



Université Ziane

Faculté des Sciences et de la

Département génie civil
Référence

جامعة الجلفة
Achour de Djelfa
كلية العلوم و التكنولوجيا
Technologie
قسم الهندسة المدنية

:FST/DST/M2/GTM / 06 / 2017

Mémoire de Fin d'Etude

Présenté au :

Département : Génie Civil
Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Civil
Spécialité : Géotechnique & Matériaux

Réalisé par :

Berdaia Rachid & Guadabi Fatima el_Zahraa

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER ACADEMIQUE

Intitulé

*Etude de la résistance aux attaques chimiques sur le béton
autoplaçants à base de divers types de sable*

Soutenue le : 19/06/2017

Devant le jury de soutenance composé de :

Mr DIF .F

MAA

Univ. Djelfa Président

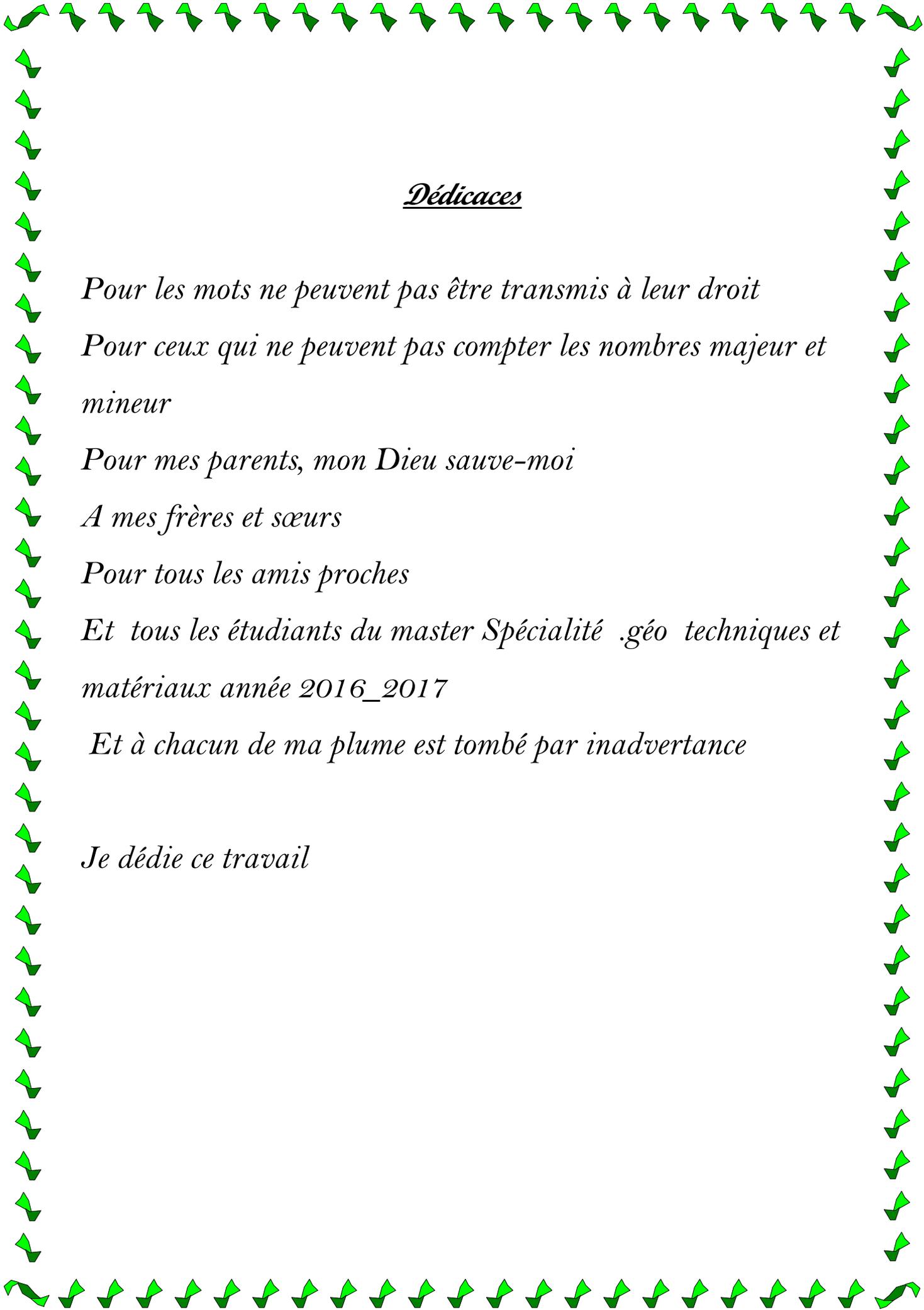
Remerciement

Nos sincères remerciements et sa gratitude à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin, à l'achèvement de ce travail et à surmonter ce que nous face à des difficultés, notamment notre enseignant et encadreur Mr. Doura Taha .H de supervision qui ne nous accorderez sa direction et le conseil était la valeur qui nous aident à l'achèvement de cette recherche.

Les parents de remercions Spécial

De même que pour tous les enseignants du Département des sciences et de la technologie et du Département de génie civil sur chaque personnage nous a appris

Nous tenons à exprimer notre sincère remerciement aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être membres de jury et de bien vouloir juger ce travail



Dédicaces

Pour les mots ne peuvent pas être transmis à leur droit

Pour ceux qui ne peuvent pas compter les nombres majeur et mineur

Pour mes parents, mon Dieu sauve-moi

A mes frères et sœurs

Pour tous les amis proches

Et tous les étudiants du master Spécialité .géo techniques et matériaux année 2016_2017

Et à chacun de ma plume est tombé par inadvertance

Je dédie ce travail

ملخص

الخرسانة ذاتية التسوية (أو ذاتية الرص) هي الخرسانة السائلة، تتشوه للغاية، متجانسة ومستقرة، والتي تستعمل دون استخدام وسائل الاهتزاز أو الرص. وتستعمل في الهياكل ذات الأشكال المعقدة، يجب أن تكون الصفات مماثلة لتلك التي في الخرسانة التقليدية.

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير الاوساط العدوانية على ديمومة الخرسانة ذاتية التسوية المحضرة مختلف أنواع الرمل (رمل الوديان SO، رمل المقالع SC و رمل الكثبان SD).

إن التعويض الجزئي بنسبة 30% لرمال الوديان SO برمال الكثبان SD أعطى نتائج جيدة فيما يخص مقاومة الخرسانة لهجوم حمض HCl و ملح NaCl. وهذا ما يعني أن معامل الاكتناز هو الأكبر لهذه التركيبة من بين التركيبات المختبرة. **كلمات مفتاحية:** خرسانة، سائلة، متجانسة، مستقرة، رمل، الكثبان، المقالع.

Résumé

Un béton autoplaçant (BAP) est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration. Il remplit parfaitement les formes des coffrages les plus complexes et/ou fortement ferrailé, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet des milieux agressifs sur la durabilité d'un béton autoplaçant préparés par divers types de sables (Sable concassé SC, Sable Alluvionnaire ou oued SO et Sable de dune SD).

La résistance à l'attaque par HCl ou NaCl est maximale dans la composition 30% sable de dune et 70% sable d'oued, c'est indiqué que la compacité dans cette composition est maximale.

- **Mots clés :** béton, fluide, homogène, stable, sable, dune, concassée.

Abstract

A self-compacting concrete (SCC) is a fluid concrete, highly deformable, homogeneous and stable, which is taking place by gravity and without the use of a vibrating means. He fills perfectly to the shape of the most complex forms, it must not be subjected to segregation and must have qualities similar to those of a conventional vibrated concrete.

The objective of this work is to study the effect of aggressive media on the durability of self-compacting concrete prepared by various types of sand (Crushed Sand SC, Sand Alluvium SO and dune sand SD).

The resistance to attack by HCl or NaCl is maximum in the composition 30% dune sand and 70% alluvium sand, it is indicated that the compactness in this composition is maximum.

- **Key words:** concrete, fluid, homogeneous, stable, sand, desert, crushed

Sommaire

Remerciement.....	I
Dédicaces.....	II
Résumé.....	III
Liste des figures Liste des tableaux.....	IV
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : Bibliographie sur le BAP

I.1 Introduction	3
I.2. Modes de formulation des BAP.....	3
I.2.1. Cahier des charges minimum à l'état frais	4
I.2.2. Particularités de la composition des BAP	6
I.2.2.1. Un volume de pâte élevé.....	6
I.2.2.2. Une quantité de fines ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante.....	6
I.2.2.3. L'emploi d'un superplastifiant	7
I.2.2.4. L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau)	7
I.2.2.5. Un faible volume de gravillon	8
I.3. Caractérisation du béton à l'état frais	9
I.3.1. caractéristiques rhéologiques des BAP	9
I.3.2. essais de caractérisations d'un BAP	10
I.3.2.1. L'essai d'étalement (slump flow).....	10
I.3.2.2. L'essai boîte en L (L-box test).....	11
I.3.2.3 l'essai de stabilité	12
I.4. Propriétés du béton durci	14
I.4.1. Résistance mécanique	14
I.5. Conclusion	15

CHAPITRE II : la durabilité de béton

I. Introduction à la durabilité	17
II. Facteurs influençant la durabilité	17

<i>II. Les attaques chimiques des bétons</i>	18
<i>II.1 Actions des acides</i>	18
<i>II.1.1 Sources des acides</i>	18
<i>II.2 Actions des sulfates</i>	19
<i>II.2.1 Source des sulfates</i>	19
<i>II.3.2 Mécanisme d'attaque</i>	20
<i>II.3.3 Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques acides</i>	21
<i>II.3 Action des sels de déverglaçage</i>	22
<i>II.4. La carbonatation</i>	22
<i>II.4.1 Les mécanismes de carbonatation</i>	22
<i>II.5 Conclusion</i>	23

CHAPITRE III : Caractéristiques des Matériaux utilisés

<i>III.1. Introduction</i>	17
<i>III.2. Caractéristiques des matériaux</i>	17
<i>III.2.1. Les sables</i>	17
<i>III.2.2. Les graviers</i>	23
<i>III.2.3. Ciment</i>	28
<i>III.2.4. Super plastifiant</i>	28
<i>III.2.5. EAU</i>	28
<i>III.3. Conclusion</i>	28

Chapitre IV: Analyse des résultats

<i>IV.1. Introduction</i>	41
<i>IV.2. Programme expérimental</i>	41
<i>IV.2.1.1. Compositions de bétons préparées</i>	41
<i>IV.2.1.2. confection des éprouvettes</i>	42
<i>IV.2.2. Deuxième étape : Evaluation de durabilité vis-à-vis l'attaque chimique</i>	42
<i>IV.3. Résultats et discussion</i>	44
<i>IV.3.1. Effet de l'acide HCl</i>	44
<i>IV.3.1.1. La 1^{ière} série</i>	44
<i>IV.3.1.2. La 2^{ième} série</i>	46
<i>IV.3.1.3. Comparaison de trois systèmes de mélange</i>	48
<i>IV.3.2. Effet de solution NaCl</i>	50
<i>IV.3.2.1. LA 1^{ère} Série</i>	50
<i>IV.3.2.2. La 2^{ième} série</i>	52
<i>IV.3.2.3. Comparaison de trois systèmes de mélange</i>	53
<i>IV.3.2. Comparaison entre les deux milieux d'attaque</i>	55
<i>IV.4. Conclusion</i>	56

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I.1 : Phénomène de blocage des granulats aux droits d'un obstacle</i>	5
<i>Figure (I.2.) : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP</i> .	6
<i>Figure (I.3) : Phénomène de ressuage</i>	7
<i>Figure I.4. : Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré (d'après</i>	8
<i>Figure I.5 : Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton</i>	9
<i>Figure I.6 : essai d'étalement au cône (slump flow)</i>	10
<i>Figure I.7 : Entonnoir en forme V (V funnel)</i>	11
<i>Figure I.8 : Essai de la boîte en L (L-box test) [self]</i>	11
<i>Figure I.9 : essai en U (à gauche), essai de caisson (à droite)</i>	12
<i>Figure I.10 : Essai de stabilité au tamis</i>	13
<i>Figure I.11 : Essai de ressuage à l'aéromètre</i>	14
<i>Figure I.12 : évolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (BEF) correspondant</i>	14
<i>Figure I.13 : résistance mécanique d'un béton vibré et deux BAP (deux formulations différentes)</i> ..	15
<i>Figure II.2 : Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de sodium</i>	20
<i>Figure II.1 : mécanisme de carbonatation</i>	23
<i>Figure 3.1: Comparaison de la masse volumique apparente et la masse volumique absolue entre les différents types de sables</i>	28
<i>Figure 3.2: Courbes granulométriques de différents types de sables</i>	30
<i>Figure 3.3: Comparaison du module de finesse entre les différents types des sables</i>	31
<i>Figure 3.4: Comparaison de l'équivalent de sable entre les différents types des sables</i>	32
<i>Figure 3.5: Comparaison de la masse volumique apparente et la masse volumique absolue entre les différents types de graviers</i>	34
<i>Figure 3.6: Courbes granulométriques de différents types de graviers</i>	36
<i>Figure 3.7: comparaison de coefficient de dureté entre les différents types de graviers</i>	37
<i>Figure IV.1 : Variation de la masse à 3, 7, 14 et 28 jours des éprouvettes immergées dans 5% HCl en fonction de sable (1^{ère} série)</i>	45

Figure IV.2 : Pourcentage de gain ou perte de la résistance à l'attaque par 5% HCl des différents BAP en comparaison au témoin 100SO (1 ^{ère} série).....	45
Figure IV.3 : Variation de la masse à 3, 7,14 et 28 jours des éprouvettes immergés dans 5% HCl en fonction de sable (2 ^{ème} série)	46
Figure IV.4 : Pourcentage de gain ou perte de la résistance à l'attaque par 5% HCl des différents BAP en comparaison au témoin 100SO (2 ^{ème} série).....	47
Figure IV.5 : variation de la perte en masse de trois systèmes de mélange SO-SD, SO-SC et SC-SD en fonction de pourcentage de sable et en fonction du temps.....	48
Figure IV.6 : Comparaison des trois meilleures compositions avec la composition témoin 100SO.....	49
Figure IV.7 : Variation de la masse à 3, 7,14 et 28 jours des éprouvettes immergés dans 5% NaCl en fonction de sable (1 ^{ère} série)	51
Figure IV.8 : Pourcentage de gain ou perte de la résistance à l'attaque par 5% NaCl des différents BAP en comparaison au témoin 100SO (1 ^{ère} série).....	51
Figure IV.9 : Variation de la masse à 3, 7,14 et 28 jours des éprouvettes immergés dans 5% NaCl en fonction de sable (2 ^{ème} série).....	52
Figure IV.10 : Pourcentage de gain ou perte de la résistance à l'attaque par 5% NaCl des différents BAP en comparaison au témoin 100SO (2 ^{ème} série).....	53
Figure IV.11 : variation de la perte en masse de trois systèmes de mélange SO-SD, SO-SC et SC-SD en fonction de pourcentage de sable et en fonction du temps.....	54
Figure IV.12 : Comparaison des trois meilleures compositions avec la composition témoin 100SO.....	55

