 30\%$  : stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).

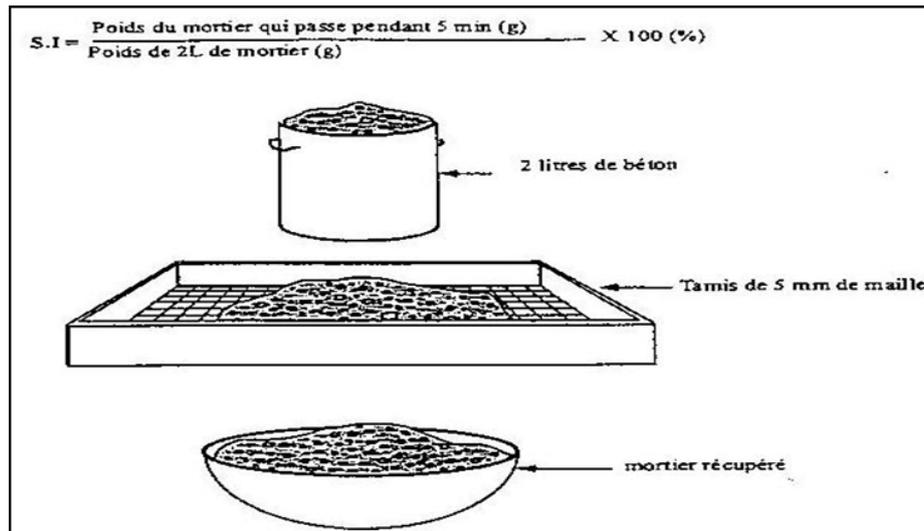


Figure I.14: Essai de stabilité au tamis

### b. Ressuage :

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, Figure I.15) : le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer [43]. Ce test semble cependant peu pratique à être utilisé étant donné la nocivité du produit employé.

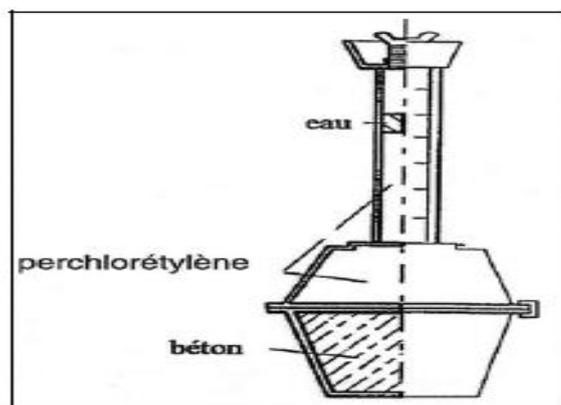


Figure I.15. Essai de ressuage à l'aéromètre [43]

## I.7. Propriétés du béton durci :

### I.7.1. La résistance mécanique:

La mise au point d'une formule de béton consiste à rechercher à partir d'un Composant donné (le plus souvent local), un mélange ayant à l'état frais une certaine maniabilité, à l'état durci une résistance en compression donnée, et ce au moindre coût. Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à

l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (proportion gravier / sable) [G.DREUX ET J.FESTA].

D'une façon expérimentale les BAP impliquent un rapport E/C bas, donc de nature à fournir de bonnes résistances mécaniques.

Les BAP aux bétons de références sur des éléments standards, ils ont conclu qu'il y a une légère différence entre la résistance à la traction et en compression des BAP et du béton vibré.

### **I.7. 2. Le module élastique:**

Comme les BAP renferment un faible volume de granulats, il faut prévoir des modules d'élasticité plus faibles que pour des bétons de mêmes résistances mais de rhéologie conventionnelle. Les travaux de [PAULTRE ET COLL.], précédemment cités, ont montré que les modules d'élasticité sont moins élevés pour les BAP, comparablement au BHP, ce qui confirme cette idée a également trouvé que le module élastique d'un BAP est systématiquement inférieur à celui du BO dérivé. mais la différence n'est pas très importante, puisqu'elle se situe entre 2 et 8%.

De manière plus précise, pour expliquer ce fait, on peut imaginer le béton comme un composite à deux phases composées d'une matrice, la pâte de liant durcie, et en second lieu, d'inclusion des granulats. Sachant que le module d'élasticité est principalement affecté par les granulats, les BAP sont donc susceptibles d'être plus déformables que les BO. Néanmoins, plusieurs recherches concernant le module d'élasticité des BAP montrent qu'il est souvent proche à celui de BO, lorsque les deux types de béton ont la même résistance

### **I.8. Domaines d'application:**

Le BAP constitue dans de nombreux domaines une alternative intéressante au béton conventionnel vibré. Ces domaines comprennent le bâtiment, le génie civil, les tunnels, la préfabrication et les travaux d'assainissement et de réhabilitation. Comparé au béton vibré, les arguments en faveur du BAP sont les suivants:

- ✚ Rendements améliorés et exécution plus rapide
- ✚ Réduction des nuisances sonores durant l'exécution
- ✚ Liberté accrue des formes de coffrage
- ✚ Facilité de bétonnage d'éléments exigus
- ✚ Qualité accrue des surfaces de béton

- ✚ Réduction/suppression des travaux de ragréage
- ✚ Facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante
- ✚ Remplissage de parties difficilement accessibles
- ✚ Diminution de la pénibilité du travail et suppression de l'apparition du syndrome du vibreur.

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

### **I.9. Les innovations des BAP:**

À la différence des bétons à haute performance, qui demeurent des bétons destinés aux chantiers exceptionnels, les BAP se vulgarisent petit à petit en séduisant le monde du bâtiment. Leur production reste minime de 1 à 4 % du volume total, mais les BAP ont les atouts nécessaires à la consolidation de leur développement actuel, entre autres, on peut citer :

- ✚ La mise en place des BAP est grandement facile et peut généralement être réalisée par un seul ouvrier, même dans le cas de volumes importants donc, il est raisonnable de penser que la main d'œuvre nécessaire serait moindre.
- ✚ La suppression de vibration permet de limiter la consommation d'énergie tout en réduisant les nuisances sonores pour l'environnement, en conséquence, les délais d'exécution et le coût global des constructions pourraient ainsi être moindres.
- ✚ La grande maniabilité assure la fabrication d'ouvrages dont la finition est toujours d'une qualité acceptable. Par ailleurs, l'obtention d'une meilleure qualité de BAP est pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation, cela va dans le sens d'une durabilité accrue. Comme les BAP pourraient être coulés dans n'importe quelle forme et taille des coffrages, les architectes peuvent désormais exploiter des modèles complètement nouveaux pour des structures élégantes

**I.10. Conclusion :**

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

Malgré les aspects intéressants que les BAP proposent, en particulier à l'état frais et leur utilisation en constante augmentation, les BAP ne disposent pas encore une bonne connaissance sur leurs propriétés à l'état durci, son développement est freinée par une formulation complexe et un comportement sous sollicitations extrêmes (comportement différé, comportement au feu, durabilité) mal connu.

Alors que de nombreuses études visant à développer l'utilisation du BAP étaient (et sont encore) menées par différentes entreprises ou laboratoires universitaires, plusieurs questions posées par les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre restaient sans réponse.

***CHAPITRE II :***  
***DURABILITE DES BÉTONS***

## II.1. Introduction

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau béton. Cette propriété est définie (dans un cadre très général) par la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Le paramètre régissant la durabilité est bien entendu la perméabilité. Plus cette dernière est réduite et mieux sa durabilité en sera augmentée.

Pour évaluer la durabilité « potentielle » d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations. [46]

Les principaux processus chimiques à la base des dégradations du béton, pour la majorité des attaques chimiques, sont généralement regroupés en trois catégories :

- ✚ A- L'hydrolyse ou la lixiviation (dissolution) des hydrates.
- ✚ B- Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif.
- ✚ C- La formation de produits expansifs à l'intérieur du béton. [47].

## II. 2. Durabilité et économie

La durabilité est un objectif de qualité pour l'ingénieur, et le métier de ce dernier consiste à atteindre les objectifs fixés au moindre coût. Il en résulte deux règles qui permettent de concilier au mieux économie et durabilité.

### II. 3. Béton durable et béton résistant

La porosité est le paramètre de premier ordre qui caractérise la texture du béton ; ce n'est pas évidemment pas le seul paramètre, mais c'est celui qu'il faut fixer avant d'étudier tous les autres. Il conditionne presque toutes les propriétés du béton et, en premier lieu, sa résistance mécanique.

La résistance aux efforts de compression est la propriété principale du béton, celle qui permet son utilisation comme matériau de construction. Plus faible est la porosité, plus grande est la résistance. Mais presque toutes les autres propriétés du béton dépendent de ce même paramètre de premier ordre. Toutes choses égales par ailleurs, le béton le plus résistant sera aussi le plus rigide, le plus dur, etc. Serait-ce aussi le plus durable ?

Pour évaluer expérimentalement la durabilité du béton, il faut étudier son comportement vis-à-vis d'un certain nombre de mécanismes susceptibles de le dégrader. On peut traiter la question comme la durabilité du béton face au gel-dégel, à l'alcali-réaction, aux environnements agressifs.

Une façon pratique d'y parvenir est de toujours partir de la résistance aux efforts de compression pris comme critère global et de discuter de la durabilité en deux temps :

- ❖ toutes choses égales par ailleurs, en comparant des bétons qui ne diffèrent que par leur résistance ;
- ❖ puis à résistance constante, en examinant les paramètres spécifiques de la durabilité.

Il y a donc avantage, en vue de l'objectif de durabilité, à choisir la classe de résistance du béton en fonction de l'agressivité du milieu, d'autant plus élevée que le milieu est plus agressif. D'un point de vue pratique, cela signifie que c'est l'exigence de durabilité qui peut, parfois, déterminer la résistance à prendre en compte dans le calcul de l'ouvrage.

On peut considérer qu'un niveau de résistance adapté au milieu environnant est un premier critère de qualité qui doit être complété par d'autres conditions. En effet, tous les bétons de même résistance à la compression ne sont pas également durables. A résistance égale, il existe des différences parfois importantes, entre les bétons. Au simple critère de résistance, il faut ajouter d'autres considérations.

D'abord, la résistance (et ainsi la porosité) n'est qu'un critère de premier ordre qui doit être complété par d'autres mesures comme, par exemple, la perméabilité ou la diffusion, la distribution des tailles de pores. En effet, un autre facteur majeur est la dimension des pores. A porosité égale, les agents agressifs pénètrent d'autant plus difficilement que les pores sont fins. Or, la finesse des pores dépend du rapport E/C, du ciment (CHF-CEM III/A, CLC-CEM V/A et B, CLK-CEM III/C comparés au CPA-CEM I et CPJ-CEM II/A [43]), des additions minérales (cendres volantes, laitiers), de L'exposition du béton (dessiccation, carbonatation) et même de la dimension et de la nature des granulats [44].

## II.4. Attaques du béton par les sulfates

### II.4.1. Définition

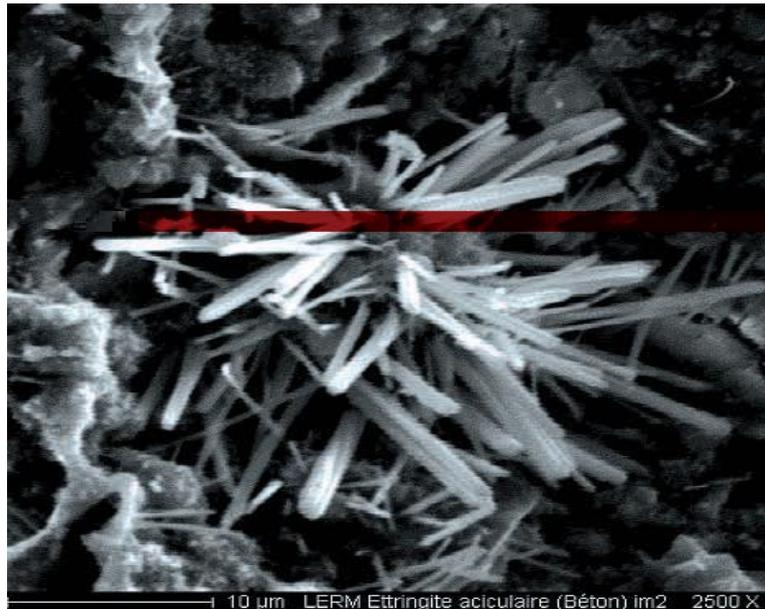
L'attaque sulfurique connue aussi sous le nom d'ettringite est une réaction naturelle que se produit à l'intérieur du béton , soit au moment de l'hydratation du ciment, soit de manière différée.

On distingue trois types d'ettringite qui peuvent coexister dans un même béton . Elles se différencient essentiellement par les conditions de leur formation :

- ❖ l'ettringite de formation primaire **(a)** qui ne provoque pas d'expansion,
- ❖ l'ettringite de formation secondaire **(b)** qui peut provoquer une expansion,
- ❖ l'ettringite de formation **(c)** consécutive . une élévation de température subie par le béton au cours de son histoire, qui peut aussi provoquer une expansion dans les

#### **a)l'ettringite de formation primaire (figure .II.1) :**

correspond . un produit issu de l'hydratation des ciments qui se forme par réaction entre le régulateur de prise (gypse, hémihydrate, anhydrite)et les aluminates de calcium. Ces cristaux, de forme aciculaire, ne provoquent pas de gonflement car ils cristallisent avant le durcissement du béton, dans les espaces libres du matériau. Ils revêtent même un caractère bénéfique, puisqu'ils contribuent . la cohésion de la pâte de ciment au jeune âge, leur formation étant accompagnée par une diminution de la porosité Et par une augmentation concomitante de la résistance mécanique du mélange.