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 3.3: résultats de l'analyse granulométrique de sable de dune</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 3.4: résultats de l'analyse granulométrique de sable de carrière.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 3.5: résultats de l'analyse granulométrique de sable de Oued</i>	<i>30.</i>
<i>Tableau 3.6: résultats de l'essai équivalent de sable du sable de dune.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 3.7: résultats de l'essai équivalent de sable du sable de carrière.....</i>	<i>32.</i>
<i>Tableau 3.8: résultats de l'essai équivalent de sable du sable de Oued.....</i>	<i>32.</i>
<i>Tableau 3.9: résumé des résultats.....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 3.10: Essai de la masse volumique apparente des graviers.....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 3.11: Essai de la masse volumique absolue des graviers.....</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 3.12: résultats de l'analyse granulométrique de gravier 3/8</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 3.13: résultats de l'analyse granulométrique de gravier 8/15.....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 3.14: résultats de l'essai d'absorption.....</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 3.15: résultats de l'essai de dureté Los Angeles.....</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 3.16: résumé des résultats.....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 3.17. Composition chimique et minéralogique du ciment (%)......</i>	<i>38.</i>
<i>Tableau 3.18. Propriétés physico – mécaniques du ciment</i>	<i>38</i>
<i>Tableau IV.1: composition préparée dans 1 m³.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau IV.2: Combinaisons de sables.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau IV.3: Quantité des sables pour chaque combinaison.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau IV.4 : la perte en masse (%) d'éprouvettes d'une solution 5% HCl</i>	<i>44</i>
<i>Tableau IV.5 : la perte en masse (%) d'éprouvettes d'une solution 5% NaCl</i>	<i>50</i>

INTRODUCTION GENERALE

L'étude présente est une partie d'un projet de recherche CNEPRU agréé sous code J0402820140001 intitulé "étude des comportements rhéologiques, mécaniques et durabilités des bétons autoplaçants: valorisation des matériaux locaux, recyclage et modélisation".

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet des milieux agressifs sur la durabilité d'un béton autoplaçant préparés par divers types de sables (Sable concassé SC, Sable Alluvionnaire ou oued SO et Sable de dune SD).

L'étude basée sur l'immersion totale des éprouvettes des bétons dans deux solutions, une solution HCl concentrée à 5% et autre NaCl concentrée à 5%, puis en suite la perte en masse à 3, 7, 14, 21 et 28 jours.

Ce mémoire recouvre à la fois deux aspects : une partie bibliographique et autre expérimentale.

La partie bibliographique contient deux chapitres : le premier chapitre '*chapitre I*' regroupe les caractéristiques d'un béton autoplaçant BAP et la particularité de sa composition, ainsi que les différents essais caractérisant un BAP.

En deuxième chapitre '*chapitre II*' nous avons traité l'aspect de durabilité des bétons et BAP.

La partie expérimentale comporte deux chapitres le premier nommé '*chapitre III*' qui regroupe les caractéristiques physiques chimiques des matériaux utilisés ainsi que l'interprétation de tous les résultats obtenus.

Le dernier chapitre '*chapitre IV*' présente une analyse et discussion sur les résultats trouvés. Dans ce chapitre nous avons expliqué en détail le processus expérimental pour quantifier la durabilité des BAP dans les milieux agressifs, ainsi que l'interprétation de résultats.

A la fin de ce mémoire nous avons établi une conclusion générale qui résume les principaux résultats extraits lors de cette étude.

chapitre I :

Bibliographie sur le BAP

I.1 Introduction :

Les bétons autoplaçants (en anglais Self-compacting concrete) sont découverts depuis les années 1980 au Japon, ces bétons se caractérisent par, une grande fluidité, une homogénéité et sa mise en place correcte par gravitation et sans vibration [01].

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

Cependant, ces avantages s'accompagnent fatalement de certains inconvénients :

- Augmentation du coût des matières premières (additions, adjuvants),
- Modifications des outils de fabrication (outils de mise en place).

I.2 Modes de formulation des BAP :

Par définition, un béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Le terme de béton autonivelant (BAN) peut aussi être utilisé mais il concerne plutôt des applications horizontales (dallage par exemple).

Le grand problème de ce type de béton est de trouver une méthode de formulation, il existe plusieurs approches de formulation qui 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 [03]

Deux grandes familles prévalent actuellement [03] :

- la première [04] [05] concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m³) 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, onéreuses et mal adaptés à des ouvrages courants.
- une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [06]. 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.

I.2.1. Cahier des charges minimum à l'état frais :

Plusieurs spécificités de composition des BAP découlent de ces diverses approches.

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), c'est à dire avoir un étalement et une vitesse d'étalement importants.
- Un BAP doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. En effet, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas suffisamment au cisaillement (figure 1.1). Ainsi, des arches peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage. Pour éviter ceci, il est nécessaire qu'un BAP ait une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en zone confinée.

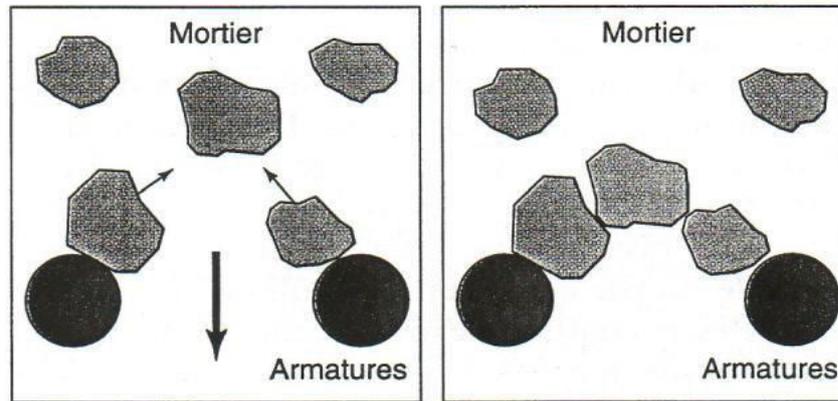


Figure I.1 : Phénomène de blocage des granulats aux droits d'un obstacle [03].

- Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques.
- De plus, le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées, par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures [07].

En résumé, le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton.

Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (figure I.2). En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie. [08]

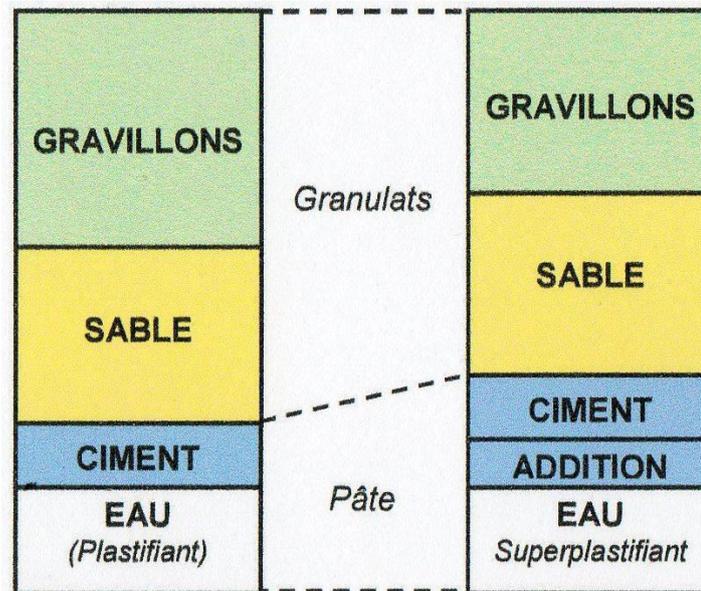


Figure (I.2.) : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [08].

I.2.2. Particularités de la composition des BAP

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

I.2.2.1. Un volume de pâte élevé

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + addition + eau efficace + air) est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement, son volume est donc élevé (330 à 400 l/m³) [08] [03].

I.2.2.2. Une quantité de fines ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 Kg/m³) pour limiter les risques de ressuage (figure I.3), et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes [03].

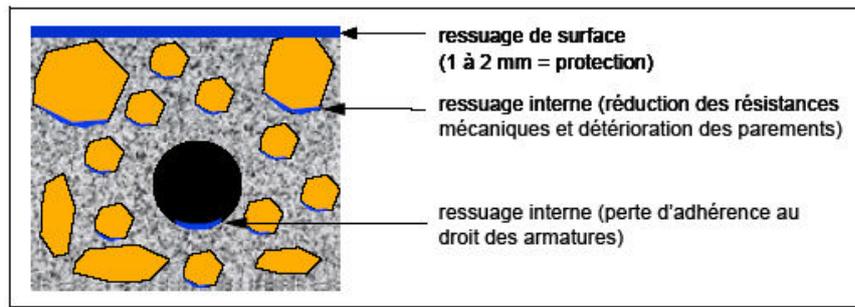


Figure (I.3) : Phénomène de ressuage.

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (normes XP P 18-305 ou EN 206, etc.) et les paramètres d'ouvrabilité qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc. le filler étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les formulations de BAP) et leur proportion respective.

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence sur les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton.

I.2.2.3. L'emploi d'un superplastifiant :

La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylate, polyacrylate/ polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche de dosage de saturation) de peur d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et ressuage.

Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'absorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau.

I.2.2.4. L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau)

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

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n'étant alors pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation

ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles (rapport eau/fines <0.3). Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas.

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air et à une diminution de la fluidité [09]

I.2.2.5. Un faible volume de gravillon

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée (figure I.4). Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

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

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

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes (figure I.4). Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires.

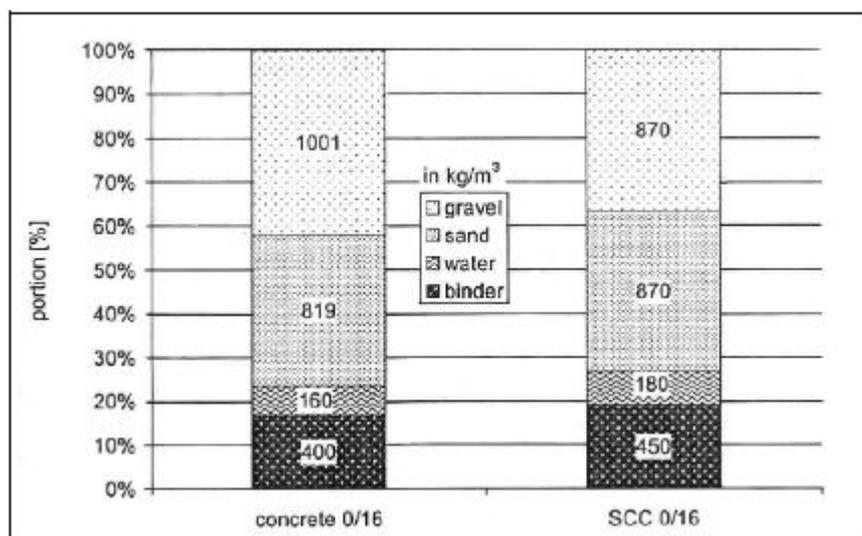


Figure I.4. : Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré (d'après [10])

I.3. Caractérisation du béton à l'état frais :

I.3.1. 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.5) est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement, τ_0 .

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

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \gamma^b$$

avec τ la contrainte de cisaillement (Pa), τ_0 le seuil de cisaillement (Pa), η_p la viscosité plastique ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) et γ la vitesse de déformation (s^{-1}).

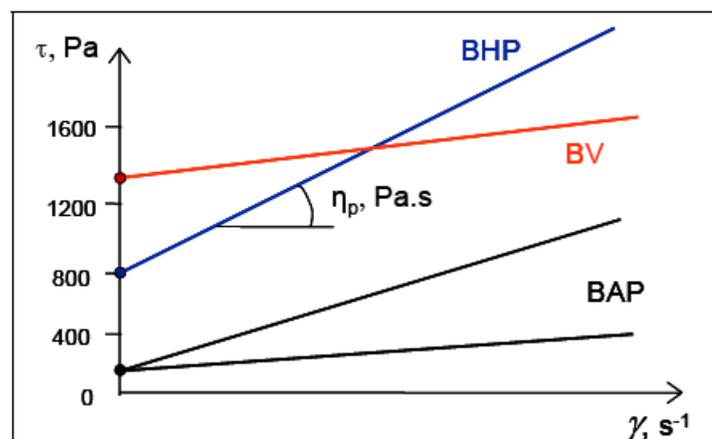


Figure I.5 : Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton [03]

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

$$\tau = \tau_0 + a\gamma^b$$

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.3.2. essais de caractérisations d'un BAP :

Les bétons autoplaçants sont caractérisés à l'état frais par trois essais essentiels (selon les recommandations de AFGC [07]) :

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

I.3.2.1. L'essai d'étalement (slump flow):

L'essai le plus courant permettant de caractériser la mobilité en milieu confiné est l'essai d'étalement (slump flow) à l'aide du cône d'Abrams (figure I.6). En effet, la valeur de l'étalement, donnée par la mesure du diamètre de la galette de béton, s'avère être plus représentative que celle de l'affaissement.



Figure I.6 : essai d'étalement au cône (slump flow)

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 [07]. 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.7) [01].

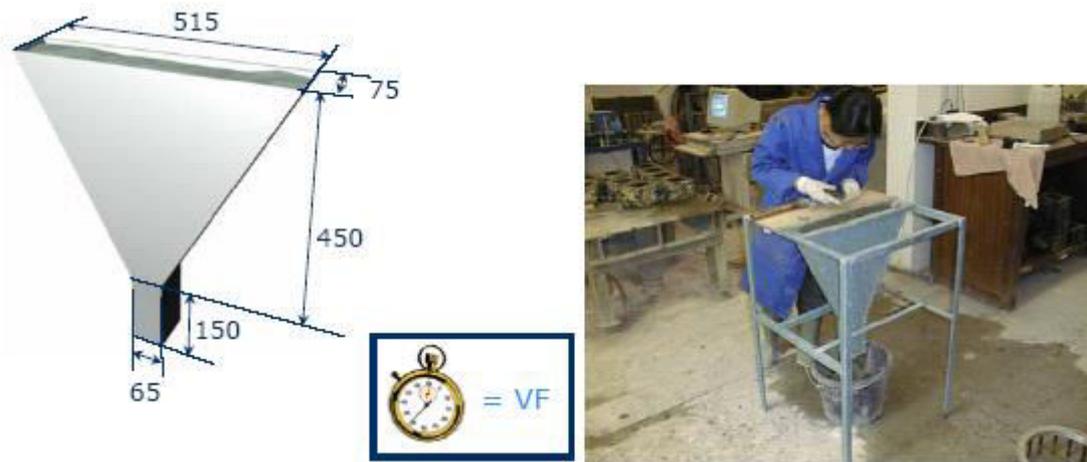


Figure I.7 : Entonnoir en forme V (V funnel)

I.3.2.2. 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.8) 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 ϕ 14) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre 2 barres) [07].

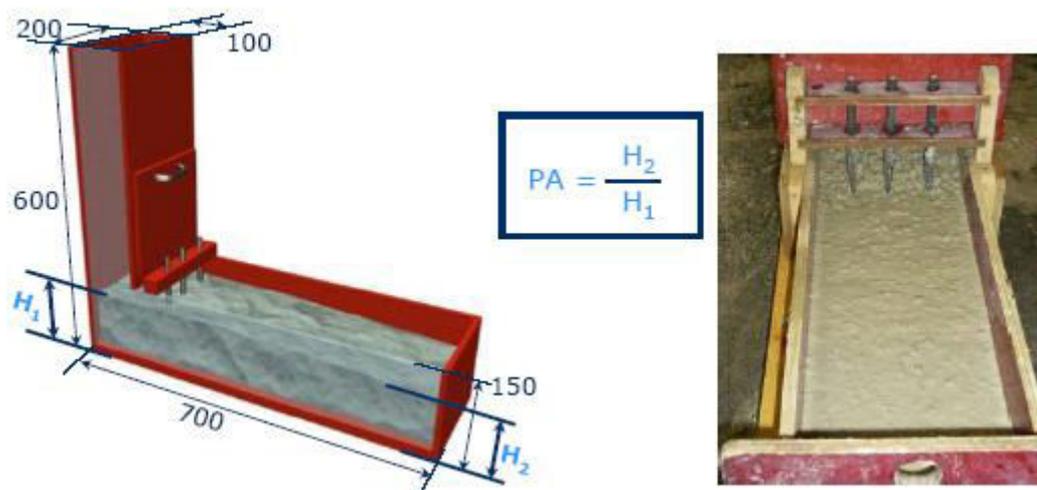


Figure I.8 : Essai de la boîte en L (L-box test) [self]

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 [07]. 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.9) :

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

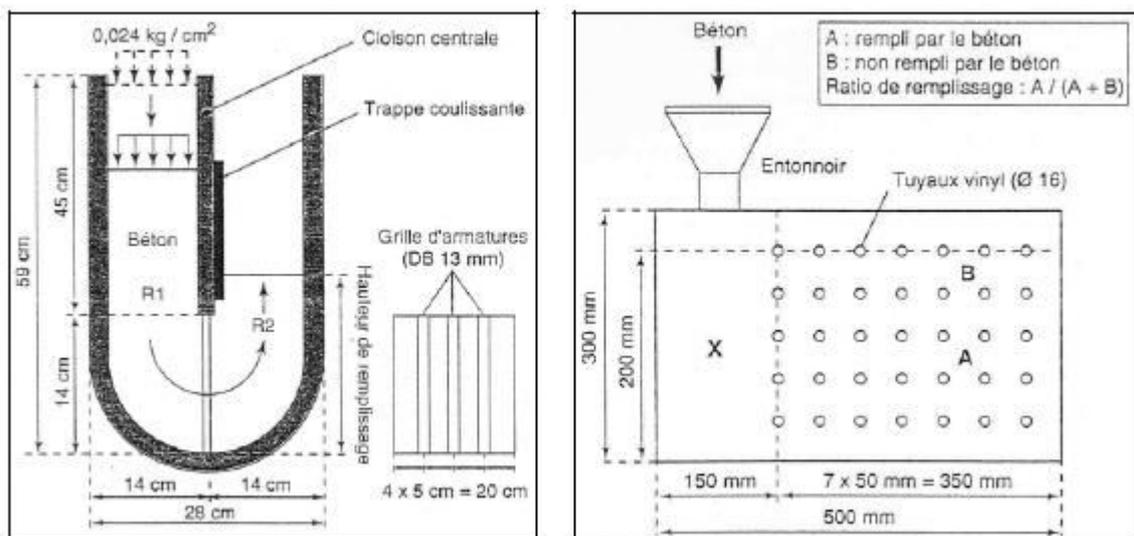


Figure I.9 : essai en U (à gauche), essai de caisson (à droite)

I.3.2.3 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.10) [07], qui consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (noté P_{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).

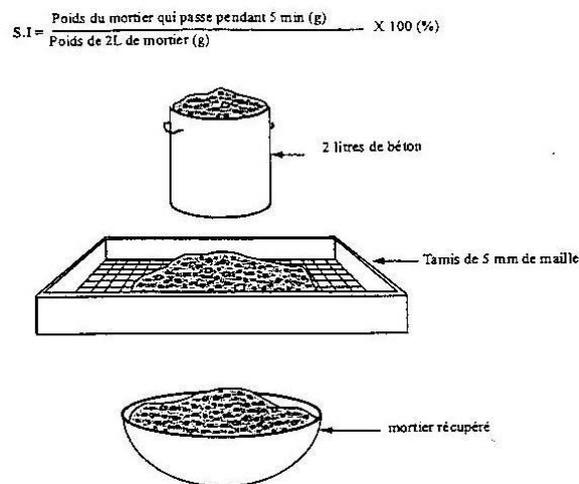


Figure I.10 : Essai de stabilité au tamis

b. Ressuage

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, figure 1.11) : 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 [07]. Ce test semble cependant peu pratique à être utilisé étant donné la nocivité du produit employé.

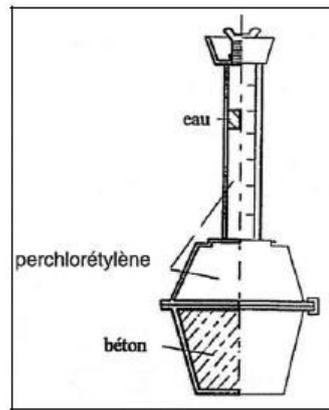


Figure I.11 : Essai de ressuage à l'aéromètre [07]

I.4. Propriétés du béton durci :

I.4.1. Résistance mécanique :

Les bétons autoplaçants présentent une même résistance mécanique que celui d'un béton ordinaire (béton vibré) figure I.12.

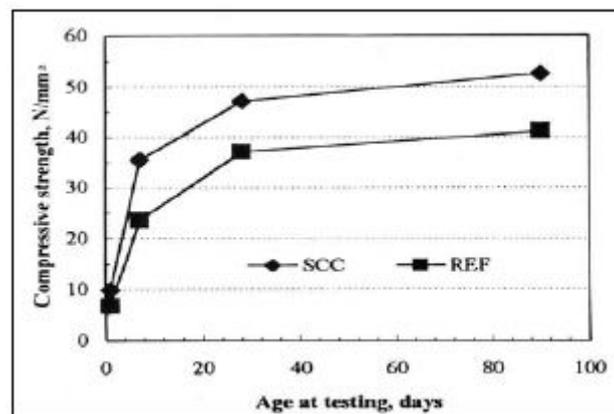


Figure I.12 : évolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (BEF) correspondant [11].

Les travaux de [12] [13] montrent que la résistance mécanique s'accélère aux jeunes âges en utilisant les fillers. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

De plus, certains auteurs [14] affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande (figure I.13). Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours.

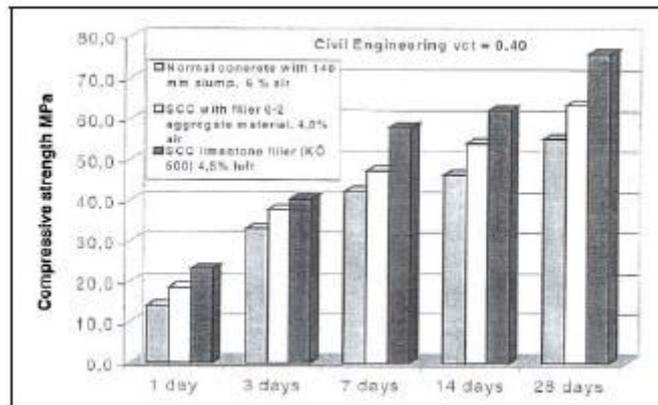


Figure I.13 : résistance mécanique d'un béton vibré et deux BAP (deux formulations différentes) [14]

Le dosage en adjuvant, dans la formulation des BAP, peut aussi influencer sur l'évolution de la résistance mécanique du béton.

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [15].

1.5. Conclusion

A l'issue de ce chapitre on peut dire que le BAP est une solution pour les ouvrages fortement ferrailé, ainsi sa composition est très particulière en comparaison à celle béton vibré. Des études précédentes de notre encadreur à été établie des compositions de béton BAP avec l'utilisation de divers types de sables.

Chapitre II :

la durabilité du béton

I. Introduction à la durabilité :

Les altérations du béton observées en présence d'agents agressifs, qu'ils soient minéraux, organiques ou biologiques, sont d'ordre chimique ou physique.

Les altérations physiques peuvent être surfaciques (abrasion, érosion, cavitation ou écaillage) ou interne sous forme de fissures (changement structural, gradients d'humidité ou de température, pression de cristallisation, exposition aux températures externes) Les altérations chimiques sont dues essentiellement aux acides, aux bases et aux solutions salines, elles entraînent presque toujours la dissolution de la chaux et le plus souvent, en association avec cette dissolution, la formation de composés nouveaux [41] dont les conséquences sont d'ordre macroscopique :

- Mécanique : chute de résistances et de rigidité, fissuration et déformation du matériau.
- Physico-chimique : baisse du pH, augmentation de la porosité et des propriétés de transfert des gaz et des liquides.

L'action des ions sulfate issus du gypse, utilisé comme retardateur de prise, ne présente pas un danger pour les bétons car l'hydrate formé est certes expansif, mais cristallise dans une pâte de ciment fraîche et plastique qui supporte les déformations induites. Par contre en cas d'attaque externe après la prise, la cristallisation de l'hydrate se fait dans la porosité d'une matrice peu déformable. L'expansion de l'ettringite peut alors donner naissance sur les parois du réseau poreux à des pressions de traction causant expansion, fissuration voire éclatement du béton [42].

II. Facteurs influençant la durabilité :

La durabilité peut être altérée par diverses actions physiques ou chimiques néfastes qui font intervenir l'écoulement de fluides (liquides ou gaz) à travers le béton. Par conséquent, la caractérisation dimensionnelle et la comparaison des BAP avec les bétons vibrés nécessitent la détermination de certaines propriétés physico-chimiques.

Le mécanisme de dégradation chimique du béton consiste à une décalcification progressive du béton au cours du temps en contact avec un environnement agressif. Cette dégradation provoque une augmentation de la porosité du béton qui modifie ces propriétés physico-chimiques et mécaniques. D'une part cette augmentation de porosité accélère le processus de transport (perméabilité ou diffusion) de matières et entraîne une accélération de la dissolution des hydrates (notamment la portlandite). D'autre part, ceci induit une modification des propriétés mécaniques comme la perte de résistance et la perte de rigidité. En plus, les

sollicitations mécaniques créent des microfissures qui peuvent être des facteurs accélérant le processus de dégradation chimique.

II. Les attaques chimiques des bétons

Les agressions chimiques que peuvent rencontrer les matériaux à matrice cimentaires sont très variées. De par sa porosité et la composition chimique de la solution interstitielle, des échanges de matière peuvent se produire et être à l'origine d'une évolution de la composition solide de la pâte de ciment. Ces phénomènes de transport et de réaction s'effectuent à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment [59]. Parmi une multitude de causes de dégradation des matériaux cimentaires, figurent les attaques par les acides, par les sulfates et par le dioxyde de carbone.

II.1 Actions des acides :

Les environnements agressifs du point de vue de la lixiviation et des attaques acides peuvent être assez variés, et combinés à d'autres types d'agressions. Mais les eaux en contact avec le béton ont en commun d'être faiblement minéralisées, en particulier en calcium, et neutres (pH= 7) voire acides (pH <7).

Le mécanisme de dégradation induit, provient de ces gradients de concentration entre les eaux agressives et la solution interstitielle du béton, d'un pH supérieur à 12 donc basique, et riche en calcium. Les principales espèces lixiviées sont de ce fait les ions calcium Ca^{2+} et hydroxyde OH^- [60]. Leur transport vers le milieu extérieur est donc diffusif, ce qu'ont permis de confirmer les modélisations du phénomène [61] [62].

La solution interstitielle n'étant plus saturée en ions calcium et en hydroxyde, les composés solides contenant ces espèces se dissolvent. La teneur en calcium des produits solides décroît avec la diminution de la concentration en calcium dans la solution porale. La lixiviation commence par la dissolution de la portlandite, puis des monosulfoaluminates, l'ettringite et les C-S-H se décalcifient [60] [63] [61] [64].

a) Sources des acides :

Les milieux acides les plus fréquents sont :

- Les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, où le pH peut s'abaisser jusqu'à 4 ;
- Les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agroalimentaires ;

- Les réseaux d'égouts : l'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation des produits soufrés qui, combiné à l'humidité atmosphérique se condensent sous forme d'acide sulfurique qui va attaquer le béton.
- Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4.0 et 4.5, peuvent provoquer la dégradation de la surface exposée du béton.
- Calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) [24].