**Figure.II.1: Ettringite primaire non expansive dans la pâte de ciment, vue au microscope électronique à balayage**

**b) l'ettringite de formation secondaire (figure .II.2) :**

correspond . une ettringite qui cristallise dans le béton durci, . la faveur de circulation d'eau dans les bétons (phénomènes de dissolution/recristallisation) et de sources de sulfates externes (sols, milieu mariné) ou internes (quantités trop importantes de sulfates dans les constituants du béton). Cette ettringite peut générer des gonflements internes pouvant conduire . l'apparition de désordres sur les ouvrages. Dans le cas des phénomènes de dissolution/recristallisation, elle cristallise sous forme aciculaire dans les espaces libres du béton (pores, fissures, interfaces pâte-granulats) . partir de la solution interstitielle ou . la faveur de percolation d'eau dans le matériau poreux ou fissuré, et ne présente généralement pas de caractère expansif. En revanche, l'ettringite de formation secondaire consécutive . un apport externe ou interne de sulfates, est susceptible de générer des gonflements internes principalement attribués aux pressions de cristallisation. Contrairement aux faciès non expansifs, cette ettringite pathologique cristallise sous une forme massive et comprimée.

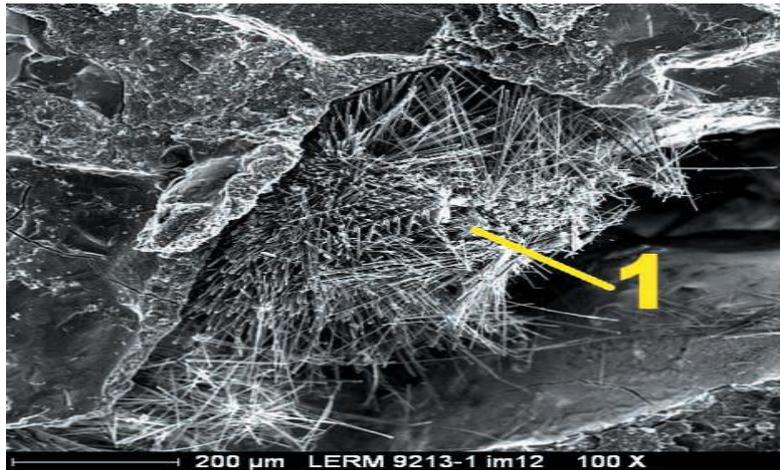


Figure.II.2: Ettringite secondaire non expansive dans la pâte de ciment, vue ou microscope électronique à balayage

c) l'ettringite de formation différée (figure .II.03):

(plus connue sous le nom de DEF-Délaye Ettringite Formation) concerne uniquement des bétons ayant subi, au jeune âge, une augmentation de température supérieure . 65-70 °C, température au-delà de laquelle l'ettringite de formation primaire ne peut se former au cours des réactions d'hydratation du ciment et/ou est décomposée. De telles conditions de température peuvent se produire au cours de traitements par étuvage ou dans le cas de pièces massives en béton. Par la suite, des cristaux d'ettringite peuvent se former, après retour . température ambiante et en présence d'humidité., dans le béton durci, et sont ainsi susceptibles de provoquer des pressions de gonflement conduisant . des phénomènes d'expansion.

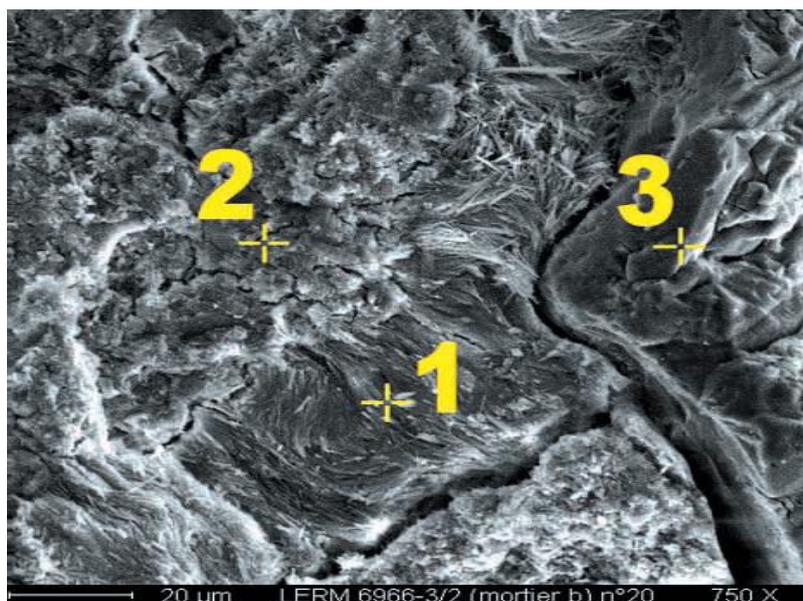


Figure.II.03: Ettringite secondaire non expansive dans la pâte de ciment, vue ou microscope électronique à balayage

## II.4.2. Mécanismes d'attaques:

Le schéma suivant résume les différentes étapes de l'attaque sulfatique.

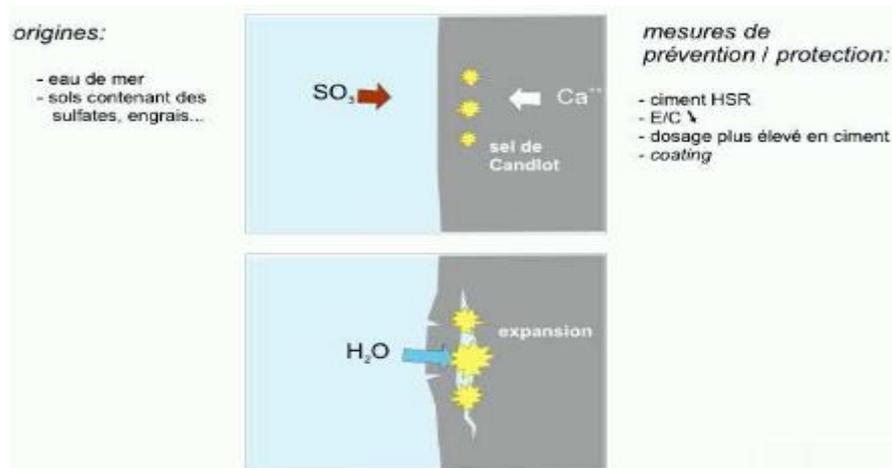


Figure.II.4: L'attaque par les sulfates. [48]

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques :

- Expansion
- Perte des propriétés liantes des C-S-H.

Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates.

## II.5. Attaque par les acides :

### II.5.1. Introduction :

attaques acides se font principalement suivant un mécanisme de dissolution. Suivant le cas, le phénomène de dissolution peut être accompagné de la précipitation du sel formé lors de la réaction base + acide si le sel est peu soluble. Ce sel peut avoir un effet colmatant et ralentir les réactions de dissolution.

Le produit final de dégradation par un acide peut-être un gel de silice résultant de la décalcification totale des C-S-H qui, selon Grube et al [49], peut avoir un rôle protecteur à la surface du béton et ralentir les réactions. Ces auteurs insistent également sur le fait que les conditions de transport de l'agent agressif sont plus importantes que sa concentration

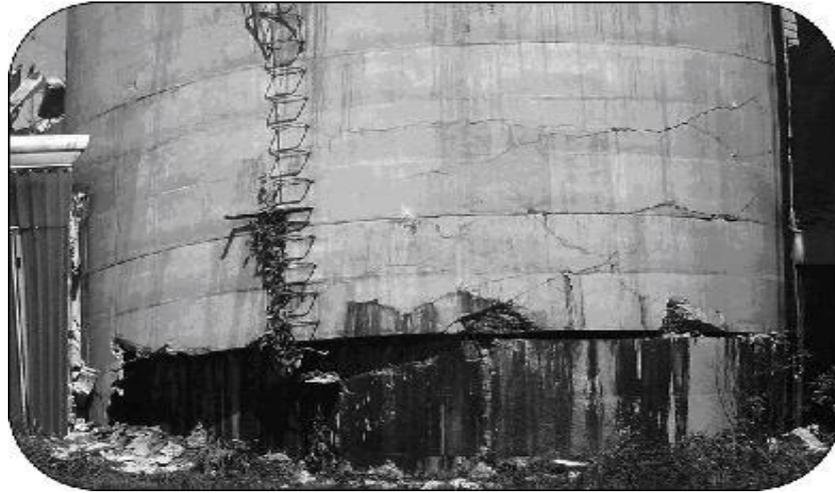


Figure.II.5: La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage.

### II.5.2. Mécanisme d'attaque des acides :

On distingue deux types de détérioration:

**a-** L'agression résolvante ;

**b-** Le gonflement

#### **a- L'agression résolvante**

Lorsqu'il y a suffisamment d'eau en qualité de fluide de transport, les composants de la pâte de ciment sont détachés de la surface par l'eau douce ou les substances chimiques nuisibles qu'elle contient. Les granulats non-solubles et des parties de la pâte de ciment durcie sont alors mis à nu, ils se forment une surface en forme de "béton lavé" et la porosité augmente.

L'attaque par l'acide est provoquée par la réaction d'un acide et la partie d'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) de la pâte de ciment qui produit un sous-produit de sel de calcium fortement soluble. Ces sels de calcium solubles sont facilement enlevés de la pâte de ciment affaiblissant de ce fait la structure de la pâte dans l'ensemble. Cette réaction de base est montrée ci-dessous :



acide hydroxyde de calcium sel de calcium eau

#### **b- Effet d'éclatement lié au gonflement :**

Les attaques sous la forme de gonflement sont provoquées par les réactions des matières transportées dans la structure susceptibles de donner naissance à des formations nouvelles très

volumineuses. A l'état plastique, les pressions de cristallisation et d'hydratation sont neutres étant donné qu'il y a des possibilités de déformation. Ce n'est qu'après un état de durcissement minimal que les réactions de gonflement peuvent causer des dommages. (C'est pourquoi une eau contenant des sulfates peut tout à fait être appropriée en qualité d'eau de gâchage, bien qu'elle causerait des dommages ultérieurement au béton durci.) La figure II -06 peut résumer l'attaque par les acides.

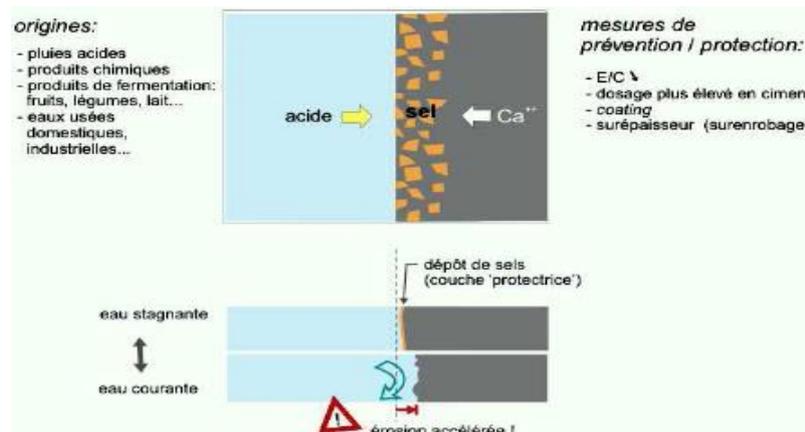


Figure.II.6: L'attaque par les acides. [48]

### II.5.3. Revue des essais :

#### II.5.3.1. Attaque par les acides (ASTM C 267-96)

Pour la caractérisation de la résistance vis-à-vis des attaques chimiques ainsi que la dégradation, des éprouvettes cylindriques de diamètre égal à 59 mm et de hauteur égale à 126 mm ont été confectionnées, démoulées à 24 heures, et conservées dans l'eau pendant 28 jours. La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans des solutions acides est évaluée selon la norme ASTM C 267-96 [50].

Après 28 jours de cure sous l'eau, les éprouvettes sont pesées pour déterminer M1 puis elles sont immergées dans les différentes solutions suivantes :

- ❖ 5% et 2% d'acide chlorhydrique (HCl)      acide fort
- ❖ 5% et 2% d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)      acide fort
- ❖ 5% et 2% d'acide acétique (CH<sub>3</sub>COOH)      acide faible
- ❖ Témoins (eau distillée)                              neutre

Ces concentrations sont souvent choisies dans la littérature. L'utilisation de faibles concentrations demanderait plus de temps d'investigation, C'est pourquoi le choix s'est porté sur celle de 5% qui représente le seuil maximal pour un milieu très agressif.

La résistance aux agressions chimiques des échantillons immergés dans ces solutions est vérifiée par leur perte de poids. Les éprouvettes sont rincées 3 fois à l'eau du robinet pour éliminer le mortier altéré et puis laissées sécher pendant ½ heure. Ensuite on procède à la pesée de ces dernières (M). Cette opération est effectuée après le premier jour d'immersion, puis une fois par semaine, la solution d'attaque est renouvelée tous les mois (selon la valeur du pH). Le degré de l'attaque est évalué par la formule suivante [51] :

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M_1 - M_2)/M_1] \times 100$$

Avec M1, M2 les masse des éprouvâtes avant et après immersion, respectivement.

### 5.1. L'effet de l'acide chlorhydrique

Le suivi de la perte en poids en fonction du temps des éprouvettes de BAP immergées dans la solution à base d'acide chlorhydrique HCl de 5 % et 2% déconcentration, est illustré par la figure 7.

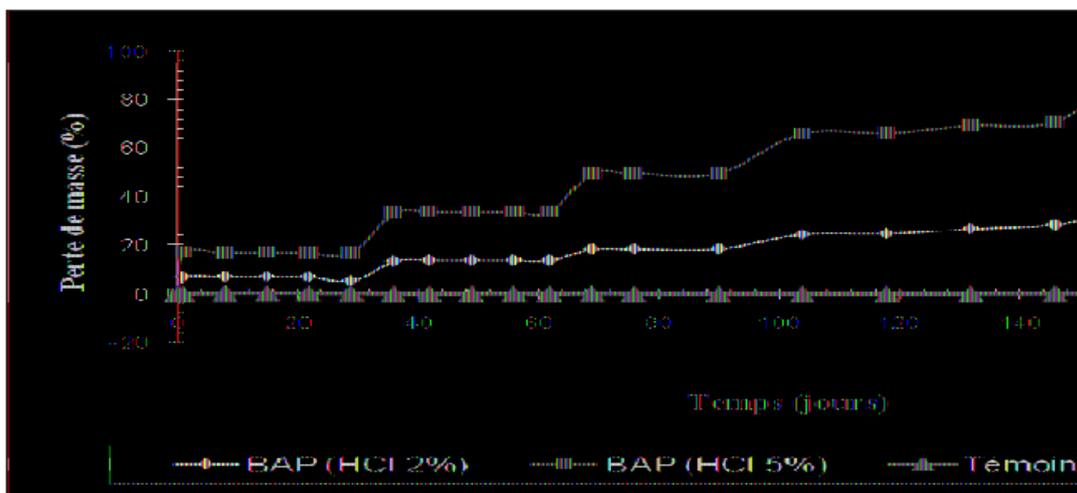


Figure.II.7: Variation de la perte en poids du BAP en fonction de la période d'immersion en 2% HCl, 5% HCl et de celle du témoin (eau distillée) [51].

On a deux éprouvettes de BAP immergées dans une solution de HCl à 5 % de concentration et deux éprouvettes immergées dans une solution de HCl à 2 % de concentration. Il est clair que plus la concentration est faible moins la solution est agressive.

Entre le premier jour et le 29<sup>ème</sup> jour on a pratiquement une stabilité totale de la perte de masse dans les deux concentrations, ceci s'explique par la forte solubilité de l'acide chlorhydrique dans l'eau qui réagit rapidement avec l'hydroxyde de calcium Ca (OH)<sub>2</sub> pour donner le chlorure de calcium CaCl<sub>2</sub> qui détériore l'éprouvette provoquant une perte de masse.



Donc si le milieu du BAP est fortement agressif avec une source de renouvellement de l'acide chlorhydrique, l'attaque serait très nuisible.

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) [52].

On remarque par ailleurs qu'il n'y a aucune perte de masse pour le BAP témoin.

## 5.2. L'effet de l'acide sulfurique

Le suivi de la perte en poids en fonction du temps des éprouvettes du BAP immergées dans la solution d'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de 5 % et 2% de concentration (figure 08).

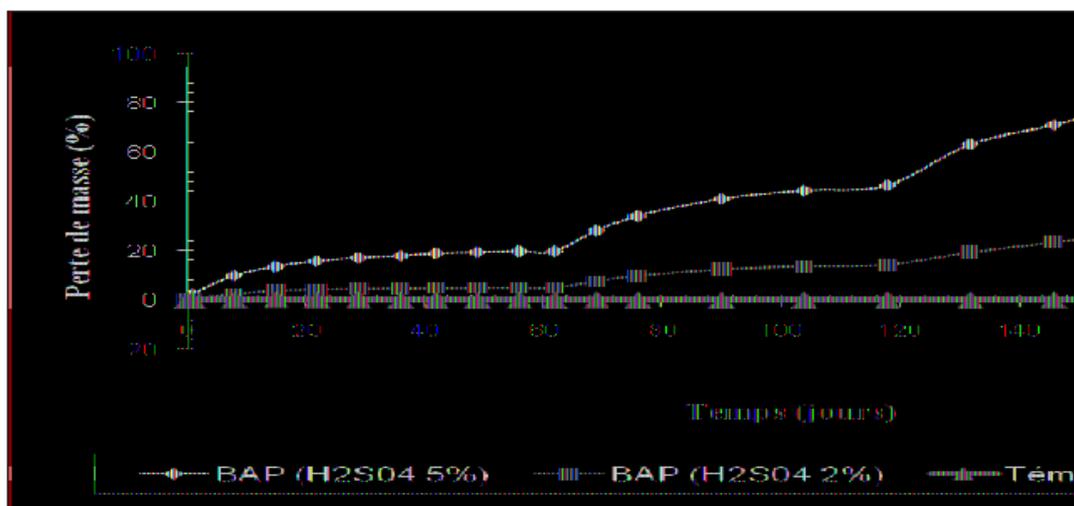


Figure.II.8: Variation de la perte en poids du BAP en fonction de la période d'immersion en 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et de celle du témoin (eau distillée) [51].

L'acide sulfurique est un acide inorganique fort mais de faible solubilité dans l'eau. Le rapport des deux pertes étant équivalent à 3.

Au-delà de 60 jours la cinétique est la même dans les jours qui suivent mais avec une amplitude plus élevée, ceci s'explique par le fait que l'acide sulfurique a une solubilité très faible dans l'eau (0.0043g /100ml de H<sub>2</sub>O) donc il est relativement inoffensif mais c'est les ions de sulfates qui jouent en l'occurrence le rôle nuisible.

L'acide sulfurique réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former le sulfate de calcium



La coloration de la surface des BAP en blanc après leurs immersions dans l'acide sulfurique explique la présence de gypse et d'ettringite.

### 5.3. L'effet de l'acide acétique

Le résultat du suivi de variation de la perte en poids en fonction du temps des éprouvettes du BAP immergées dans la solution d'acide acétique CH<sub>3</sub>COOH de 5 % et 2% de concentration est donné par la figure 09.

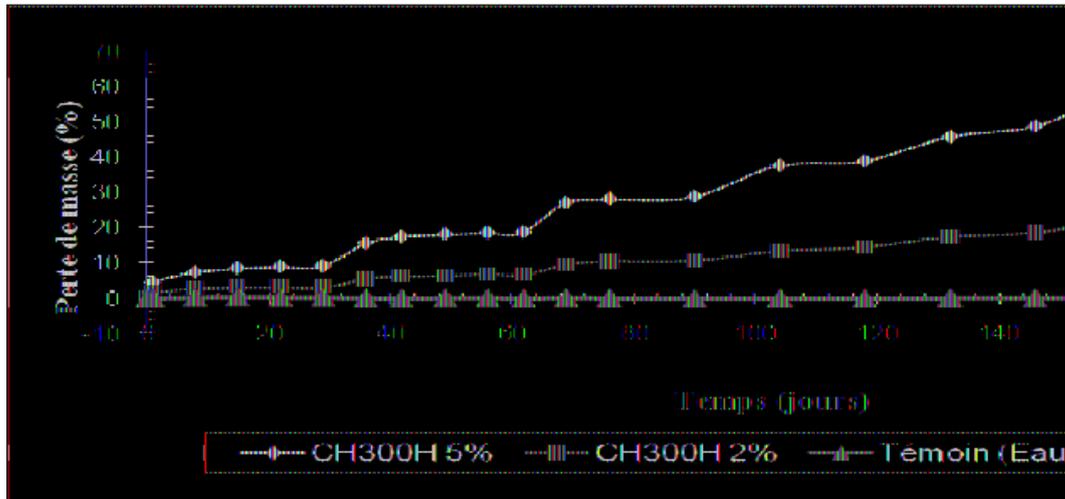
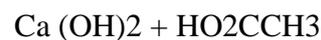


Figure.II.09: Variation de la perte en poids du BAP en fonction de période d'immersion en 5% CH<sub>3</sub>COOH, 2% CH<sub>3</sub>COOH et de celle du témoin (eau distillée) [51].

Après le changement des solutions, nous avons également remarqué une évolution des pertes de masse par paliers croissants.

Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que l'acide acétique est un acide organique qui forme avec l'hydroxyde de calcium de l'acétate de calcium qui est difficilement soluble dans l'eau et c'est pour cette raison que la dégradation continue toujours même si le taux diminue.



## II.6. l'attaque des sels :

### II.6.1. L'eau de mer :

Le béton exposé à l'eau de mer peut être soumis à différents action d'ordre physique et chimique : attaque chimiques, corrosion des armatures par les chlorures, attaque par les cycles gel/dégel, altération par le sel abrasion par le sable en suspension et par là l'glace . la présence et l'intensité de ces différentes formes d'attaques de l' emplacement du béton par rapport au niveau de la mer.

En plus des sels dissous, la présence de certains gaz près de la surface de l'eau de mer ou dans l'eau de mer joue également un rôles important dans les phénomènes chimiques et électrochimiques influençant la durabilité du béton par exemple, actuellement l'oxygènes O<sub>2</sub> dans l'air atmosphérique et dans l'eau de mer, et tant que l'air enfermé ou O<sub>2</sub> dissous, a un

rôles essentiel dans la corrosion de l'acier dans l'environnement marin indépendamment de si l'acier est exposé directement ou enfoncé dans le béton selon les condition locales, changement les concentrations de l'anhydride carbonique et du sulfure dissous d'hydrogéné peuvent être trouvées en eau de mer et peut causer l'abaissement du PH de sa valeur normale 8.2- 8.4 ou même moins.

## **II.7. Attaque par les ions chlorure**

### **II.7.1. Définition**

La corrosion des armatures générée par les ions chlorures est la principale cause de dégradation des structures en béton armé. Les chlorures agissent dans les mécanismes de corrosion en diminuant la résistivité de l'électrolyte et en permettant un amorçage plus rapide de la corrosion en dépassivant la couche superficielle. La corrosion qui en résulte sous forme de piqûres à la surface de l'acier est une corrosion localisée. Les chlorures agissent aux zones anodiques, de surface bien plus petite que celles des zones cathodiques, et la vitesse de corrosion sur les zones anodiques s'en trouve fortement augmentée. Une fois la corrosion amorcée, il est bien plus difficile d'y remédier que dans le cas de la carbonatation car le processus est autocatalytique. [53]

### **II.7.2. Source de l'attaque des ions chlorures :**

Les chlorures présents dans le béton peuvent provenir de deux sources différentes. Soit ils sont présents au moment du gâchage : utilisation d'eau contenant des chlorures ou agrégats contaminés. Soit ils proviennent de l'environnement (atmosphère marine, sels de déverglaçage, produits chimiques) et ont diffusés dans le béton.

Les chlorures existent sous deux formes dans le béton :

- ❖ Les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle
- ❖ Les chlorures piégés ou liés qui sont combinés à des hydrates du ciment et à des agrégats, ou absorbés physiquement sur les parois des pores. [53] On considère que seuls les chlorures libres peuvent diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de dépassivation et de corrosion des armatures.

### II.7.3. Les essais de pénétration des ions de chlorures

#### II.7.3.1. Protocole d'essai

Par rapport à la carbonatation, la diffusion des ions chlorures entraîne des dissolutions locales dans la couche passive des aciers. De faibles concentrations en chlorures peuvent modifier la structure de cette couche.

Le protocole d'essai consiste à déterminer le coefficient de migration des ions chlorures en régime non stationnaire sur échantillons durcis, à l'âge de 28 jours, sous forme de disques de 100 mm de diamètre et 50 mm d'épaisseur, obtenus par sciage à partir d'une éprouvette cylindrique de 100 mm de diamètre et de 220 mm de longueur.

Les éprouvettes ont été conservées dans l'eau pendant 28 jours à une température de  $(20 \pm 2)$  °C. Ces spécimens subissent une mise sous vide sous une pression de 1 à 5 kPa pendant quelques minutes. Les échantillons sont par la suite conservés dans une solution saturée en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pendant 24 heures, période à l'issue de laquelle, les mesures sont entamées.

Le coefficient de migration des ions chlorures en régime non stationnaire (non- steady- state migration coefficient)  $D_{nssm}$  est donné par la relation :

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left[ x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right] \quad [10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}] \quad \text{II.2}$$

Où :

U : est la différence de potentiel appliquée, en Volt ;

T : est la température moyenne de la solution, en °C ;

L : épaisseur du spécimen, en mm ;

$x_d$  : valeur moyenne de la profondeur de pénétration des ions, en mm ;

t : durée du test, en heure.

Cette méthode dite NT BUILD 492 appelée méthode CTH (Chalmers University of Technology, ou essai Tang Luping) (Tang, 2001) [54], est un compromis entre la représentativité de l'essai et la vitesse réelle de la diffusion.

Le mouvement de migration des ions est opéré sous champ électrique extérieur (25 V) pendant 24 heures. La diffusion des ions est effectuée sous gradient de concentration, ou plus précisément avec un potentiel chimique, d'une zone à haute concentration en ions chlorures vers une zone de faible concentration (béton).

Le potentiel électrique est exécuté axialement à travers la surface circulaire du spécimen.

Lequel potentiel, force les ions chlorures à migrer à l'intérieur de l'échantillon. Le schéma de principe est illustré par la figure 10.

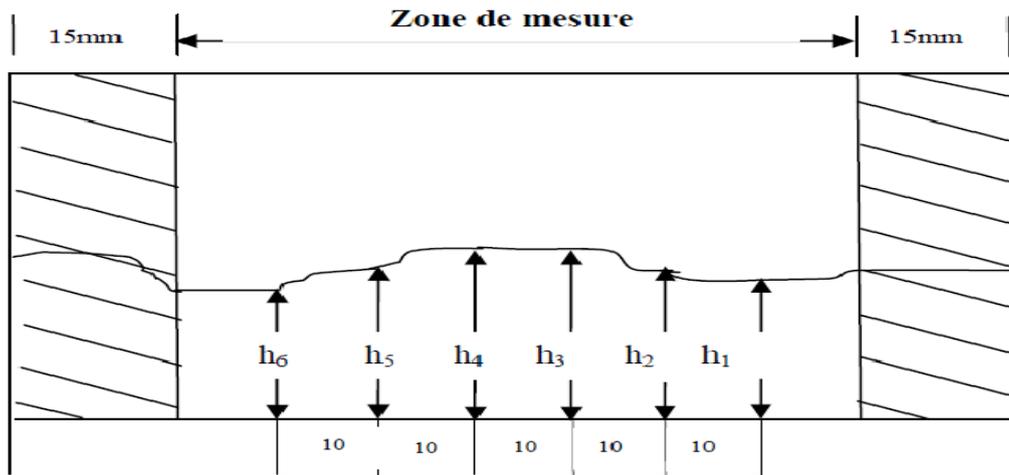


Figure.II.10: Illustration des profondeurs de pénétration des ions chlorures[54].