II.2 Actions des sulfates :

Les ions sulfates sont présents de façon naturelle dans certains sols et eaux souterraines. Les attaques sulfatiques sont dites externes quand les ions sulfates proviennent de l'environnement. Ainsi, ce type de dégradation est considéré comme une action environnementale, dans la définition des classes d'exposition – XA, environnements chimiquement agressifs [64].

L'attaque sulfatique externe est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les CSH ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide, ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée.

a) Source des sulfates :

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques et industrielles. Dans certaines régions (comme l'Afrique du nord, les prairies canadiennes, ..) où les sols contiennent du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou de l'anhydrite (CaSO_4), on peut en rencontrer des concentrations élevées supérieures à 5%.

Les eaux souterraines en contact avec ces sulfates peuvent se charger en ions SO_4^{2-} . Les sols alluviaux ou argileux peuvent aussi contenir des pyrites qui s'oxydent en sulfates au contact de l'air et de l'humidité avec la formation d'acide sulfurique. Les sulfates peuvent aussi provenir de la décomposition biologique aérobie de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes).

Les sources de sulfates peuvent aussi être internes :

- Contamination des granulats par du plâtre ;

- Granulats gypseux ;
- Sulfures dans certains granulats.

b) **Mécanisme d'attaque :**

- c) Des roches et des minéraux naturels provenant des sulfates de calcium (gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et anhydrite CaSO_4), et des sulfates de magnésium (epsomite $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) forment la source externe de sulfates la plus présente dans la nature. Cependant, ce n'est que lorsque ces sulfates sont dissous dans l'eau (souterraine ou autre) qu'ils présentent un danger potentiel pour pénétrer dans la matrice du béton, réagir avec les hydrates et changer leur structure.

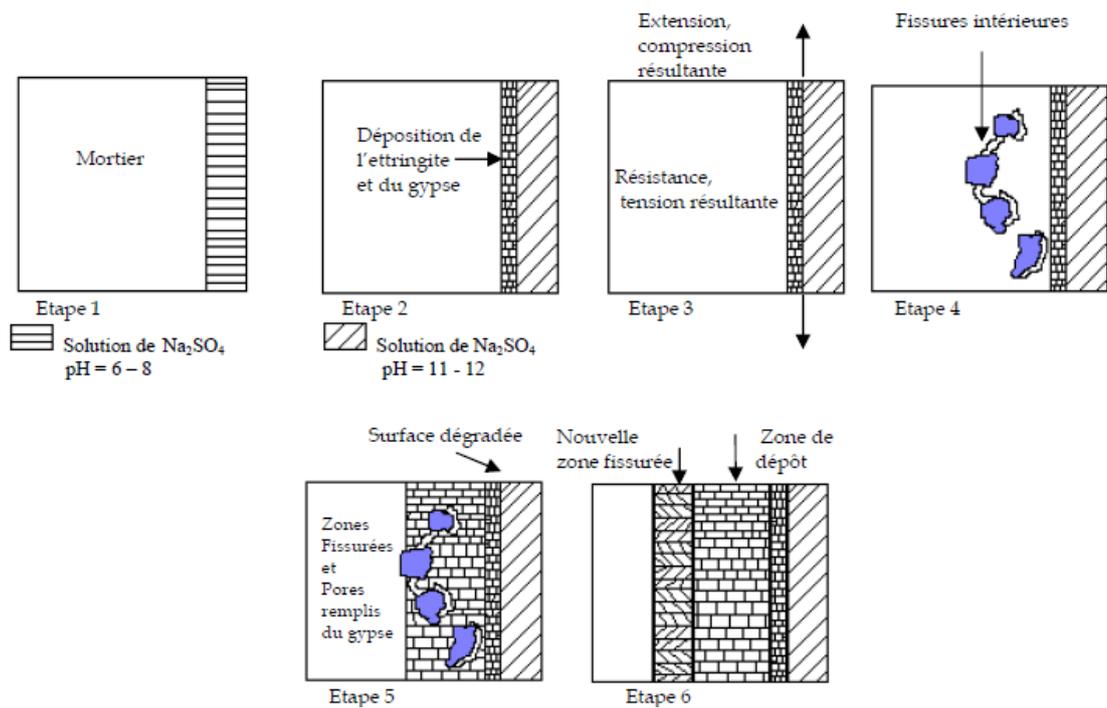
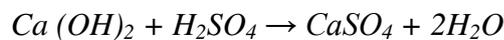


Figure II.1. Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de sodium [74]



Hydroxyde de calcium + acide sulfurique → sulfate de calcium + eau

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

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car le sel correspondant (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau. La formule I.3 décrit la réaction entre l'acide chlorhydrique et la portlandite.



Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique → chlorure de calcium + eau

Les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium. Ils attaquent également les autres composants de la pâte de ciment durcie, en formant des sels.

II.3.3 Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques acides :

Les liants pauvres en CaO sont souvent préconisés car ils interviennent à deux niveaux dans le mécanisme de lixiviation et de l'attaque acide. D'une part, ils génèrent une teneur plus faible en portlandite dont la dissolution engendre une augmentation de la porosité et des CSH plus denses et stables. D'autre part, à porosité globale identique, la morphologie du réseau poreux serait différente, et globalement cela se traduirait par une porosité capillaire et des coefficients de diffusion plus faibles [65]. Ainsi les liants comprenant des additions pouzzolaniques telles que les fumées de silice ou les cendres volantes font preuve d'une meilleure résistance à la lixiviation et aux attaques acides [63] [66]. La littérature est riche en résultats sur l'effet des ajouts minéraux sur la résistance des matériaux cimentaires dans les milieux acides, nous citons à titre d'exemple quelques travaux essentiels :

Kostuch et al [67] ont montré qu'en substituant 10% de métakaolin la résistance aux attaques acides est augmentée. Il associe ce phénomène à deux paramètres qu'induit la substitution de métakaolin dans la matrice cimentaire :

- Le métakaolin diminue le coefficient de transfert donc l'avancée de la solution acide.
- La réaction pouzzolanique transforme la Portlandite en CSH qui ont un coefficient de solubilité plus bas et donc améliore la résistance du béton envers ces attaques.

Enfin, d'après Roy [68], la résistance aux attaques acides des liants avec métakaolin augmente avec le taux de substitution. La perte de masse diminue de 4,5 % à 2 % lorsque le taux de substitution augmente de 7,5 à 22,5 %.

Rahmani et Ramzaniyanpour [69] ont suivi la perte de masse des mortiers et bétons soumis à l'attaque de l'acide sulfurique. Leurs résultats (Figure I.15), après 6 mois d'immersion, montrent une perte de masse de 62,6 % pour le béton à base de filler (C2), de 56,6 % pour l'addition binaire filler + fumée de silice (C3) de 30,1 % pour le filler + pouzzolane naturelle (C4) et de 40,2 % pour l'addition binaire filler + fines de pierre ponce (C5). Pour les bétons témoins (C1), la perte de masse était plus importante, cependant l'addition binaire filler + pouzzolane naturelle (C4) conserve sa meilleure résistance dans un environnement d'acide sulfurique.

II.3 Action des sels de déverglaçage :

La cause principale des dégradations de surface pouvant résulter de la diffusion des sels de déverglaçage dans les capillaires du béton est un accroissement des pressions osmotiques. L'importante chute de température de surface, due à la quantité de chaleur consommée pour provoquer la fusion de la glace, amplifie les effets du gel dans la zone du béton proche de la surface (la chute de température de surface peut atteindre 4 °C/minute au lieu de 4 °C/heure habituellement).

La peau du béton va donc se refroidir brutalement. Mais ce phénomène est rarement générateur d'un écaillage, car les sels de déverglaçage sont répandus dans la plupart des cas à titre préventif sur les ouvrages d'art des réseaux routier et autoroutier, pour garantir la sécurité des usagers. Il n'y a donc pas de film de glace lorsque les sels sont répandus.

Parallèlement aux phénomènes essentiellement d'ordre physique, la présence des chlorures doit être considérée en vue de se prémunir des risques de corrosion des armatures, en respectant de manière rigoureuse les prescriptions relatives à l'enrobage. [24].

II.4 La carbonatation

a) Les mécanismes de carbonatation

La carbonatation atmosphérique repose sur l'action du gaz carbonique CO_2 de l'atmosphère qui se diffuse à travers le réseau poreux ou fissural du béton et se dissout en acide au contact de la solution interstitielle. Cette acidification du milieu induit une dissolution de la portlandite qui constitue la réserve de basicité du béton. Au contact de la solution interstitielle, le gaz carbonique CO_2 provoque une réaction chimique avec la pâte de ciment hydratée. Cette réaction transforme les produits d'hydratation, comme la portlandite $Ca(OH)_2$ et les CSH , en carbonates de calcium $CaCO_3$.

La carbonatation entraîne une baisse du pH (initialement entre 12,5 et 13,5) dans la solution interstitielle du béton jusqu'aux environs de 9. La solution interstitielle perd sa capacité protectrice envers les armatures subissant alors une initiation de la corrosion. Dans le cadre d'une approche simplifiée, le mécanisme réactionnel de carbonatation de $Ca(OH)_2$ [83] [84] [85] [86] est synthétisé par la réaction chimique hétérogène suivante :



Cette équation indique que la carbonatation de la portlandite s'accompagne globalement d'une libération de l'eau de structure.

Les grandeurs qui peuvent permettre de caractériser l'évolution de la réaction, en fonction du temps ou de la profondeur de pénétration, sont la concentration en portlandite $Ca(OH)_2$ et le pH

de la solution interstitielle du béton. La figure I.21 illustre l'intervention combinée des trois phases gazeuse, aqueuse et solide, au cours du processus de carbonatation de la portlandite. La carbonatation est donc maximale lorsque l'humidité relative a une valeur modérée, c'est-à-dire lorsqu'elle est comprise entre 40 et 60 %, ou entre 40 et 80 % [87] [88], voire entre 84 et 92 % [89]. Ce domaine correspond en moyenne à quelques couches de molécules d'eau adsorbées sur la surface du solide [90] [91]. La carbonatation ne se produit donc pas dans un béton totalement sec ou complètement saturé en eau.

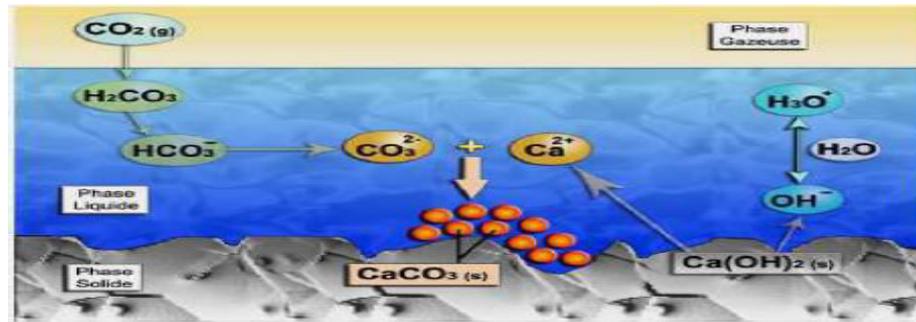


Figure II.2 : mécanisme de carbonatation

II.5 Conclusion :

D'après ce chapitre, la dégradation du béton se fait par l'attaque des acides ou des sels dans un environnement agressif. La suite de cette partie est la partie expérimentale, en va essayer dans cette partie de quantifier la résistance des BAP fabriqués par divers types de sables vis-à-vis l'attaque chimique des acides et des sels.

chapitre III :

caractéristiques des matériaux utilisés

3.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les différentes caractéristiques des matériaux utilisés:

- Les caractéristiques physiques
- Les caractéristiques chimiques
- Les caractéristiques minéralogiques.

Les matériaux utilisés dans ce projet sont: Le ciment, sable de Oued, sable de carrière, sable de dune, gravier 3/8, gravier 8/15, ajouts de calcaire <80 μm , l'eau et l'adjuvant superplastifiant.

3.2. Caractéristiques des matériaux :

3.2.1. Les sables

Nous avons utilisé trois types de sable de même classe granulaire 0/3 :

- Sable d'Oued (SO) provenant d'Oued Messad (80 Km au sud Est de Djelfa)
- Sable de Carrière (SC) provenant de carrière de Oued Sdar (30 Km au sud de Djelfa)
- Sable de Dune (SD) provenant de la région El Mosrane (40 Km au Nord de Djelfa)

A. La masse volumique :

A.1. La masse volumique apparente : le volume de récipient $v = 188.55\text{ml}$

Tableau 3.1: Essai de la masse volumique apparente des sables

	La masse de récipient [g]	La masse de récipient+ matière [g]	La masse de matière [g]	La masse volumique [g/ml]	La masse volumique [g/ml]
Sable de carrière	46.9	347.6	300.7	1.59	1.50
	46.9	327.6	280.7	1.48	
	46.9	313.9	267	1.42	
Sable de dune	46.9	290.9	244	1.29	1.25
	46.9	277.6	230.7	1.22	
	46.9	281.6	234.7	1.24	
Sable de oued	46.9	355.8	308.9	1.63	1.59
	46.9	343.7	296.8	1.54	
	46.9	348.4	301.5	1.60	

A.2. La masse volumique absolue :

Tableau 3.2: Essai de la masse volumique absolue des sables

	La masse de matière [g]	Le Volume V_1 [ml]	Le volume V_2 [ml]	La masse volumique Mv_a [g/ml]	La masse volumique Mv_a [g/ml]
Sable concassé	200	1000	1080	2.5	2.5
	200	1000	1080	2.5	
	200	1000	1080	2.5	
Sable de dune	200	1000	1075	2.67	2.67
	200	1000	1075	2.67	
	200	1000	1075	2.67	
Sable de oued	200	1000	1080	2.5	2.5
	200	1000	1080	2.5	
	200	1000	1080	2.5	

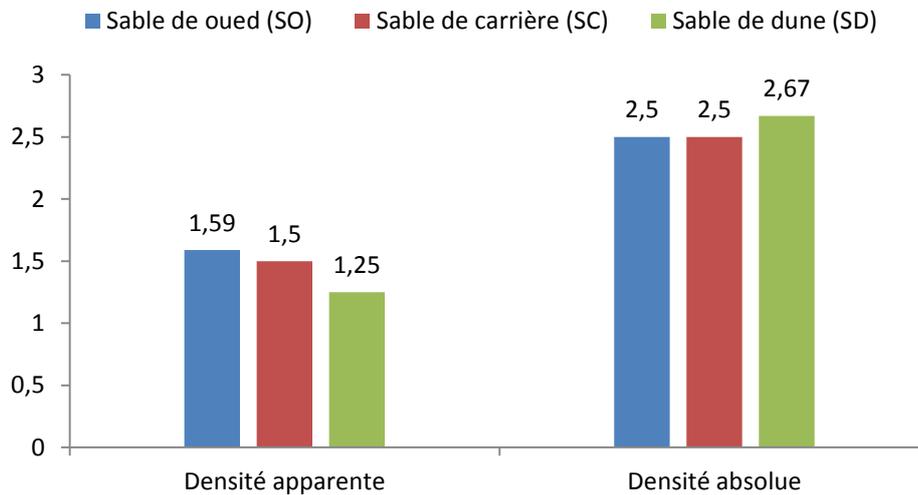


Figure 3.1: Comparaison de la masse volumique apparente et la masse volumique absolue entre les différents types de sables

D'après les tableaux 3.1 et 3.2 et la figure 3.1 en peut tirer les remarques suivantes:

1. Toutes les valeurs des masses volumiques sont acceptables
2. En ce qui concerne la masse volumique apparente (la densité apparente):

Les deux sables oued et carrière ayant une densité apparente proche l'un de l'autre (1.59 et 1.50 respectivement). La petite différence (environ de 6%) est attribuée à la forme des grains de chaque sable, la forme des grains du sable de oued est arrondie avec présence de plusieurs tailles ce qui crée un minimum de vide entre eux, d'un côté, de l'autre côté la forme angulaire de sable carrière augmente l'espace entre ces grains et par effet un abaisse de le valeur de densité.