A l'issue de l'essai, le spécimen est fendu et on détermine la profondeur de pénétration des ions chlorures au moyen d'un indicateur calorimétrique à base de nitrate d'argent. A partir de cette profondeur, on détermine le coefficient de diffusion apparent.

Le profil des profondeurs de pénétration des ions chlorures est illustré par la figure 1 et l'aspect visuel peut être apprécié par la figure 11. La couche dégradée est caractérisée par une couleur grisâtre, quant aux zones affectées, elle varie selon la profondeur.



Figure.II.11: Eprouvettes affectées par les ions chlorures[54].

### II.7.3.2. Résultats obtenus et analyse

Le coefficient de diffusion des ions chlorures des BAP a fait l'objet d'un nombre peu élevé d'études. Cependant, les techniques utilisées et les conditions de conservation diffèrent d'une

étude à l'autre, ce qui se traduit le plus souvent par des différences de valeurs expérimentales. Ceci rend d'autant plus difficile l'exploitation des résultats à titre comparatif.

Des mesures faites sur BAP à base de fines calcaires sont inexistantes, hormis des essais effectués par Tang cité par Bentouati (2010) [55] sur des BAP à base de fines calcaires avec un rapport E/C de 0,4 où les coefficients de diffusion des ions chlorures trouvés étaient de 31 à  $56 \times 10^{-12}$  [m<sup>2</sup>/s] contre 15 à  $18 \times 10^{-12}$  [m<sup>2</sup>/s] pour un béton vibré avec un rapport E/C de 0,5.

Selon cet auteur, ces différences trouvent leur explication dans une éventuelle mauvaise dispersion des ajouts calcaires.

Les valeurs des coefficients de diffusion des ions chlorures [K<sub>i</sub>] du BAP d'étude sont résumées dans le tableau I.

**Tableau.II.1: Coefficients de diffusion des ions chlorures [K<sub>i</sub>] du BAPFC d'étude**

<b>h<sub>i</sub></b>	<b>h<sub>1</sub></b>	<b>h<sub>2</sub></b>	<b>h<sub>3</sub></b>	<b>h<sub>4</sub></b>	<b>h<sub>5</sub></b>	<b>h<sub>6</sub></b>
<b>k<sub>i</sub> x 10<sup>-12</sup> (m<sup>2</sup>/s)</b>	26.59	27.71	21.97	22.56	18.56	18.47

Selon Au denaert (2003) [56], le coefficient des BAP ne se différencie pas de celui des bétons vibrés Il trouve pour différents BAP, des valeurs de K<sub>i</sub> variant de 11,6 à  $16,6 \times 10^{-12}$  [m<sup>2</sup>/s] contre  $11,9 \times 10^{-12}$  [m<sup>2</sup>/s] pour un béton vibré de résistance équivalente.

Fornassier cité par Assié (2004) [57] trouve pour deux BAP des K<sub>i</sub> de 6,12 et  $9,91 \times 10^{-12}$  [m<sup>2</sup>/s], plus importants que celui d'un béton vibré qui est de  $5,47 \times 10^{-12}$  [m<sup>2</sup>/s]. trouve de son côté des BAP caractérisés par des K<sub>i</sub> de 12,7 et  $16,6 \times 10^{-12}$  [m<sup>2</sup>/s].

En somme, le coefficient de diffusion des ions chlorures du BAP d'étude d'une valeur de  $22 \times 10^{-12}$  [m<sup>2</sup>/s] à 28 jours est plus important que ceux de la littérature qui sont eux aussi, déterminés à l'âge de 28 jours.

Cette différence de valeurs ne peut s'expliquer que par le fait que les BAP de la littérature (objet d'étude vis-à-vis de la résistance aux ions chlorures) sont formulés avec des ajouts à forte pouzzolanité, alors que le BAP de la présente étude est composé avec des fines calcaires, donc de faible pouzzolanité.

En effet, les laitiers comme le stipule Rozière (2007) [58], peuvent fixer les chlorures et la réaction pouzzolanique entraîne le cloisonnement du réseau poreux. Selon le même auteur, les cendres volantes et fumée de silice semblent aussi limiter le coefficient de diffusion des ions

chlorures. Les minéraux modifient donc le coefficient de diffusion des ions chlorures et la valeur critique du seuil de dépassivation.

Ces ajouts, à l'instar des fines calcaires, réduisent le diamètre moyen du mode mésoporeux entraînant la gêne de la diffusion des ions chlorures. Cependant, la pouzzolanité des cendres volantes, fumées de silice, laitiers de hauts fourneaux et pouzzolane fait que cette réduction des rayons des pores est plus marquée qu'avec les fines calcaires.

Ces ajouts à forte pouzzolanité réduisent la basicité du mélange granuleux par consommation de la chaux libre obtenue par hydratation des silicates bicalcique et tricalcique comme le démontre Baron (1996) [59]. Cependant, les fines calcaires n'ont pas tout à fait cette efficacité du point de vue pouzzolanité, bien qu'ils permettent de densifier la matrice par production de carboaluminate de calcium.

Pour s'assurer de l'efficacité de la pouzzolane, par rapport aux fines calcaires, vis-à-vis de la résistance aux ions chlorures, nous avons soumis un échantillon de BAP formulé par substitution de la pouzzolane aux fines calcaires. Le résultat va effectivement dans le sens de l'amélioration de cette résistance. La figure 3 illustrant la pénétration des ions chlorures dans le BAP à base de pouzzolane (BAPZ) met en exergue la réduction des profondeurs concernées par les ions chlorures par rapport au BAP à base de fines calcaires.

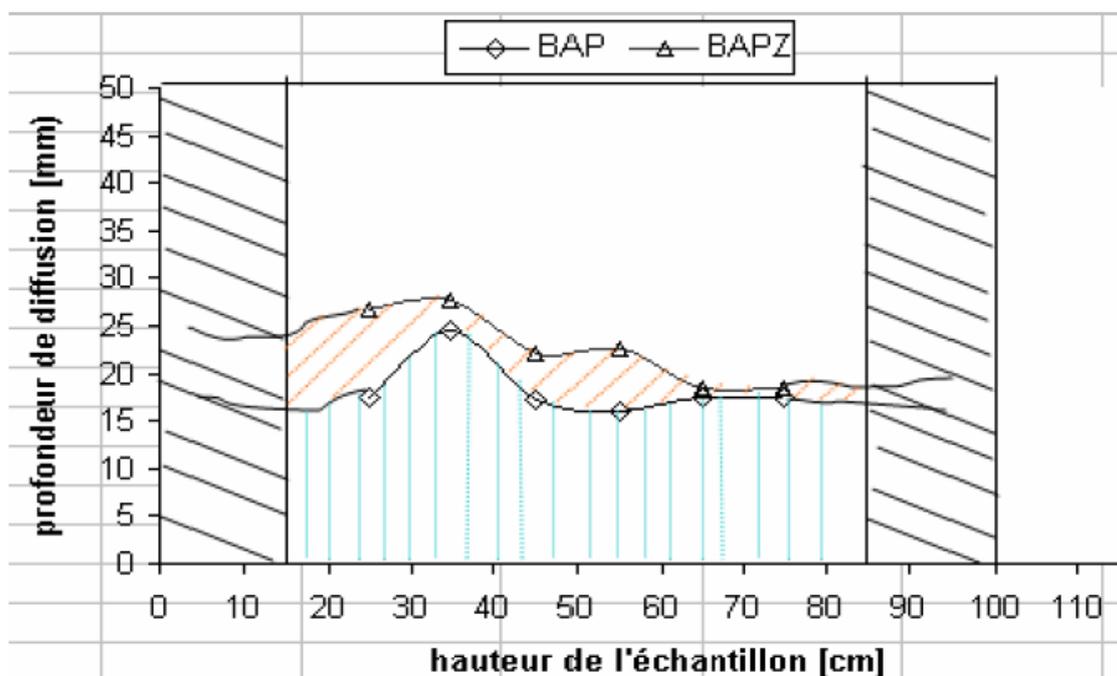


Figure.II.12: Illustration des profondeurs de pénétration des ions chlorures dans le BAPZ[59].

Le coefficient de diffusion moyen du BAPZ est de  $17,15 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s déterminé sans la prise en compte de la valeur  $24,53 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s qui présente un écart important par rapport aux autres valeurs, pour des raisons de mauvaises manipulations très probablement. Le tableau II donne les différentes valeurs des  $K_i$  du BAPZ.

Tableau.II.2: Coefficients de diffusion des ions chlorures [ $K_i$ ] du BAPZ d'étude

$h_i$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$
$k_i \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s})$	17.55	24.53	17.28	16.01	17.37	17.54

L'autre observation, est que contrairement au BAP à base de fines calcaires, le BAPZ présente des valeurs de coefficient de diffusion très proches les unes des autres.

Ceci laisse penser que la pouzzolane assure une meilleure homogénéité du mélange par rapport aux fines calcaires. La pouzzolane contribue certainement à affiner le réseau poreux en diminuant le rayon moyen correspondant au pic des mésopores de façon plus prononcée que les fines calcaires. L'analyse de la littérature montre que le caractère diffusif des ions chlorures est fortement subordonné au rapport E/C, la nature du ciment, l'adjonction de fines et à la résistance.

Par ailleurs, la teneur en C3A (10,85 %) du ciment semble aussi être un facteur déterminant dans le comportement du béton vis-à-vis de la résistance aux ions chlorures.

## II.8.Conclusion

La durabilité d'un béton n'est pas une de ses caractéristiques, mais plutôt sa réponse aux charges en service et aux conditions environnementales. Ainsi, la durabilité d'un béton dépend d'une multitude de caractéristiques du matériau, mais aussi de l'agressivité de son environnement.

***CHAPITRE III :***  
***MATÉRIAUX UTILISÉS ET ESSAIS***  
***RÉALISÉS***

### **III.1.introduction**

Dans le but de mettre en évidence le comportement des BAP à base sable de dune finement broyé en milieux agressifs, et dans le but de mettre en évidence l'influence de l'ajout de sable de dune finement broyé de la région El Mosrane (40 km au Nord de Djelfa) sur les propriétés thermique et durabilité du BAP. Nous avons effectué une série d'essais, chimiques, physiques, minéralogiques dans les laboratoires suivants :

- Laboratoire de l'université de Ziane Achour Djelfa.
- Laboratoire des LNHC Djelfa

Pour l'étude de la résistivité de ces BAP vis-à-vis de différents milieux agressifs, nous avons tenu à garder le même rapport eau/ciment pour toutes les compositions de BAP (Eau/Liant = 0.48).

Les BAP composés sont :

BAPSDB<sub>0%</sub> ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec ; 0% sable de dune finement broyé .

BAPSDB<sub>10%</sub> ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec ; 10% sable de dune finement broyé .

BAPSDB<sub>20%</sub> ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec ; 20% sable de dune finement broyé .

BAPSDB<sub>30%</sub> ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec ; 30% sable de dune finement broyé .

Le but de cette substitution est de modifier la composition minéralogique du liant élaboré à base du ciment Portugal et la variété de % utilisés nous donne la possibilité de comparer entre les différents composites, ce qui nous permettra d'évaluer l'effet du pourcentage de pouzzolane naturelle sur les caractéristiques de la durabilité et le comportement des BAP dans de différents milieux agressifs.

Les ciments ont subi des essais de caractérisations physiques et chimiques indispensables avant toute étude expérimentale. La plupart des essais de caractérisation des matériaux ont été réalisé conformément aux normes AFNOR.

### III.2. Caractéristiques des matériaux

Dans le cadre de cette étude, nous avons confectionné les BAP en se basant sur les matériaux locaux suivants :

#### III.2.1 Ciment

Nous avons utilisé un seul type de ciment Portland CPA-CEM I 42,5 provenant d'une unique livraison de la cimenterie LAFARGE à M'sila. Ainsi, la qualité de ce ciment constitue une constante au niveau des paramètres d'étude. Ses analyses chimiques et physiques communiquées par le producteur sont données respectivement par les tableaux

III-1 et III-2

**Tableau III.1: Propriétés physiques des ciments**

Caractéristique physique	Valeur
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1130
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	3100
Surface spécifique du ciment (cm <sup>2</sup> /g)	3917
Consistance normale (%)	27.48
Début de prise	2 h 20 mn
Fin de prise	3 h 23 mn

**Tableau III.2: Analyse chimique de ciment**

Composant	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl	L.O.I
Teneur [%]	21.36	4.98	3.63	65.86	2.06	0.93	0.08	0.77	0.02	2.48

#### III.2.2. Les Sable

Le sable utilisé dans cette étude c'est le sable de oued Mzy Laghouat, pour le BAP a base d'agrégats naturels. (Figure III-1)



**Figure III.1: Les sables utilisés**

### III.2.2.1. Caractéristiques physiques :

Tableau III.3: Caractéristiques physiques des sables

Caractéristiques physiques	SO
Densité apparente	1.44
Densité absolue	2.54
Degré d'absorption (%)	0.32
Module de finesse (%)	2.30
Équivalent de sable (%) Visuel	70.85
Équivalent de sable (%) piston	70.85

### III.2.2.2. Caractéristiques géométriques :

La figure III-2, montre la courbe granulométrique du sable.

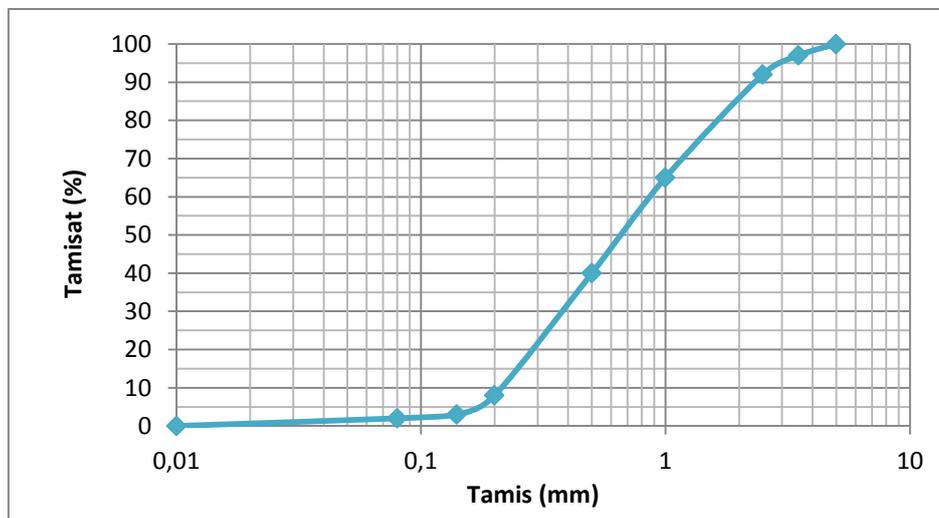


Figure III.2 : Analyse granulométrique des sables

### III.2.3. Graviers

Nous avons utilisé des graviers concassés d'origine calcaire et ayant deux classes granulaires différentes 3/8 et 8/15 provenant de la carrière de Zaccar à Djelfa.



gravier 8/15

gravier 3/8

Figure III.3: Les différents granulats utilisés

Afin d'obtenir une bonne adhérence entre la pâte du liant et les graviers, nous avons procédé à leur lavage et qui, une fois séchés, ont été conservés dans des sacs bien fermés.

L'analyse granulométrique et les propriétés physiques des graviers sont représentées respectivement dans la figure III-4 et le tableau III-4

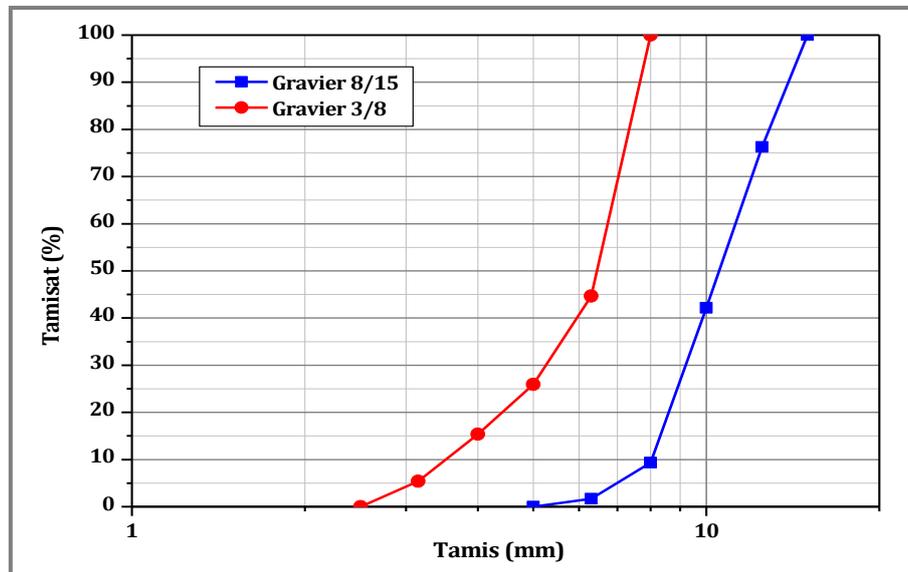


Figure .III.4:Analyse granulométrique des graviers

Tableau III.4: Propriétés physiques des gravillons

Caractéristique physique	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Densité apparente	1.43	1.50
Densité absolue	2.66	2.66
Degré d'absorption(%)	0.48	0.48
Coefficient los Angeles (%)	28.38	27.56

#### III.2.4.Sable de dune finement broyé

Il s'agit ici d'un broyage du sable de dune. Le broyage a été réalisé à sec à l'aide d'un broyeur à boulets de capacité importante. Il a été poussé jusqu'à ce qu'à l'obtention d'une poudre passant au tamis de mailles 80  $\mu\text{m}$ . et propriétés physiques suivantes ; densité absolue de 2,70 , densité apparente de 1,20 et surface spécifique de 3950  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

Nous avons utilisé un sable de dune finement broyé de la région El Mosrane (40 Km au Nord de Djelfa)



Figure .III.5: Le sable de dune avant et après broyage.

Figure .III.5: Analyse chimique du sable de dune finement broyé

<i>Eléments</i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>SO<sub>3</sub></i>	<i>K<sub>2</sub>O</i>	<i>Cl</i>	<i>PAF</i>
(%)	74.61	1.35	0.86	17.3	0.29	0.04	0.47	0.005	5.04

### II.2.5. Super plastifiant

Le superplastifiant utilisé est un "MEDAFLOW 30 (figure.II.1) " à base de polycarboxylates d'Ether conforme à la norme (EN 934-2. Il est un haut réducteur d'eau de la troisième génération.

Les caractéristiques de ce superplastifiant sont données par le tableau tableau III-6



Figure III.6: superplastifiant

Tableau.III.6: Caractéristiques du superplastifiant

Masse volumique	1100 kg/m <sup>3</sup>
pH	6- 6.5
Teneur en chlore	< 0,1 g/l
Pourcentage d'extrait sec en masse	30 %
Plage du dosage recommandée	0.5 à 2.0 %

### II.2.6. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation du béton est l'eau de robinet. Sa composition chimique est illustrée dans le tableau III-7:

**Tableau III.7: composition chimique de l'eau robinet**

Composantes chimiques	Mg/L	Meq /L
<b>Calcium (Ca)</b>	52.70	2.64
<b>Magnésium (Mg)</b>	32.00	2.63
<b>Sodium (Na)</b>	/	/
<b>Potassium (K)</b>	/	/
<b>Chlorure (Cl)</b>	71.00	2.00
<b>Sulfates (SO<sub>4</sub>)</b>	115.14	2.35
<b>Carbonates (CO<sub>3</sub>)</b>	Néant	Néant
<b>Bicarbonates (HCO<sub>3</sub>)</b>	170.35	2.80
<b>balance cations</b>	84.95	5.25
<b>Balances anions</b>	357.02	7.20
<b>Conductivité à 25°C</b>		0.72
<b>Résidu sec à 105°C</b>		491
<b>PH</b>		7.5

### III.3. Essai réalisés sur le béton

Durant notre étude, nous avons réalisé trois familles d'essais pour caractériser les bétons au laboratoire ;

- Essais de caractérisation des bétons à l'état frais.
- Essais de la résistance à la compression des bétons
- Essais de durabilité

#### III.3.1. Préparation des BAP

Tous les mélange ont été gâchés, dans un malaxeur de béton à axe verticale d'une capacité de 30 litre (figure III.1). l'opération du malaxage ne se fait pas les étapes suivent :

- On place les agrégats (gros et fins+ ciment) dans le malaxeur et on malaxe pendant 30 seconds.
- On ajoute 2/3 de la quantité d'eau, avec malaxeur en marche, pendant 60 seconds
- On ajoute l'eau restante avec le superplastifiant pendant 60 seconds
- On continue le malaxage pendant cinq minutes de façon à homogénéiser le béton

- On arrête le malaxage pendant deux minutes de repos.
- Malaxage pendant 30 seconds
- A la fin un léger malaxage est fait manuellement.

Les différentes éprouvettes de bétons préparées, sont conservées en salle humide (20°C, 95% HR) pendant 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes de béton obtenues sont conservées dans l'eau du robinet pendant 28 jours.



Figure III.7: Malaxeur de béton à axe vertical (université de Djelfa )

### III.3.2. Essais réalisés à l'état frais

Comme rapporté au chapitre 1, il existe dans la littérature plusieurs tests caractérisant les propriétés rhéologiques des BAP. Cependant, dans notre étude, nous nous basons seulement sur les essais résumés au tableau III-8. Le programme de ces essais est représenté aux figure III-8, III-9 et III-10

Tableau III.8 : Programme des essais réalisés à l'état frais

<i>Type d'essais</i>	<i>Paramètre</i>	<i>Valeur mesurée</i>	<i>indice</i>	<i>cible</i>
Étalement de cône d'abrams		diamètre de l'étalement	SF	$\geq 660$ mm
boite en L		taux de remplissage	PL	$\geq 0,8$
stabilité au tamis		indice de ségrégation	SR	$\leq 15\%$

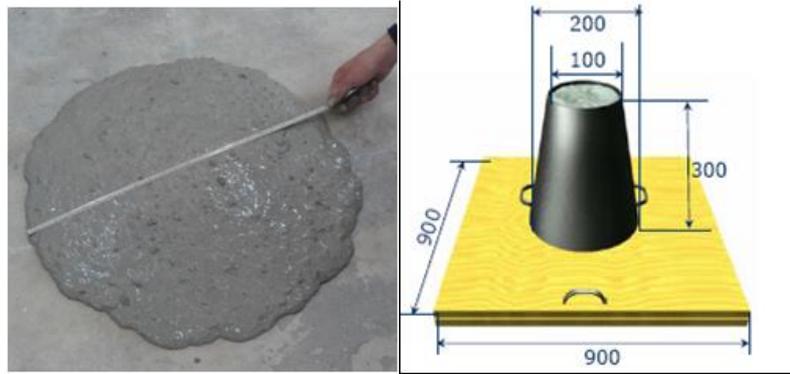


Figure III.8: Essai de l'étalement au cône d'Abrams

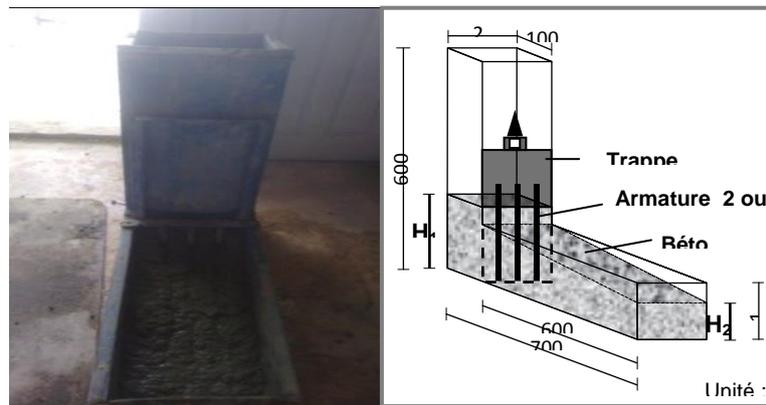


Figure III.9: Essai de la capacité de remplissage à la boîte en L

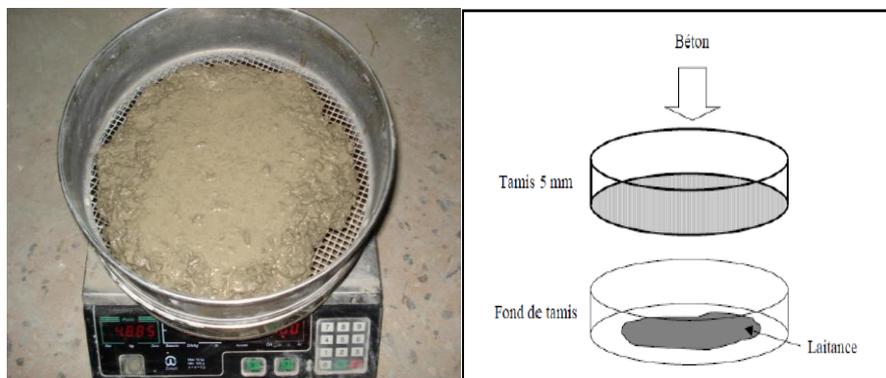


Figure III.10: Essai de la résistance à la ségrégation au tamis

### III.3.3.Essais réalisés à l'état durci

#### III.3.3.1.Essai de résistance à la compression

Il est réalisé, conformément à la norme EN 12390-3, sur des éprouvettes cubiques de (10x10x10 cm<sup>3</sup>) mûries à l'eau. Les résultats de la résistance à la compression obtenus à 7 et 28 jours représentent la moyenne de trois échantillons. La machine utilisée pour l'écrasement uniaxial des cylindres est une presse hydraulique dont la capacité maximale est de 1500 kN en compression figure III-11.



**Figure III.11: la presse hydraulique de compression pour béton  
(Laboratoire des LNHC Djelfa)**

### **III.3.3.2. Essais de durabilité**

#### **III.5.1. Variation de la masse**

La variation de la masse des éprouvettes cubiques des bétons de  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  conservées dans les deux milieux distinctes, à savoir l'eau douce et la solution de 5 % de chlore de sodium et la solution de 5%  $\text{MgSO}_4$ , a été effectué selon la norme ASTM C267 [51] même suivi comme les démarches des éprouvettes des bétons conservées a des milieux précédant.