D'autre part, le sable de dune présente une valeur de 1.25 mois que les autres (diminution de 21% par rapport au sable oued et 17% par rapport au sable carrière), cette diminution est due à la forme des grains de ce dernier, rappelons que tous les grains de sable de dune ayant une forme sphérique uniforme ce qui crée un plus de vide entre les particules et par conséquent en aura une abaisse de la masse volumique apparente.

3. En ce qui concerne la masse volumique absolue (La densité absolue):

La densité absolue de sable de oued et sable de carrière sont identiques (2.50 de chacun) par contre le sable de dune présente une valeur un peu élever par rapport aux autres (d'ordre de 2.67). la différence est d'ordre 6%, cette différence est due toujours à la forme de chaque types de sable.

B. L'analyse granulométrique :

B.1. Sable de dune: La masse initiale $m=1000g$

Tableau 3.3: résultats de l'analyse granulométrique de sable de dune

tamis	La masse de tamis	La masse de tamis+granulat refus	La masse de granulat refus	Le pourcentage de refus	Le pourcentage de refus cumulé	Le pourcentage de tamisat
5	758.5	759.6	1.1	0.11	0.11	99.89
2.5	694.2	695.7	1.5	0.15	0.26	99.74
1.25	652.2	840.1	187.9	18.86	19.12	80.88
0.63	626.4	1152.6	526.2	52.82	71.94	28.06
0.315	586.8	814.8	228	22.88	94.82	5.18
0.160	545.4	591.6	46.2	4.64	99.46	0.54
0.08	532.5	536	3.5	0.35	99.81	0.19
fond	550.8	552.7	1.9	0.19	100	0

B.2. Sable de carrière: La masse initiale $m= 1000 g$

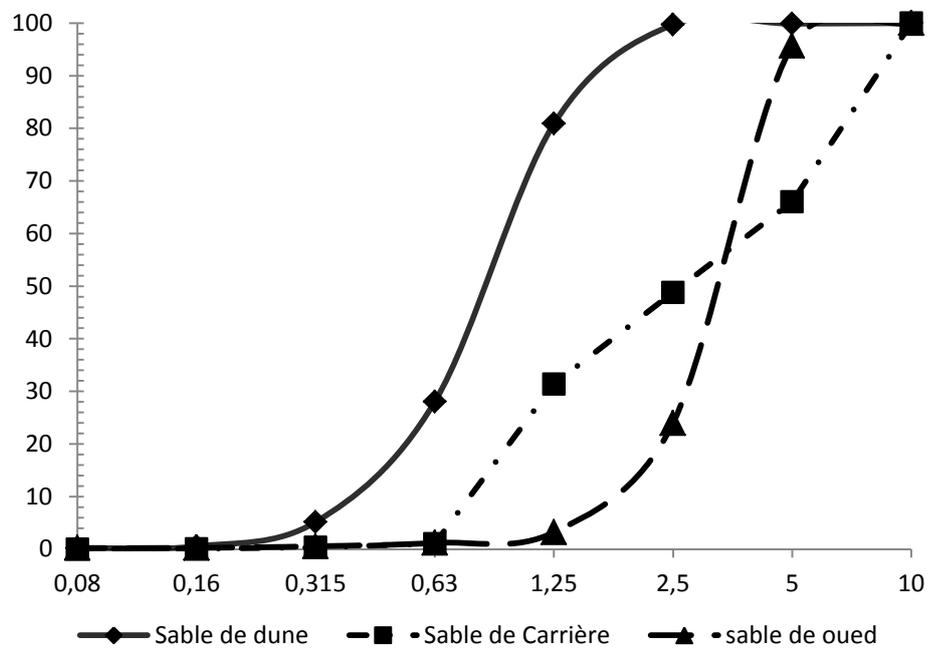
Tableau 3.4: résultats de l'analyse granulométrique de sable de carrière

tamis	La masse de tamis	La masse de tamis+granulat refus	La masse de granulat refus	Le pourcentage de refus	Le pourcentage de refus cumulé	Le pourcentage de tamisat
5	758.5	1097.1	338.6	33.94	33.94	66.06
2.5	694.2	866.4	172.2	17.26	51.2	48.8
1.25	652.4	825.8	173.6	17.4	68.6	31.4
0.63	626.4	929.3	302.9	30.36	98.96	1.04
0.315	586.8	593.7	6.9	0.69	99.65	0.35
0.160	545.4	548.0	2.6	0.26	99.91	0.09
0.08	532.5	533.1	0.6	0.06	99.97	0.03
fond	550.8	550.9	0.1	0.01	99.98	0.02

B.3. sable de oued : La masse initiale $m=1000g$ **Tableau 3.5:** résultats de l'analyse granulométrique de sable de Oued

tamis	La masse de tamis	La masse de tamis+granulat refus	La masse de granulat refus	Le pourcentage de refus	Le pourcentage de refus cumulé	Le pourcentage de tamist
5	758.5	801.5	43	4.3	4.3	95.7
2.5	694.2	1444.3	717.1	71.71	76.01	23.99
1.25	652.2	859.9	207.7	20.77	96.78	3.22
0.63	626.4	646.6	20.2	2.02	98.8	1.2
0.315	586.8	593.3	6.5	0.65	99.45	0.55
0.16	545.4	548.4	3	0.3	99.75	0.25
0.08	532.5	532.8	0.3	0.03	99.78	0.22
fond	550.2	550.9	0.7	0.07	99.85	0.15

Les valeurs données sur les différents tableaux ci-dessus nous permettent de tracer les courbes granulométriques pour chaque type de sables, voir figure 3.2

**Figure 3.2:** Courbes granulométriques de différents types de sables

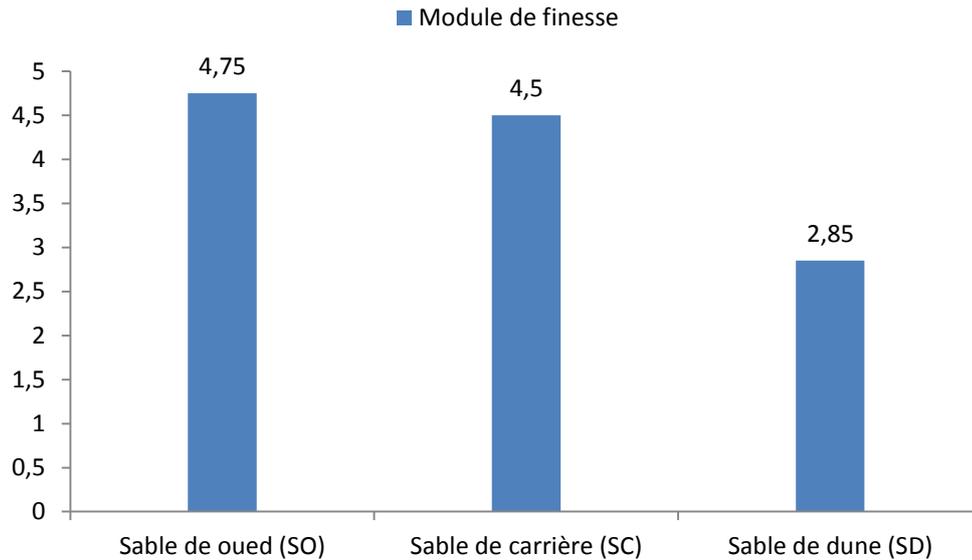


Figure 3.3: Comparaison du module de finesse entre les différents types des sables

Les tableaux 3.3, 3.4 & 3.5 et les figures 3.2 & 3.3, illustrent la distribution granulométrique et la finesse de trois sables.

D'après les tableaux et les figures précédentes on constate les suivantes :

- Les courbes granulométriques de tous les sables sont continues.
- Le sable de dune est un sable un peu grossier de module de finesse égale à 2.85, donc est un sable admissible pour la fabrication de béton
- Par contre le sable de carrière et de oued sont des sables grossiers avec des modules de finesse de 4.5 et 4.75 respectivement, donc l'utilisation de ces deux sables conduit à une correction de finesse et/ou l'utilisation des fines (ci comme notre cas d'étude).

C. Equivalant de sable :

C.1.sable de dune :

Tableau 3.6: résultats de l'essai équivalent de sable du sable de dune

N° de l'essai	h ₁	h ₂	h ₃	ES _v %	ES _p %
1	12.9	9.4	7.8	72.87	60.45
2	12.8	8.9	8.5	69.53	66.40
3	12.4	8.7	8.2	70.16	66.13
			Moyen	70.85	64.33

C.2.sable de carrière

Tableau 3.7: résultats de l'essai équivalent de sable du sable de carrière

N° de l'essai	h ₁	h ₂	h ₃	ES _v %	ES _p %
1	7.2	5	4.7	69.44	65.27
2	7.2	4.8	4.8	66.67	66.66
3	7.2	4.9	4.7	68.05	65.27
Moyen				68.05	65.73

C.3.sable de oued :

Tableau 3.8: résultats de l'essai équivalent de sable du sable de Oued

N° de l'essai	h1	h2	h3	Esv %	Esp %
1	10.9	8.1	8.0	74.31	73.39
2	10.8	7.9	7.9	73.15	73.15
3	10.8	8.0	7.9	74.07	73.15
Moyen				73.84	73.23

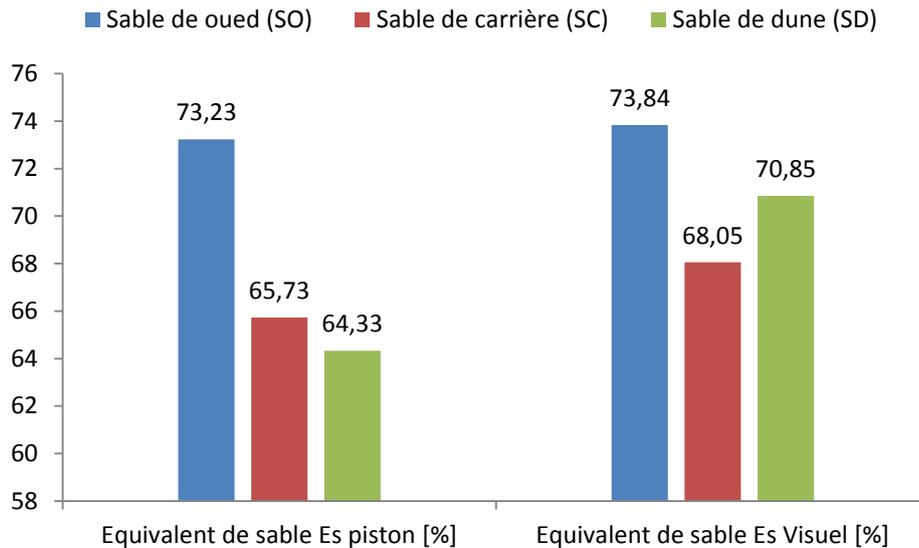


Figure 3.4: Comparaison de l'équivalent de sable entre les différents types des sables

Les tableaux 3.6 à 3.8 montrent les résultats de l'essai équivalent de sable, et la figure 3.4 représente la comparaison entre les différents résultats de cet essai.

Nous voyons à travers les résultats que tous les types de sables ont une propriété adéquate située dans l'intervalle [65-75%] (Es visuel), les sables sont des sables légèrement argileux admissible pour des bétons de qualité courante.

Cependant, la mesure de propreté par piston indique que les deux sables de carrière et de dune reste de même qualité si en faite la mesure visuel, par contre le sable de oued donne une propreté élevée situé dans l'intervalle [70-80%] donc c'est un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses; convenant parfaitement pour des bétons de qualité.

- **Résumé des résultats**

Le tableau 3.9 ci-après regroupe tous les résultats précédents:

Tableau 3.9: résumé des résultats

Caractéristiques physique	Sable de oued (SO)	Sable de carrière (SC)	Sable de dune (SD)
Densité apparente	1.59	1.50	1.25
Densité absolue	2.5	2.5	2.67
Module de finesse	4.75	4.50	2.85
Equivalent de sable (%) piston	73.23	65.73	64.33
Equivalent de sable (%) Visuel	73.84	68.05	70.85

3.2.2. Les graviers:

Nous avons utilisé des graviers concassés de type calcaire, extraite de carrière Oued Sadar (sud de Djelfa), leurs classes granulaires sont 3/8 et 8/15.

A. La masse volumique :

A.1. La masse volumique apparente : le volume de récipient $v = 188.55\text{ml}$

Tableau 3.10: Essai de la masse volumique apparente des graviers

	La masse de récipient [g]	La masse de récipient+ matière [g]	La masse de matière [g]	La masse volumique [g/ml]	La masse volumique [g/ml]
Gravier 3/8	46.9	310.9	264	1.40	1.33
	46.9	301	254.1	1.35	
	46.9	300.3	253.4	1.25	
Gravier 8/15	46.9	308.4	261.5	1.39	1.38
	46.9	305	258.1	1.37	
	46.9	309.8	262.9	1.39	

A.2. La masse volumique absolue :

Tableau 3.11: Essai de la masse volumique absolue des graviers

	La masse de matière [g]	Le Volume V_1 [ml]	Le volume V_2 [ml]	La masse volumique Mv_a [g/ml]	La masse volumique Mv_a [g/ml]
Gravier 3/8	200	1000	1080	2.5	2.52
	200	1000	1080	2.5	
	200	1000	1080	2.5	
Gravier 8/15	200	1000	1080	2.5	2.5
	200	1000	1080	2.5	
	200	1000	1080	2.5	

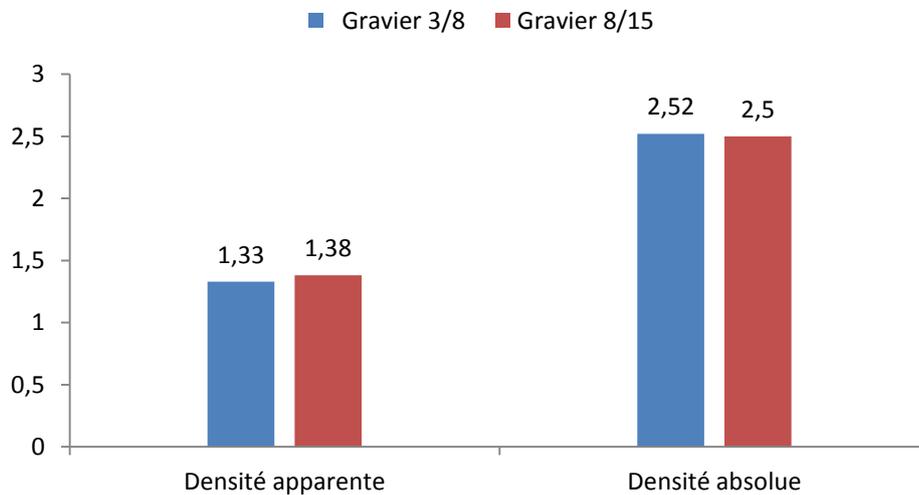


Figure 3.5: Comparaison de la masse volumique apparente et la masse volumique absolue entre les différents types de graviers

Les tableaux 3.10 & 3.11 représentent les résultats de mesure de la densité apparente et absolue pour les deux graviers 3/8 et 8/15. Ainsi que la figure 3.5 qui illustre la comparaison entre les deux graviers de point de vue densités.

D'après les tableaux et la figure on observe que Les granulats étudiés ont donné des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620.

B. L'analyse granulométrique :**B.1. gravier 3/8 :** La masse initiale $m=2000g$ **Tableau 3.12:** résultats de l'analyse granulométrique de gravier 3/8

tamis	La masse de tamis	La masse de tamis+granulat refus	La masse de granulat refus	Le pourcentage de refus	Le pourcentage de refus cumulé	Le pourcentage de tamisat
8	777.4	1134.6	357.2	18.35	18.35	81.65
6.3	833.7	1618.3	784.6	40.30	58.65	41.35
5	757.5	1246.8	489	25.12	83.77	16.23
4	769.5	919.8	150.3	7.72	91.49	8.51
3.15	738.1	813.5	75.4	3.87	95.35	4.65
fond	550.8	641.2	90.4	4.64	100	0

B.2. gravier 8/15 : La masse initiale $m=3500g$ **Tableau 3.13:** résultats de l'analyse granulométrique de gravier 8/15

tamis	La masse de tamis	La masse de tamis+granulat refus	La masse de granulat refus	Le pourcentage de refus	Le pourcentage de refus cumulé	Le pourcentage de tamisat
16	816.2	896.7	80.5	2.36	2.36	97.64
12.5	783.9	1526.4	742.5	21.75	24.11	75.89
10	848.2	1974.2	1126	32.98	57.09	42.91
8	777.5	1842.1	1064.6	31.19	88.28	11.72
fond	550.8	951	400.2	11.72	100	0

Les valeurs données sur les différents tableaux ci-dessus nous permettent de tracer les courbes granulométriques pour chaque type de graviers, voir figure 3.6.

Les deux classe granulaires telles que 3/8 et 8/15, montre que les graviers sont à granulométrie continue.

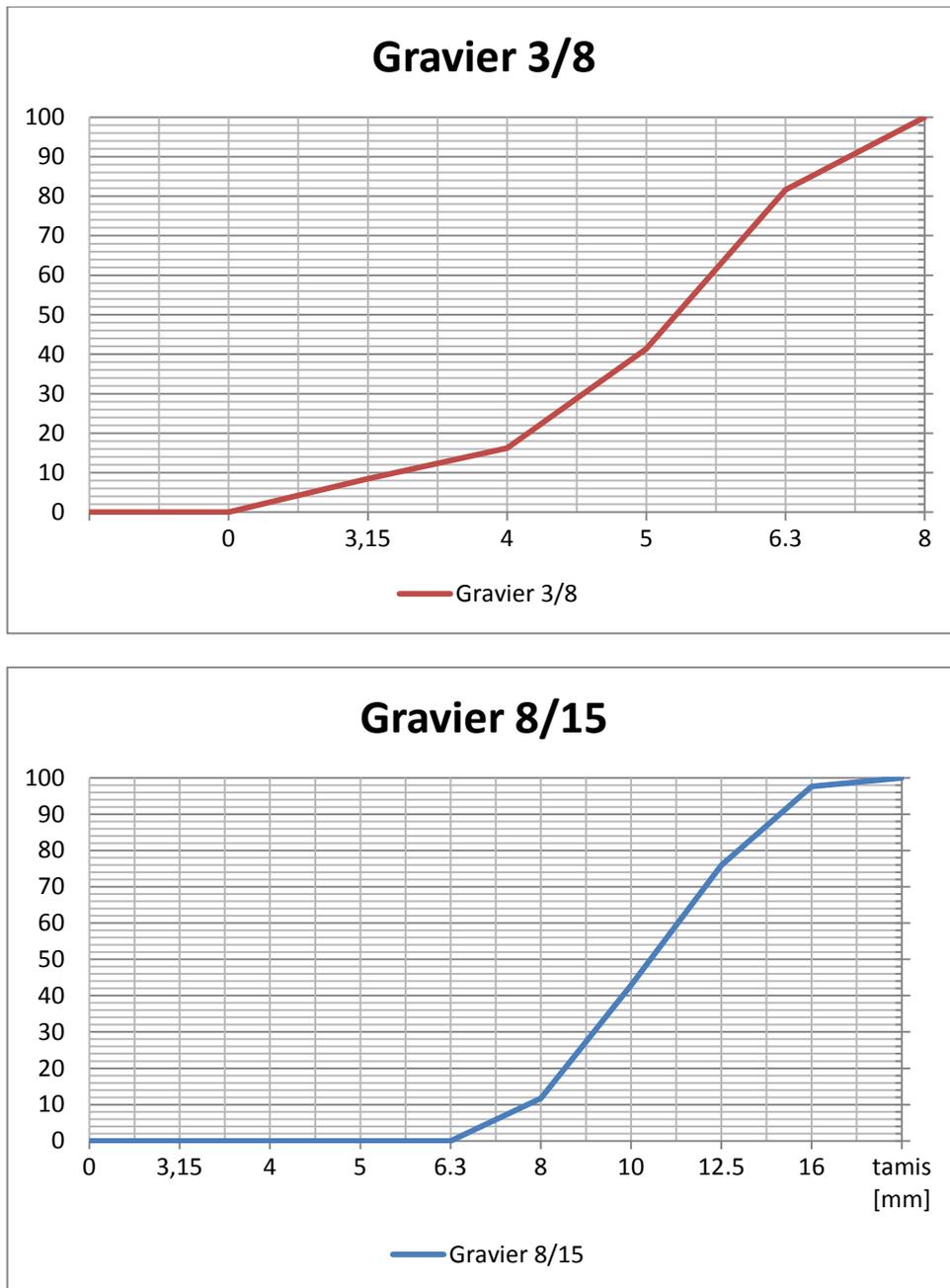


Figure 3.6: Courbes granulométriques de différents types de graviers

C. coefficient d'absorption:

L'essai d'absorption consisté à déterminer le taux d'absorption d'eau des granulats secs durant 24 heures; Le tableau 3.14 ci-dessous illustre les résultats obtenus.

Tableau 3.14: résultats de l'essai d'absorption

	Coefficient d'absorption [%]
Gravier 3/8	0.48
Gravier 8/15	0.48

Les résultats sur le tableau montre que les deux classe granulaires ont une faible absorption d'eau. ce qui traduit une faible influence sur la quantité d'eau de gâchage.

D. Essai de dureté des graviers (coefficient los Angeles LA):

Cet essai consiste à quantifier la résistance des graviers aux chocs, le tableau 3.15 et la figure 3.7 regroupent les résultats trouvés de cet essai.

Tableau 3.15: résultats de l'essai de dureté Los Angeles

Type de gravier	La masse initiale	La masse de refus	Coefficient LA
Gravier 3/8	M=5000	m=1936.2	LA=38.72
Gravier 8/15	M=5000	m=1512.4	LA=30.25

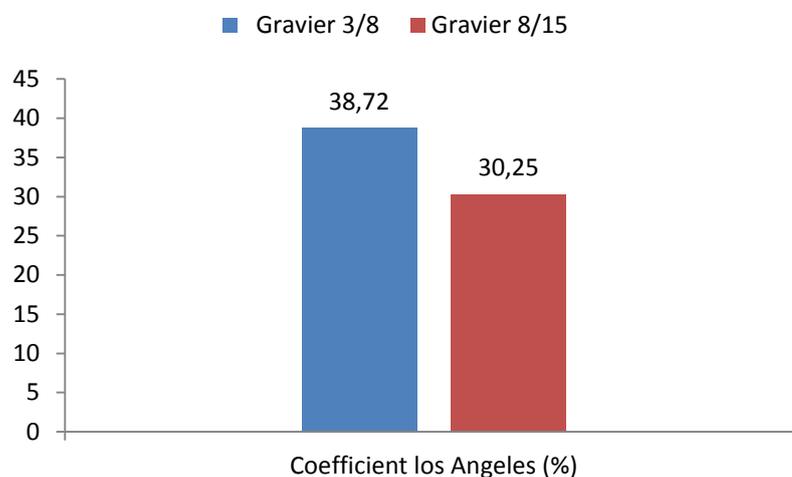


Figure 3.7: comparaison de coefficient de dureté entre les différents types de graviers

D'après les résultats précédents on constate que les deux fractions granulaires présente une bonne résistance aux chocs plus de 30%, ce qui nous permet l'utilisation de ces matériaux dans la fabrication de béton de bon comportement mécanique.

- **Résumé des résultats**

Tableau 3.16: résumé des résultats

Caractéristique physique	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Densité apparente	1.33	1.38
Densité absolue	2.52	2.50
Degré d'absorption(%)	0.48	0.48
Coefficient los Angeles (%)	38.72	30.25

3.2.3. Ciment :

Pour cette étude nous avons utilisé un ciment portland CPJ-CEM II/A 42,5 provenant de la cimenterie LAFARGE à M'sila. La composition chimique de ciment est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 3.17. Composition chimique et minéralogique du ciment (%)

ELEMENT	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ 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

Tableau 3.18. Propriétés physico – mécaniques du ciment .

Surface spécifique Blaine (cm²/g)	3917
Consistance (%)	27.48
Début de prise (mn)	140
Fin de prise (mn)	203
MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE (Kg/m³)	3100
MASSE VOLUMIQUE APPARENTE(Kg/m³)	1130

3.2.4. Superplastifiant

Nous avons utilisé superplastifiant liquide sous le nom MEDAFLOW 30 .Sa densité absolue est 1.07.

3.2.5. EAU

En utilise l'eau de robinet de laboratoire de matériaux de génie civil à l'université de Djelfa.

3.3. Conclusion :

A la fin de ce chapitre en peu dire que les sables qu'on vas utiliser ont présenté des caractéristiques proches; sauf la finesse qui est le paramètre le plus intéressant dans la confection de béton autoplaçant, nous nous attendront que cette différence de finesse vas influencer sur le comportement rhéologique des bétons autoplaçant et par conséquent sur le comportement à l'état durci.

chapitre IV:

analyse des résultats

IV.1. Introduction :

Ce chapitre traite la durabilité des bétons autoplaçant à base de divers types de sable (sable d'oued SO, sable de carrière SC et sable de dune SD).

Pour cela nous avons mesuré la perte en masse à 3, 7,14 et 28 jours sur des éprouvettes cubiques 10×10×10 cm. Les éprouvettes sont immergées totalement dans deux solutions HCl concentré à 5% et NaCl concentré à 5%. La section suivante explique le détaille expérimentale.

IV.2. Programme expérimental :

IV.2.1. Première étape : préparation des éprouvettes

IV.2.1.1. Compositions de bétons préparées:

Les formules du béton sont calculés en utilisant la méthode des volumes absolus, cette méthode est basée sur le volume de pâte et le volume des agrégats, mélangé sec pour un (01) mètre cube de béton.

$$1m^3 = 1000 \text{ litres} = V_{p\grave{a}te} + V_{Granulats}$$

$$V_{p\grave{a}te} = V_{ciment} + V_{Fines} + V_{Adjuvant} + V_{Eau}$$

$$V_{Granulats} = V_{G3/8} + V_{G8/15} + V_{Sables}$$

Les quantités suivantes sont constantes:

- E/L= 0.45 (ciment=400 Kg, fines=90Kg et eau=220.5L)
- G/S =1 (50% graviers + 50% sables)
- Une quantité d'adjuvant superplastifiant égale à 0.8% de ciment.

Le tableau IV.1 suivant représente la composition par mètre cube de béton:

Tableau IV.1: composition préparée dans 1 m³

	Volumes (L)	Masses (kg)
ciment	129.03	400
Les fines	33.96	90
Eau	220.5	220.5 L
Adjuvant	1.032	3.2 ml
Gravier (3/8)	153.87	407.76
Gravier (8/15)	153.87	407.75
Sables	307.74	815.51

L'idée de cette étude est basée sur la substitution du sable d'oued SO par l'un des deux sables: sable de carrière SC ou sable de dune SD par différents pourcentages 30,50 ,70 et 100% ; le tableau IV.2 et IV.3 représentent respectivement les combinaisons et les quantités de sables de chaque composition.