### **III.3.3. Conclusion**

Bien que les caractéristiques relatives aux matériaux utilisés ne soient pas tous disponibles, celles en notre disposition sont suffisantes pour réaliser notre étude expérimentale. De plus, il semble que la qualité de ces matériaux se classe parmi les meilleures dans le marché Algérien. D'autre part, les essais réalisés au cours de notre recherche permettent d'évaluer l'essentiel des propriétés des bétons confectionnés.

***CHAPITRE IV :***  
***PRESENTATION ET DISCUSSION***  
***DES RÉSULTATS***

## IV.1.Introduction

Dans ce chapitre nous avons essayé de valoriser les résultats des différents essais effectués sur les bétons autoplaçant confectionnées selon les différents teneurs sable de dune broyé.

Ces résultats portent sur les résistances mécaniques à la compression, et la durabilité (variation de masse).

Avant de présenter les résultats d'essais sur les bétons autoplaçant, on présentera les résultats d'essais de boîte en L, l'affaissement de cône d'Abrahams et stabilité de tamis.

## IV.2.Formulation des BAP

La formulation que nous avons adoptée est basée sur la formulation proposée par le japonais OKAMURA et appelée la méthode générale, avec quelques modifications concernant la sélection de la quantité de sable dans le mortier, le rapport eau/liant ainsi que le rapport superplastifiant/liant. Ces derniers ont été évalués expérimentalement de manière à avoir des valeurs de l'étalement au cône d'Abrams et du temps d'écoulement au V-Funnel acceptables. Pour la sélection des quantités d'air et de graviers, la méthode OKAMURA a été maintenue.

**Tableau.IV.1- Composition du BAP dans 1m<sup>3</sup>**

Composants	BAP <sub>SD 0%</sub>	BAP <sub>SD 10%</sub>	BAP <sub>SD 20%</sub>	BAP <sub>SD 30%</sub>
Ciment (Kg)	400	360	320	280
Eau (L)	192	172.8	153.6	134.4
Sable de dune broyé ( Kg)	0	40	80	120
Sable d'oued(Kg)	886	886	886	886
Gravier 3/8(Kg)	277	277	277	277
Gravier 8/15 (Kg)	553	553	553	553
Superpastifion (SP)	5.55	5.53	5.50	5.48
Rapport E/C	0.48	0.48	0.48	0.48

## IV.3.Résultats des essai des BAP

### IV.3.1.Essai d'étalement

Comme nous avons vu au première chapitre. Le critère d'ouvrabilité pour BAP c'est le critère d'écoulement non confiné par l'essai d'étalement au cône d'Abrams, les résultats obtenus de cet essai dans le figure IV-1.

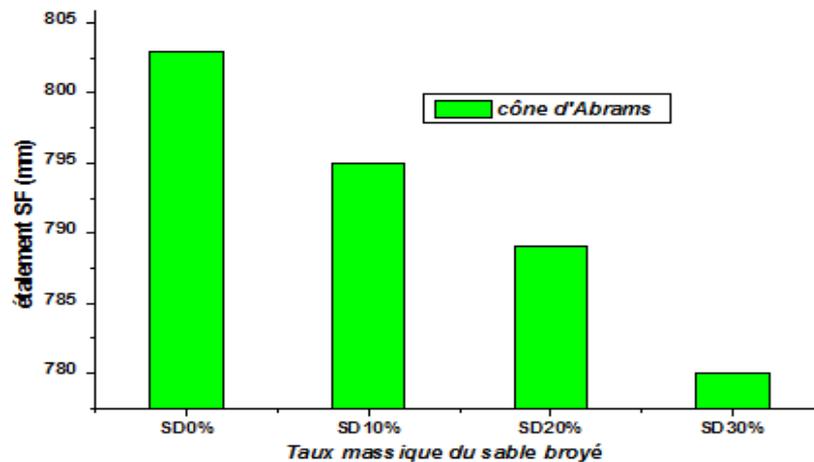


Figure.VI .1- Résultats de l'essai d'étalement des BAP

#### IV.3.1.Essai de la boîte en L

Dans cet essai nous avons estimé le comportement des béton BAP ordinaire et le BAP naturelles à l'écoulement dans un milieu confiné qui traduit par l'essai de la boîte en L. seulement les composition qui ont un étalement comprise entre 50cm et 80 cm sans ségrégation et sans ressuage, sont testées.

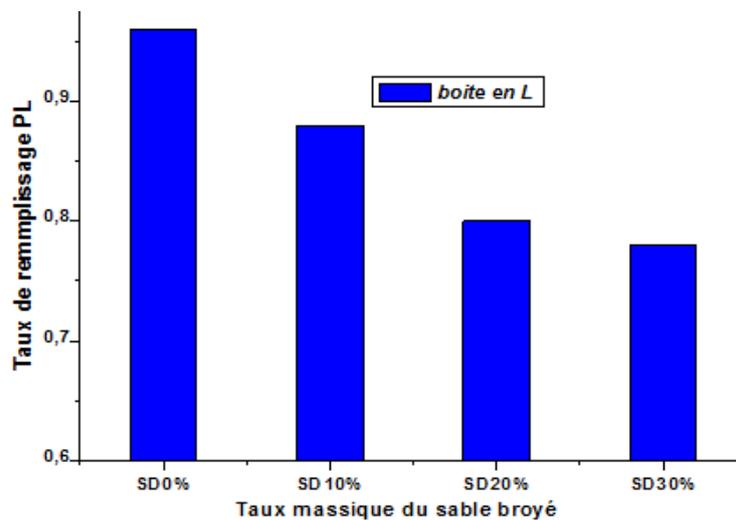


Figure.VI .2- Résultats de l'essai de la boîte en L des BAP

#### IV.3.1.Essai de la stabilité au tamis

Ces essai est réalisé afin d'évaluer la capacité de BAP à rester homogène après la mise en place jusqu'au début prise.

Le Figure(IV-3) montrées résultats de l'essai de stabilité il montre aussi la variation de la stabilité en fonction du rapport E/L on constate que l'instabilité du béton augmente avec l'augmentation du rapport E/L.

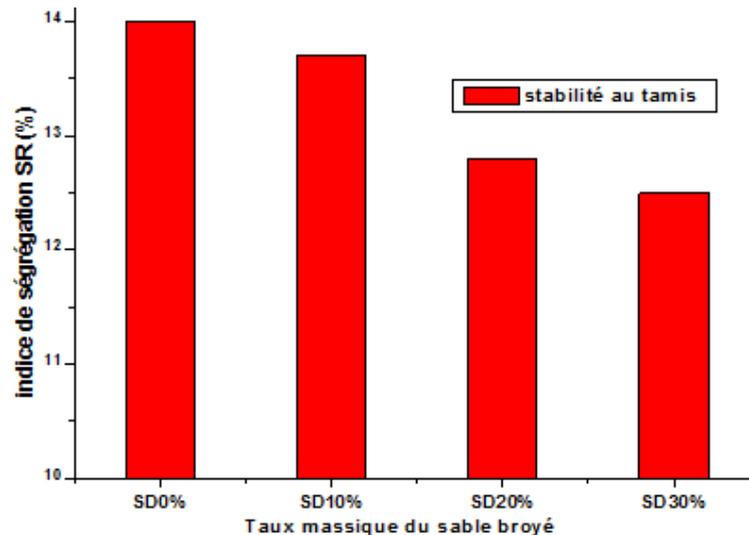


Figure.VI .3- Résultats de l'essai de la stabilité au tamis des BAP

#### IV.4.Essais mécaniques

La résistance mécanique est affectée par plusieurs facteurs, qu'on peut citer le rapport E/C, le rapport S/G, la classe du ciment, les propriétés des granulats (état de surface, texture ...) et sa dimension maximale D. La résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton autoplaçant puisqu'elle est liée directement de la structure de la pâte de ciment hydratée aux autres caractéristiques des autres constituants tel que les granulats (poreux ou non). De plus, la résistance du BAP est presque l'élément clé lors de la conception des structures en béton autoplaçant et lors de l'établissement des spécifications de conformités.

##### IV.4.1.Résistance à la compression

Il est à signaler que les éprouvettes de béton autoplaçant sont conservées pendant une durée de 28 jours dans une eau saturée en chaux. Ensuite ces dernières sont séparées en trois séries, dont la première série est conservée dans l'eau (témoin) et la deuxième série dans une solution de 5% de chlore de sodium (NaCl) et la troisième série dans une solution de 5% MgSO<sub>4</sub>.

##### IV.4.1.1.Résistances à la compression des BAP conservés dans l'eau saturée en chaux

Les résultats de la variation de la résistance en compression des BAP d'étude en fonction du temps sont représentés sur la figure (IV.4) présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction à l'âge des BAP dans l'eau saturée en chaux.

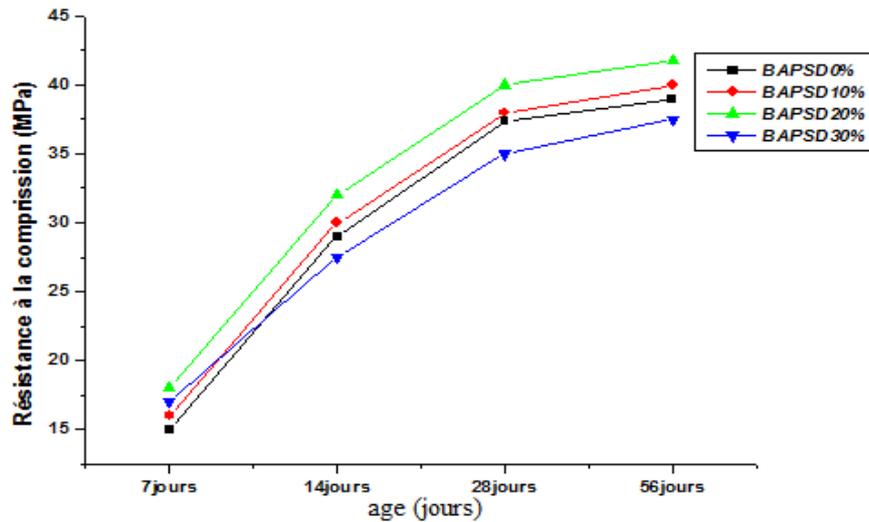


Figure.VI .4- Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des bétons dans l'eau saturée en chaux.

On remarque que la résistance à la compression de tous les béton autoplaçant augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute. Ainsi, on remarque que la vitesse d'évolution de la résistance est proportionnelle au taux de sable de dune broyé substituée au ciment.

Les résistances augmentent rapidement au jeune âge jusqu'à l'âge de 28 jours (84% pour B0 et B10 et 85 % pour B20 et B30 par rapport à leurs résistances à 56 jours), après quoi ces résistances augmentent légèrement à long terme et ceux pour tous les BAP.

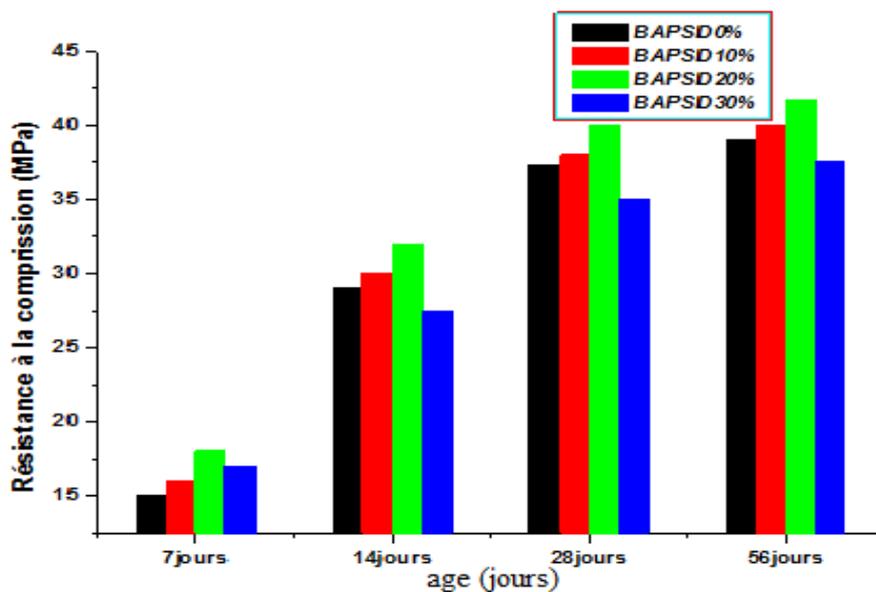


Figure.VI .5- Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des bétons dans l'eau saturée en chaux.

Dans la figure III.12 on remarque que la résistance à la compression augmente avec le temps. Ceci est attribué à la réaction sable de dune broyé, qui consomme de la Portlandite (CH) produite suite à l'hydratation du ciment.

Cette réaction produit des gels C-S-H supplémentaires qui contribuent à l'amélioration de la résistance des BAP.

#### IV.4.1.2. Résistances à la compression des BAP conservés dans une solution de 5% NaCl

Les résultats donnés par La figure III.6 montrent l'effet de l'ajout de sable de dune broyé sur la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% NaCl.