Tableau IV.2: Combinaisons de sables

	100SO	70SO-30SC	50SO-50SC	30SO-70SC	100SC	70SC-30SD	50SC-50SD	30SC-70SD	100SD	70SD-30SO	50SD-50SO	30SD-70SO
SO (%)	100	70	50	30	-	-	-	-	0	30	50	70
SC (%)	0	30	50	70	100	70	50	30	-	-	-	-
SD (%)	-	-	-	-	0	30	50	70	100	70	50	30

Tableau IV.3: Quantité des sables pour chaque combinaison

	SO (kg)	SC (kg)	SD (kg)
100SO	815.51	0	-
70SO-30SC	570.86	244.65	-
50SO-50SC	407.76	407.76	-
30SO-70SC	244.65	570.86	-
100SC	-	815.51	0
70SC-30SD	-	570.86	244.65
50SC-50SD	-	407.76	407.76
30SC-70SD	-	244.65	570.86
100SD	0	-	815.51
70SD-30SO	244.65	-	570.86
50SD-50SO	407.76	-	407.76
30SD-70SO	570.86	-	244.65

IV.2.1.2. confection des éprouvettes

Après le passage du contrôle des BAP vis-à-vis l'étalement, boîte L et la stabilité au tamis six (06) éprouvettes cubiques 10×10×10 cm ont été préparées pour chaque composition.

Afin d'étudier la durabilité des BAP les éprouvettes ont été décoffrées après 24H de confection les éprouvettes sont immergé dans l'eau durant 28 jours avant de passer à l'essai de l'attaque par solutions.

IV.2.2. Deuxième étape : Evaluation de durabilité vis-à-vis l'attaque chimique

Après 28 jours de cure sous l'eau, les échantillons sont immergés séparément dans 2 types de solutions chimiques: 5 % acide chlorhydrique (HCl) et 5 % NaCl.

La variation du poids des éprouvettes est examinée après 3, 7, 14, et 28 jours, la procédure de l'essai est menée selon la norme ASTM C 267-96. Le jour de l'examen, les parties attaquées du béton sont nettoyées avec de l'eau et un chiffon, puis on laisse les échantillons sécher pendant une demi-heure du temps avant la pesée.

Les résultats obtenus sont exprimés sous la forme d'histogrammes et en deux séries :

1^{ière} série comporte:

- BAP préparé par 100% sable d'oued SO
- BAP préparé par 100% sable concassé SC.
- BAP préparé par 100% sable de dune SD
- BAP préparé par 50% sable d'oued SO et 50% sable concassé SC.
- BAP préparé par 50% sable d'oued SO et 50% sable de dune SD.
- BAP préparé par 50% sable concassé SC et 50% sable de dune SD.

2^{ième} série comporte:

- BAP préparé par 30% SD + 70% SO
- BAP préparé 30% SO + 70% SC
- BAP préparé 70% SC+ 30% SD
- BAP préparé 30% SC+ 70% SD
- BAP préparé 70% SD+ 30% SO
- BAP préparé 70% SO + 30% SC

IV.3. Résultats et discussion :

IV.3.1. Effet de l'acide HCl :

Les résultats de la perte en masse en % de deux séries sont montrés dans le tableau IV.4 suivant :

Tableau IV.4 : la perte en masse (%) d'éprouvettes d'une solution 5% HCl

		3 jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
1 ^{ère} série	100SO	3,77	5,16	11	14,13	16,11
	100SC	0,11	0,18	11	15,97	21,63
	100SD	4,65	6,06	12,6	14,46	15,9
	50SO-50SC	2,45	3,55	11,2	12,94	15,96
	50SC-50SD	2,42	3,51	7,6	10,81	12,02
	50SD-50SO	5,75	7,28	18,6	22,9	26,68
2 ^{ème} série	70SO-30SC	3,46	4,8	10,78	13,86	17,11
	30SO-70SC	1,68	4,14	5,4	13,66	15,1
	70SC-30SD	3,64	5,03	16	20,2	22,79
	30SC-70SD	4,05	5,47	11,2	15,46	16,76
	70SD-30SO	1,56	2,34	6,7	13,42	15,28
	30SD-70SO	0,7	1,12	2,3	4,41	6,66

Les résultats sur le tableau IV.4 nous a permet de tracer les figures de la variation de masse en fonction de type de sable selon chaque série.

IV.3.1.1. La 1^{ère} série :

Le tableau IV.4 et les figure IV.1 et IV.2 montrent la variation de la masse des éprouvettes de béton BAP de la 1^{ère} série immergés dans une solution 5% Hcl à chaque échéancier.

D'après les figures, on constate que la substitution totale de sable oued SO par sable concassé SC améliore la résistance à la attaque par Hcl à 3 et 7 jours d'ordre 97% et 96% respectivement mais à 14 et 21 jours la résistance de 100SC est presque la même avec témoin ; par contre à 28 jours on aura une abaisse de résistance d'ordre 34% contre 100SO.

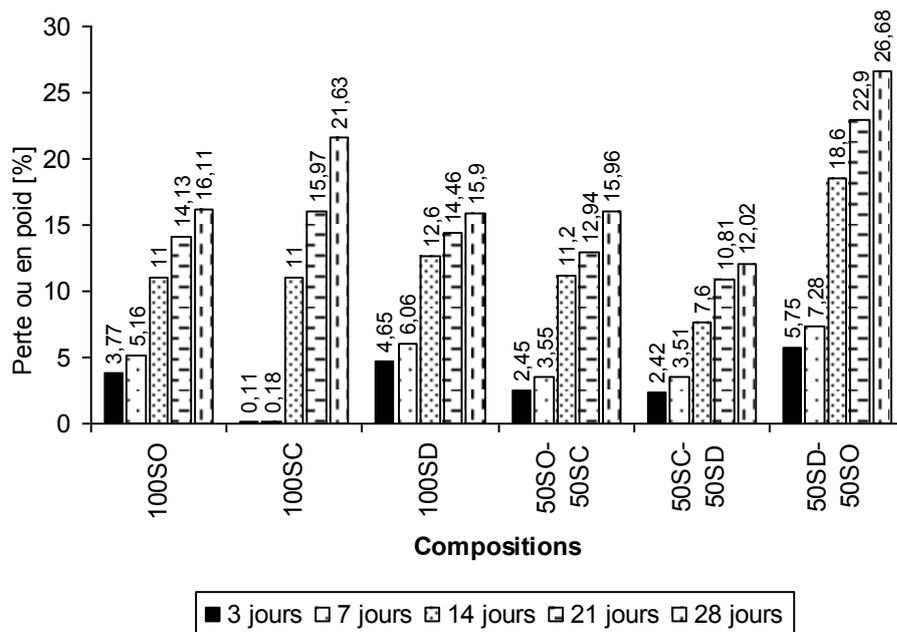


Figure IV.1 : Variation de la masse à 3, 7, 14 et 28 jours des éprouvettes immergés dans 5% HCl en fonction de sable (1^{ère} série)

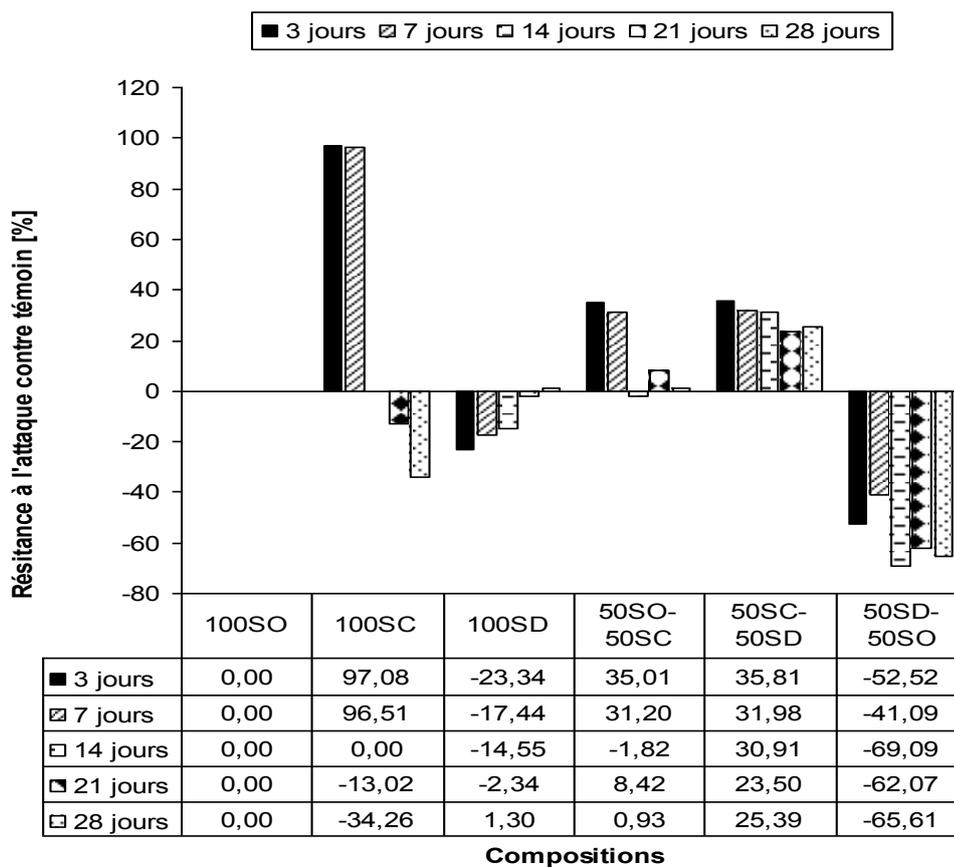


Figure IV.2 : Pourcentage de gain ou perte de la résistance à l'attaque par 5% HCl des différents BAP en comparaison au témoin 100SO (1^{ère} série)

La substitution totale de SO par SD diminue toujours la résistance vis-à-vis l'attaque par HCl quel que soit l'âge de béton (diminution de 2% à 23% contre témoin) ; sauf à 28 jours en aura une augmentation sensible de 1%. En dit que l'utilisation total de sable de dune influe négativement sur la compacité de béton ceci et due à la forme morphologique de SD qui est homométrique c'est-à-dire les grains ayant presque la même taille.

Le remplacement partiel de 50% SO par 50% SC améliore la résistance à l'attaque d'une manière considérable à 3 et 7 jours (35% à 3 jours et 31% à 7 jours), cette amélioration est diminué dans les autres jours (de 0.93% à 8%) sauf à 14 jours.

La combinaison entre SC et SD par moitié améliore la résistance à l'attaque de 23% à 36% contre la composition témoin 100SO en tous âges. Par contre la substitution de SO par 50% de SD influe d'une manière très grande sur la résistance (diminution de 41 à 69% contre 100SO).

IV.3.1.2. La 2^{ème} série :

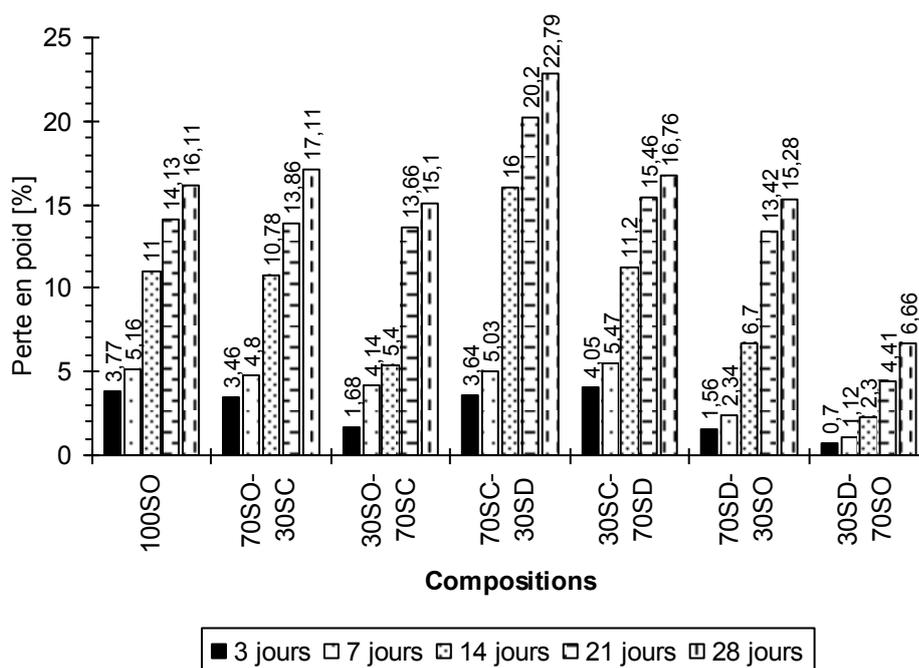


Figure IV.3 : Variation de la masse à 3, 7, 14 et 28 jours des éprouvettes immergés dans 5% HCl en fonction de sable (2^{ème} série)

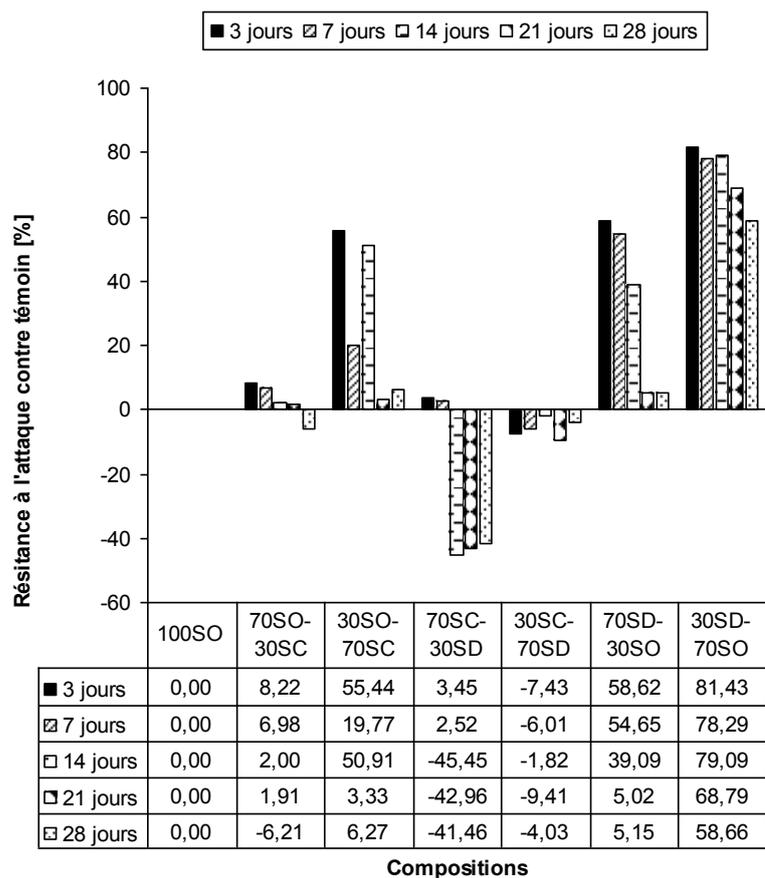


Figure IV.4 : Pourcentage de gain ou perte de la résistance à l'attaque par 5% HCl des différents BAP en comparaison au témoin 100SO (2^{ème} série)

Les figures IV.3 et IV.4 montrent l'effet de substitution partiel de sable SO par SC ou SD (ou SC par SD) sur la résistance à l'attaque par HCl en fonction de l'âge de la 2^{ème} série.