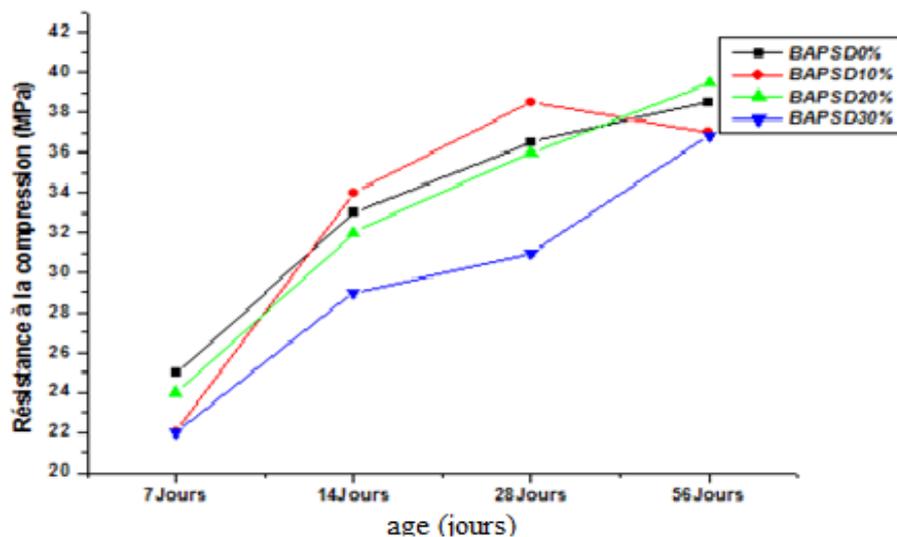


Figure.VI .6-Variation de la résistance à la compression des bétons dans la solution de 5% NaCl

On remarque que la résistance à la compression évolue positivement jusqu'à 56 jours pour tous les bétons. Au-delà de ces âges on remarque une chute de résistance à la compression.

A partir de ces résultats, on ne constate que l'effet bénéfique de sable de dune broyé sur la résistivité à l'agressivité des bétons immergés dans une solution de 5 % de chlore de sodium.

#### IV.4.1.3. Résistances à la compression des BAP conservés dans une solution de 5% MgSO<sub>4</sub>.

L'analyse des résultats illustrés sur la figure III.15 montre que la résistance à la compression de tous les bétons conservés dans la solution de 5% MgSO<sub>4</sub> se développe positivement jusqu'à 28 jours d'immersion.

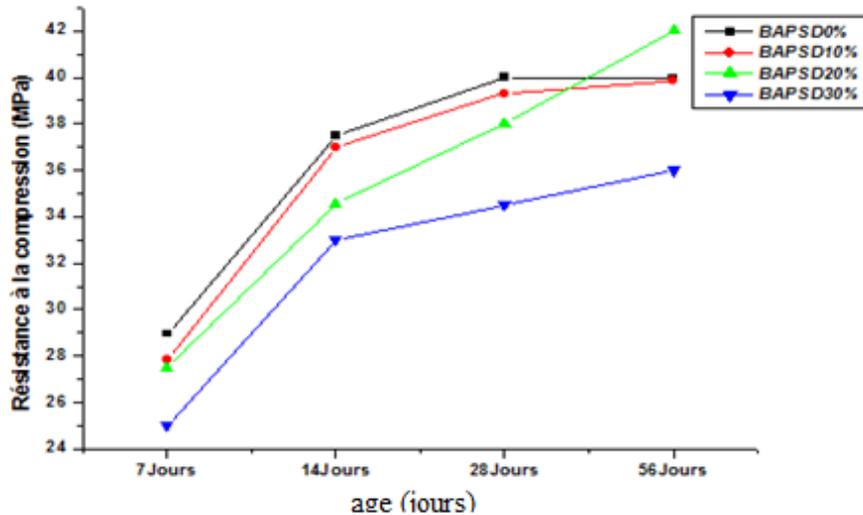


Figure.VI .7- Variation de la résistance à la compression des bétons Dans la solution de 5% $MgSO_4$

Ensuite leurs résistances chute progressivement jusqu'à atteindre des valeurs à 56 jours qui restent nettement supérieures à celles du béton témoin. Cependant pour le béton à 30 % de sable de dune broyé on remarque que la résistance chutée rapidement entre 56 jours

On conclure les variations de la résistance à la compression des bétons dans les milieux agressifs après 56jours dans la figure III.8

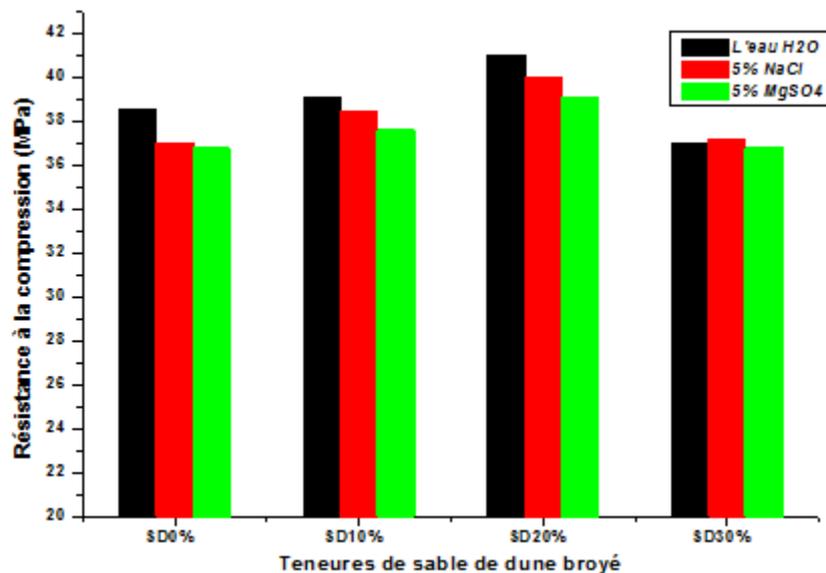


Figure.VI .8- Variation de la résistance à la compression des bétons à 56 jours.

## IV.5-Essais de durabilité

### IV.5.1-Variation de la masse

La variation de la masse des éprouvettes cubiques des bétons de  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  conservées dans les deux milieux distinctes, à savoir l'eau douce et la solution de 5 % de chlore de sodium et la solution de 5%  $\text{MgSO}_4$ , a été effectué selon la norme ASTM C267 [51] même suivi comme les démarches des éprouvettes des bétons conservées a des milieux précédant.

#### IV.5.1.1-Variation de la masse des bétons conservés dans l'eau $\text{H}_2\text{O}$

La figure III. 9 montre la variation de la masse des éprouvettes des bétons confectionnées à base de différents teneurs de sable de dune broyé en fonction du temps d'immersion dans l'eau

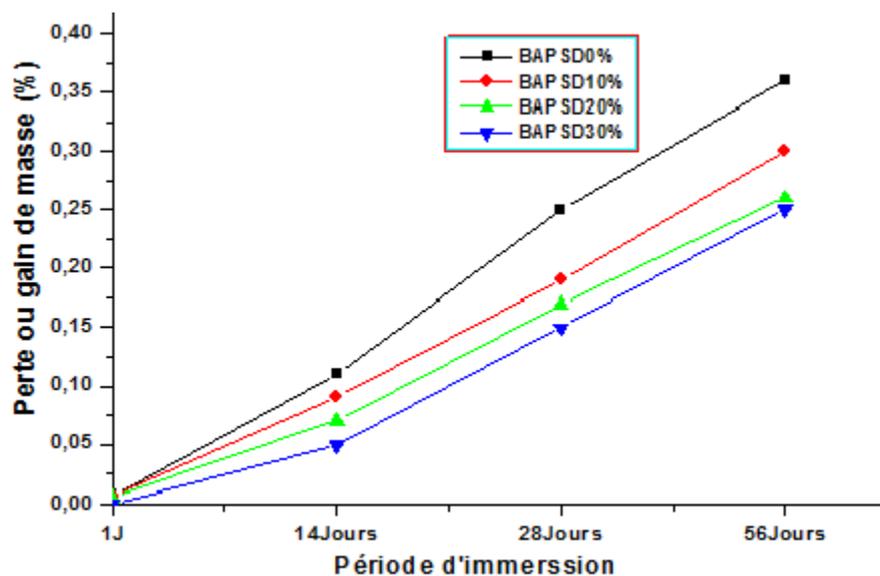


Figure.VI .9- Variation de la masse en fonction du période d'immersion dans L'eau  $\text{H}_2\text{O}$

On constate une augmentation permanente de la masse concernant les bétons immergés dans l'eau . Après cette période et jusqu'à 56 jours, on remarque que l'augmentation de la masse de bétons autoplaçant témoin par rapport à des bétons autoplaçant avec sable de dune broyé qui devient inférieure à celle du béton témoin.

Les BAP présentent des gains moins importants que celui du béton témoin. Cela est peut être attribué à la réduction de la quantité de la portlandite.

#### IV.5.1.2-Variation de la masse des bétons conservés dans la solution 5%NaCl

la variation de la masse en fonction du temps des bétons immergés respectivement dans 5%NaCl( figure III.10)

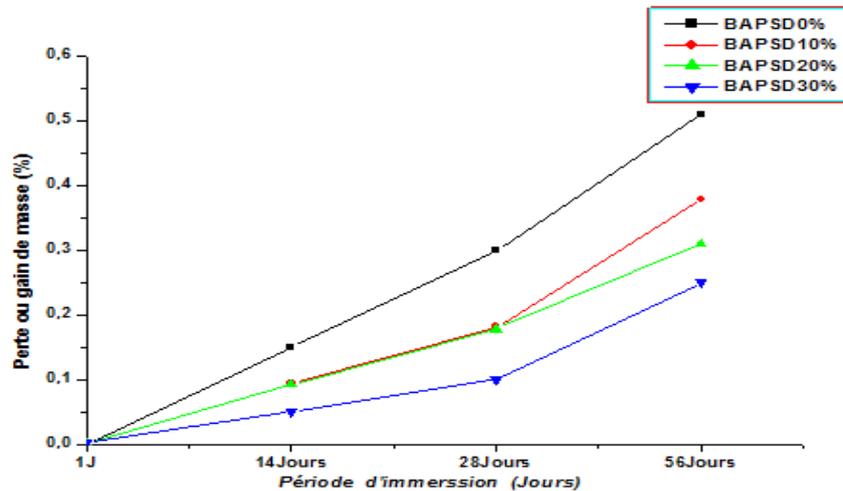


Figure.VI .10- Variation de la masse en fonction du période d'immersion dans 5% NaCl (eau de sebkha)

On remarque une augmentation régulière des masses des bétons autoplaçant à l'âge de 56j.

à 28 jours d'immersion des éprouvettes dans la solution de 5% NaCl l'ajout de le sable de dune broyé n'a pas d'influence significative sur la variation des masses des éprouvettes, à partir de 28 jours jusqu'à 56 jours l'augmentation de la masse du béton autoplaçant témoin par rapport à des bétons autoplaçant des sables de dunes broyés devient inférieure à celle des BAP de contrôle.

#### IV.5.1.3-Variation de la masse des bétons conservés dans la solution 5%MgSO<sub>4</sub>

On remarque une évolution positive de la variation de la masse de tous les BAP en fonction de la durée d'immersion dans la solution 5%MgSO<sub>4</sub> (figure III.10)

Cette évolution positive est attribuée à la continuité de la formation des hydrates dans les différents bétons autoplaçants, et 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 magnésium.

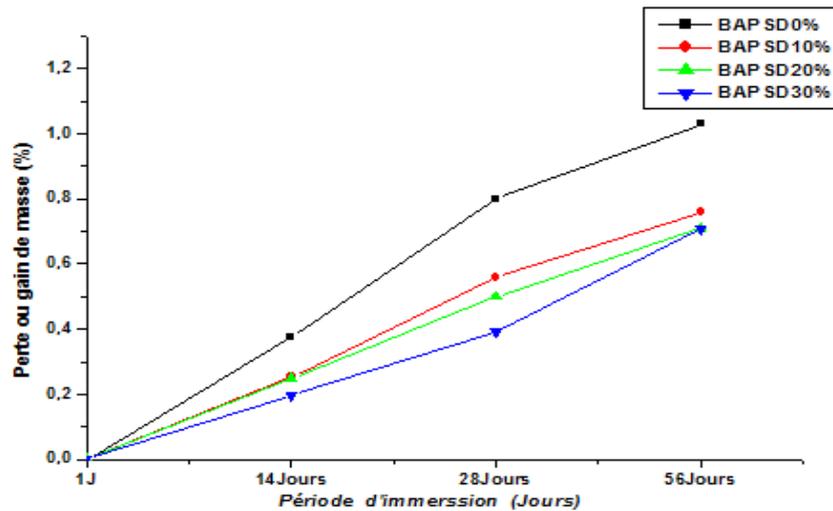


Figure.VI .11-Variation de la masse en fonction du période d'immersion dans 5% MgSO<sub>4</sub>

On conclure l'augmentation de masse après 56 jours d'immersion des différents bétons autoplacent dans les trois milieux de conservations : la solution de (5%NaCl), la solution de (5 % MgSO<sub>4</sub>) et l'eau H<sub>2</sub>O.( figure III.11)

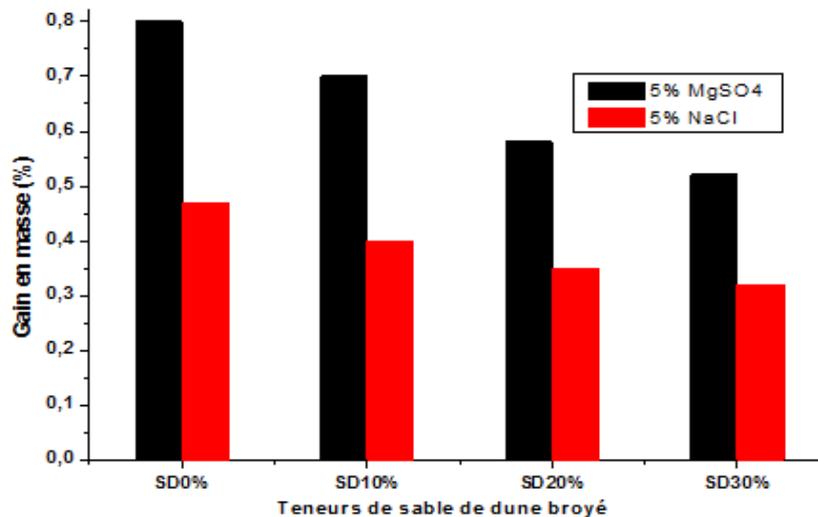


Figure.VI .12- Le gain en masse échantillons du BAP à 56 jours

On observe pour l'ensemble des éprouvettes du béton autoplacent que le gain en masse dans le cas de l'immersion en eau est inférieur au gain mesuré sur les éprouvettes immergées en solutions sulfatique. En comparons les résultats de l'augmentation de masse des échantillons immergés en solution de (5 % NaCl) et la solution du (5 %MgSO<sub>4</sub>), nous constatons que l'augmentation en masse de la solution est plus élevée par rapport à celle de (5 % NaCl).Les mécanismes de l'attaque par les sulfates différent d'un sulfate à l'autre est la même chose par rapport à l'éprouvette des bétons autoplacents.

#### **IV.6.Conclusion**

Notre travail vise à contribuer afin de mieux connaître les effets de la substitution d'une partie du ciment par le sable de dune broyé sur l'évolution des caractéristiques physico-mécaniques et sur la durabilité des bétons autoplaçants dans un environnement agressif. Le travail réalisé, nous a permis la compréhension des phénomènes de l'attaque des matériaux cimentaires par la solution de 5% de chlore de sodium (NaCl) et la solution de 5% MgSO<sub>4</sub>. Nous constatons donc que

- ✚ l'introduction de l'addition de sable de dune broyé dans le ciment (en substitution) joue un rôle bénéfique en améliorant les résistances mécaniques à moyen et long terme.
- ✚ l'introduction de l'ajout sable de dune finement broyé, conduit à une densification de la matrice cimentaire. La mouture des particules de sable de dune broyé, permet à ses grains de s'intercaler dans les pores créés par l'hydratation, entre les granulats et les produits d'hydratation. Ce qui multiplie les liaisons microscopiques, développe l'adhérence granulat-matrice et par conséquent augmente la résistivité du béton autoplaçant à base du sable de dune broyé vis-à-vis des attaques des milieux agressifs.

***CONCLUSION***  
***GÉNÉRAL***

# Conclusion Général

Nous avons procédé au cours de cette étude à la détermination expérimentale des effets des additions minérales sur les propriétés mécaniques et durabilité du BAP.

Notre travail vise à contribuer afin de mieux connaître les effets de la substitution d'une partie du ciment Portland par le sable de dune broyé sur l'évolution des caractéristiques mécanique et de durabilités des BAP dans un environnement sulfatique et chlorure.

L'identification expérimentale des différents paramètres et leurs effets sur les propriétés mécaniques du BAP s'avère nécessaire à imposer pour identifier notre champ d'investigation autour des données suivantes:

- ✚ Les mécanismes de dégradation des matrices cimentaires dans les différents milieux de Conservation.
- ✚ L'influence de la nature de type de ciment
- ✚ L'influence de l'âge.

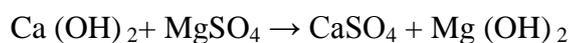
Pour les propriétés mécaniques on remarque que :

- ❖ Les résistances augmentent rapidement au jeune âge jusqu'à l'âge de 28 jours (92% pour B0 et B10 et 93 % pour B20 et B30 par rapport à leurs résistances à 56 jours), après quoi ces résistances augmentent légèrement à long terme et ceux pour tous les bétons.
- ❖ On remarque que la résistance à la compression de tous les bétons augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute. Ainsi, on remarque que la vitesse d'évolution de la résistance est proportionnelle au taux de la sable de dune broyé substituée au ciment.

Pour la durabilité on constate que la variation du masse du milieu sulfatique on peut expliquer comme :

Le sulfate de magnésium est très agressif par rapport au chlore de sodium, ceci est dû à sa double action qui se traduit par

-Formation de la brucite :



$\text{Mg (OH)}_2$  : la brucite est caractérisée par une faible solubilité et un pH faible.

L'augmentation de la masse dans le cas de l'attaque du  $\text{MgSO}_4$  par rapport à l'attaque du NaCl, peut être expliquée par la formation de la brucite ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), qui est un produit très peu soluble. Ce produit n'est pas présent dans le cas des attaques par le sulfate de sodium,

### **Perspectives et recommandations :**

Les résultats trouvés montrent qu'il demeure nécessaire de poursuivre l'étude et la caractérisation des BAP à base de ciments avec ajout de le sable de dune broyé afin de mieux connaître l'influence de cet ajout sur les performances de durabilité des bétons dans un environnement chimiquement agressif.

***RÉFERENC***  
***BIBLIOGRAPHIQUE***

# Référence bibliographique

- [1] NF EN 12-620.
- [2] Béton – Définition – Encyclopédie scientifique en ligne : [www ,techno-science.net](http://www.techno-science.net), 2008.
- [3] Khayat K., «Les bétons autonivelants, Les bétons, bases et données pour leur formulation », p 479-483, Eyrolles, 1997.
- [4] Haddad O., 1er congrès international sur la technologie et la durabilité du béton à Alger, les 24, 25 et 26 Mai 2004.
- [5] Abib Z., Thèse de Magistère en Génie Civil, « Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants », Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, le 06 Juillet 2006.
- [6] Sedran T., Thèse de Doctorat en Structure et Matériaux, « Rhéologie et rhéométrie des bétons -Application aux bétons autonivelants », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Nantes, le 08 Mars 1999.
- [7] Association Française de Génie Civil «AFGC», Bétons autoplaçants – Recommandations provisoires, Juillet 2002, 63 pages.
- [8] Ecoles Française du Béton (EFB), mis en ligne par le lycée du Bâtiment Saint Lambert, Internet, 2004.
- [9] Seddik A. Thèse de magistère en Génie Civil, « Le béton autoplaçant sous conditions locales », Département de Génie Civil, Université de Sétif (Algérie), Février 2008.
- [10] Béton autoplaçant – wikipédia en ligne, [www.wikipédia.org](http://www.wikipédia.org), 2008.
- [11] Net, [www.termsscience.fr](http://www.termsscience.fr), 2008.
- [12] Sheinn, A.M.M, “ Rheological modelling of self-compacting concrete ”, Doctoral Thesis of National University of Singapore, Singapore, 2007.
- [13] Ozawa, K., Maekawa, K., and Okamura, H, “ Development of high performance concrete ”, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 1992; 41(3): 381-439.
- [14] Noumowe, A., Carre, H., Daoud, A., and Toutanji, H, “ High-strength self-compacting concrete exposed to fire test ”, Journal of Materials in Civil Engineering 2006, 18(6): 754-8.
- [15] 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.
- [16] BS EN 206 – 1, “Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity ”, 2000.

- [17] Ferraris, C.F, “ Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete ”, State of the Art Report, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology 1999; 104(5): 461-78.
- [18] Wallevik, O.H, “ Rheology - A scientific approach to develop self-compacting concrete ”, Proceedings of the Third International Symposium of SCC, Reykjavik, Island, 17-20 August, 2003; 23-34.
- [19] Beaupre, D, “ Rheology of High Performance Shotcrete”, Ph.D. Thesis, University of British Columbia, 1994.
- [20] The Concrete Society, BRE, “ Technical report No.62 self-compacting concrete: a review ”. Day RTU, Holton IX, editors, Camberley, UK, Concrete Society, Surrey GU17 9AB, UK, 2005.
- [21] Hackley, V.A., and Ferraris, C.F, “ The use of nomenclature in dispersion science and technology ”, NIST Recommended Practice Guide, SP 960-3, 2001.
- [22] Sedran, T, “ Rhéologie et rheometre des bétons. Applications aux bétons autonivelants ”, These de doctorat de l'Ecole Nationale Ponts et Chaussées, France, 1999.
- [23] De Larrard, F., and Ferraris, C. F, “ Rhéologie du beton frais remanie. III: l'essai au cône d'Abram modifié ”, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Mai-Juin 1998, N° 215: 53-60.
- [24] mouli.m, “ étude des propriété physique et mécanique de la pouzzolane en vue de la fabrication des légers et des béton à haute performance ”, thèse doctorat à l'université des sciences et de technologie Med boudiaf d'Oran.
- [25] Felekoglu, B., Turkel, S., and Baradan, B, “ Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete ”, Building Environment 2007; 42(4): 1795–802.
- [26] BOUKENDAKDJI O., 2010« Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires », Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb, Algérie.
- [27] Leeman, A., Lura, P., and Loser, R, “ Shrinkage and creep of SCC – the influence of paste volume and binder composition ”, Construction Building Materials 2011; 25: 2283–9.
- [28] Okamura, H, “ Ferguson lecture for 1996: self-compacting high-performance concrete ”, Concrete international 1997; 19(7): 50-54.
- [29] Yurugi, M., Sakata, N., Iwai, M., and Sakai, G, “ Mix proportion for highly workable concrete ”, Conference Concrete 2000, Dundee, UK, 7-9 sept, 1993, 579-89.
- [30] Okamura, H., Ozawa, K, “ Self-compactable high-performance concrete in Japan ”, in Japan SP-169, ACI 1994; 31–44.
- [31] Association Française de Génie Civil, “ Recommandations pour l'emploi des Bétons autoplaçants ”, 2008.

- [32] Newman, J., and Choo, B.S, “Advanced Concrete Technology: Processes”, ISBN 0 7506 5105 9, Great Britain, 2003.
- [33] Domone, P.L., Chai, H.W, “ Design and testing of self-compacting concrete ” , Production Methods and Workability of Concrete, RILEM International Conference, Eds P.J.M. Bartos, D.L. Marrs and D.J. Cleland, 1996; 199-208.
- [34] Marsh, D, “ An alternative to silica fume ”, Concrete Production 1994; 97(11): 24-30.
- [35][T.SEDRAN, 1999], Rhéologie et rhéomètre des bétons. Application aux bétons autonivelant, Thèse de doctorat de L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES
- [36] Khelifa R., «L'impact des cimenteries sur l'environnement – Cas de la cimenterie de Ain-Touta», Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d'Orléans, le 18 Septembre 2002.
- [37][G.Benkechkache, 2007], Etude du comportement différé du béton autoplaçant, influence de paramètres de composition et de chargement, Thèse de Magister en Génie Civil, option Mécanique des structures, Université Mentouri Constantine, Novembre 2007.
- [38][G.Benkechkache,2012], "Contribution à l'étude des mécanismes liés au retrait et fluage (déformations différées) des bétons, Thèse de Doctorats en Génie Civil, option Mécanique des structures, Université Mentouri Constantine, Avril 2012.
- [39][H.OKAMURA and M.OUCHI, 1999], “Self-compacting concrete. Development, present and future”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 3-14, 13-15 septembre 1999
- [40][S.Assié, 2004], Durabilité des bétons autoplaçants, Thèse de Doctorat INSA, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE. p18-19-21-22-23-24-29.
- [41][S.Brahim] : Support de cours de matériaux de construction, Chapitre 2: Methode de formulation des bétons autoplaçants
- [42] Assié S., « DURABILITE DES BETONS AUTOPLAÇANT », thèse de Doctorat INSA-UPS de Toulouse, N° d'ordre : 747, soutenue le 29 Octobre 200
- [43] Association Française de Génie Civil, « Bétons autoplaçants -Recommandations provisoires », Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000
- [44] Okamura H., Ouchi M;, “Self-compacting concrete”, journal of advanced concrete Technology, Vol. 1, No. 1, pp 5-15, April 2003.
- [45] Turcry P., « Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants Influence de la Formulation », Thèse Doctorat Ecole centrale de Nantes, N° ED 036-11, soutenue le 03 Février 2004.

- [46] Yassine SENHADJI : L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques) (Mémoire de Magister-USTMB d'Oran -2006).
- [47] richard gagné : GCI 714 – durabilité et réparation du béton : cours de génie civil ( université de Sherbrooke)
- [48] Dr. Ir. P. Boeraeve : Cours de Béton armé
- [49]GRUBE H., RECHENBERG W. - «Durability of concrete structures in acidic water». Cem. Concr. Res., vol. 19, n° 5, p 183-
- [50] NORME ASTM C 267-96., « Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer concretes», Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, 1996.
- [51] YASSINE SENHADJI, «L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques) » Ingénieur d'Etat en génie civil, thèse de Magister, Option : Géo-Matériaux, Université des Sciences et de Technologie Med Boudiaf d'Oran Algérie 2006.
- [52] BULLETIN DU CIMENT n° 12, « substances exerçant une action chimique sur le béton » <http://www.tfb.ch> Suisse (1995).
- [53] BERRAIH MIMOUN : Etude des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets de verre (Mémoire de Magister- l'ENSET d'Oran-2010).
- [54] Tang L., Sorensen H E., "Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/ migration coefficients of concrete", Materials and Structures/ Matériaux et constructions, Vol. 34, octobre 2001, pp. 479-485.
- [55] Bentouati M., "Perméabilité aux liquides et gaz des bétons autoplçants", Mémoire de Magister, janvier 2010. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (USTO) MOHAMED BOUDIAF.
- [56] Audenaert K., De Schutter G., "Influence of moisture on the carbonation of SCC", Proceeding (SP212) of the 6th CANMET/ACI. International Conference on Durability of Concrete, Greece, pp. 451- 465, June 2003.
- [57] Assié S., "Durabilité des bétons autoplçants", laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), Institut des sciences Appliquées (INSA), Toulouse, octobre 2004.
- [58] ROZIERE E., "Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, novembre 2007.
- [59] Baron J., Ollivier J-P., «Les bétons- bases et données pour leur formulation» Editions Eyrolles,1996