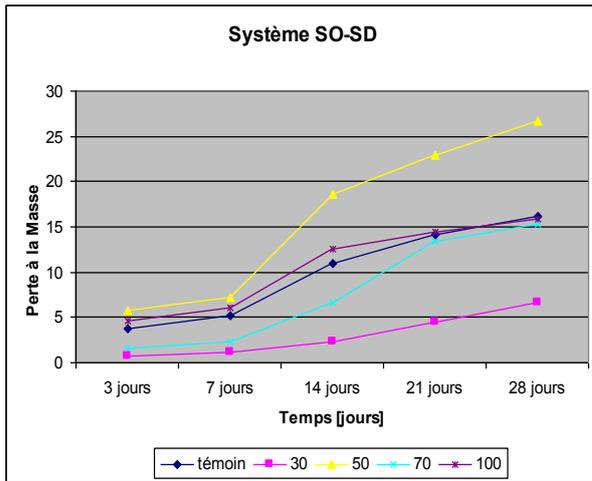
D'après les figures le remplacement de 30% SO par SC améliore sensiblement la résistance vis-à-vis l'attaque par acide HCl de 3 à 21 jours (augmentation de 2 à 8%) sauf à 28 jours la résistance à l'attaque est diminué d'ordre 6%. Néanmoins la combinaison de 70% SC et 30% SO augmente la résistance de l'attaque d'une manière très importante lors des premiers 14 jours 20 à 55% mais elle a diminué jusqu'à 3 à 6% de 21 à 28 jours.

L'utilisation de 30% SD avec 70% SO présente toujours une très bonne résistance vis-à-vis l'attaque par HCl dans tous âges contre témoin 100SO, cette amélioration passe de d'ordre 59% à 81% à 28 et 3 jours respectivement. Tandis que la substitution de 70% SO par SD améliore aussi la résistance lors des premiers jours (3 à 14 jours) d'une façon significative mais elle a diminué jusqu'à 5% à long terme.

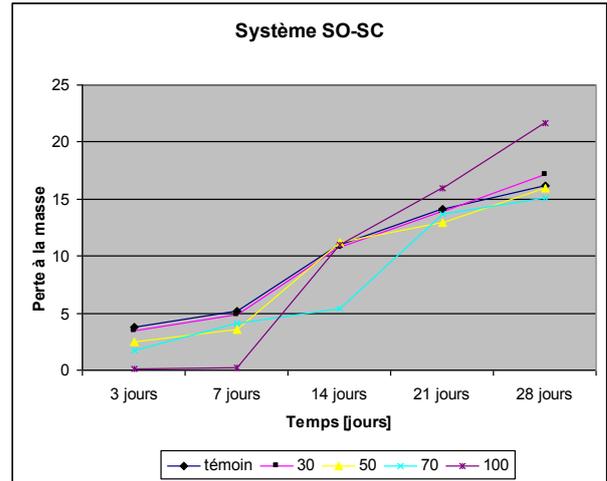
A la différence ce qu'on a dit précédemment, le remplacement partiel par 30% ou 70 % de SC par SD influe négativement sur la résistance à l'attaque de HCl.

IV.3.1.3. Comparaison de trois systèmes de mélange :

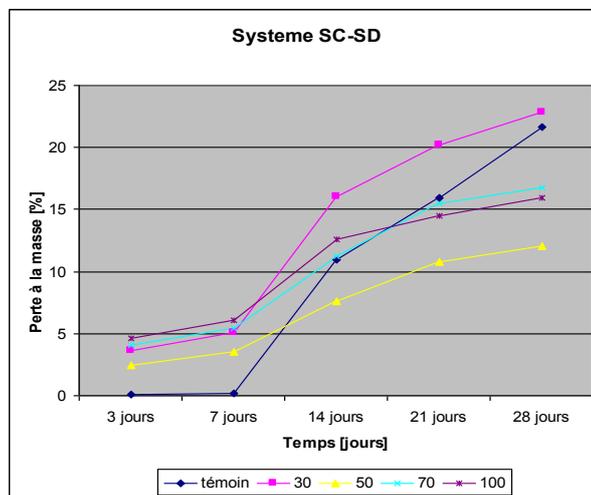
Les figures IV.5(a), IV.5(b) et IV.5(c) représentent la variation de la perte en masse dans 5% HCl de trois systèmes de mélange SO-SD, SO-SC et SC-SD en fonction de pourcentage de sable et en fonction du temps.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.5 : variation de la perte en masse de trois systèmes de mélange SO-SD, SO-SC et SC-SD en fonction de pourcentage de sable et en fonction du temps.

D'après les figures nous pouvons tirer les meilleurs compositions dans chaque système qui sont donné la bonne résistance vis-à-vis l'attaque par acide HCl en comparaison au témoin. Les meilleurs compositions sont :

- 70% sable d'oued SO et 30 % sable de dune SD dans le système SO-SD
- 50% sable concassé SC et 50 % sable de dune SD dans le système SC-SD
- 30% sable d'oued SO et 70% sable concassé SC dans le système SO-SC

La comparaison de ces trois compositions avec la composition témoin 100SO nous a permet de tracer les courbes suivantes Figure IV.6.

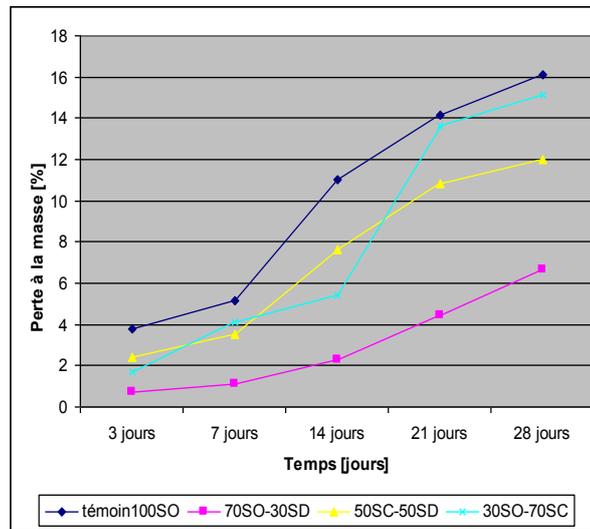


Figure IV.6: Comparaison des trois meilleures compositions avec la composition témoin 100SO.

D'après la figure IV.6 précédente on peut dire que la meilleure composition qui nous a donné la meilleure résistance vis-à-vis l'attaque par acide HCl est le mélange de 70% de sable d'oued SO et 30% de sable de dune SD.

IV.3.2. Effet de solution NaCl :

Les résultats de la perte en masse en % de deux séries sont montrés dans le tableau IV.5 suivant :

Tableau IV.5 : la perte en masse (%) d'éprouvettes d'une solution 5% NaCl

		3 jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
1 ^{ère} série	100SO	0,18	0,37	0,4	0,98	1,8
	100SC	0,085	0,17	0,32	0,35	1,05
	100SD	0,23	0,45	0,48	0,55	0,78
	50SO-50SC	0,13	0,27	0,9	1,11	1,26
	50SC-50SD	0,21	0,41	0,51	1,03	1,3
	50SD-50SO	0,18	0,36	0,36	0,79	1,11
2 ^{ème} série	70SO-30SC	0,14	0,26	0,73	1,14	1,67
	30SO-70SC	0,19	0,38	0,39	0,63	1,12
	70SC-30SD	0,22	0,43	0,49	0,79	1,02
	30SC-70SD	0,2	0,39	0,44	0,61	0,8
	70SD-30SO	0,2	0,39	0,38	1,17	1,46
	30SD-70SO	0,05	0,099	0,148	0,3	0,47

Les résultats sur le tableau IV.5 nous a permet de tracer les figures de la variation de masse en fonction de type de sable selon chaque série.

IV.3.2.1. LA 1^{ère} Série :

Le tableau IV.5 et les figure IV.7 et IV.8 montrent la variation de la masse des éprouvettes de béton BAP de la 1^{ère} série immergés dans une solution 5% NaCl à chaque échéancier.

D'après les figures, on constate que la substitution totale de sable oued SO par sable concassé SC améliore la résistance à la attaque par Hcl de 20 à 64% quel que soit l'âge. Par contre l'utilisation totale de sable de dune 100SD diminue la résistance à l'attaque dans 14 jours premiers (de 20 à 28%) et puis en aura gain de résistance dans 21 et 28 jours, cette différence peut être due à la mauvaise homogénéité de béton ou bien au mal mise œuvre des éprouvettes car on remarque que plus la solution pénètre dans le béton plus la résistance à la détérioration augmente, même constatation est remarquée pour 50SC-50SD et 50SC-50SO.

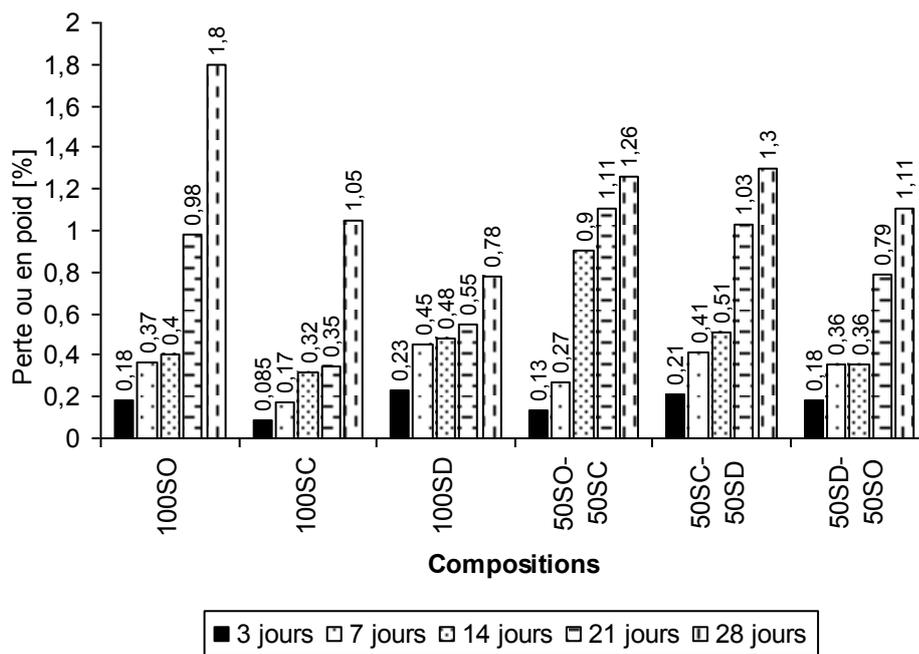


Figure IV.7 : Variation de la masse à 3, 7, 14 et 28 jours des éprouvettes immergés dans 5% NaCl en fonction de sable (1^{ère} série)

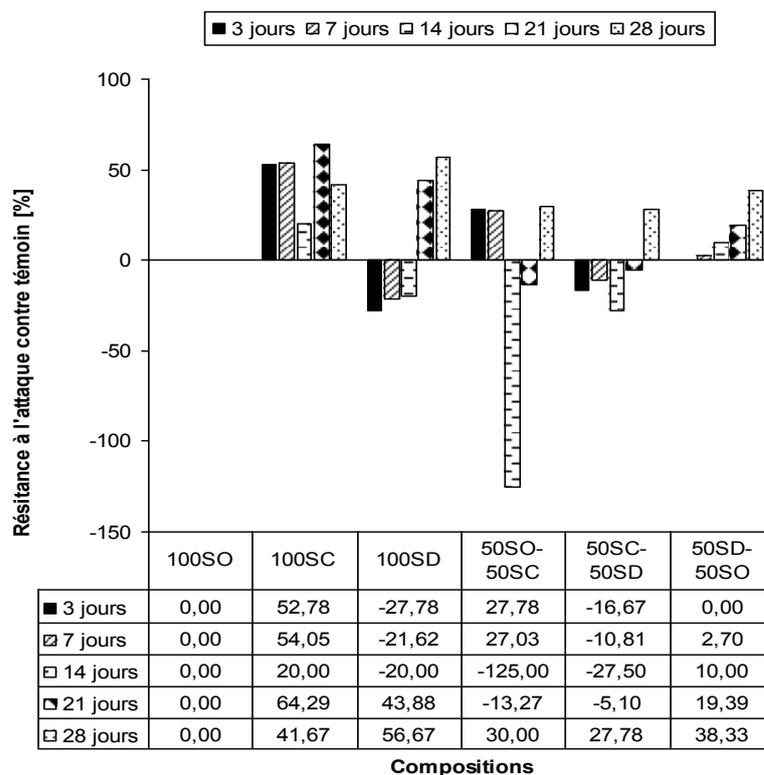


Figure IV.8 : Pourcentage de gain ou perte de la résistance à l'attaque par 5% NaCl des différents BAP en comparaison au témoin 100SO (1^{ère} série)

De plus le remplacement de 50% sable d'oued par sable de dune SD (composition 50SO-50SD), améliore la résistance vis-à-vis l'attaque par NaCl lors de 7^{ième} jours et qui augmente avec l'âge (environ 3% à 7 jours et 38% à 28 jours).

IV.3.2.2. La 2^{ième} série :

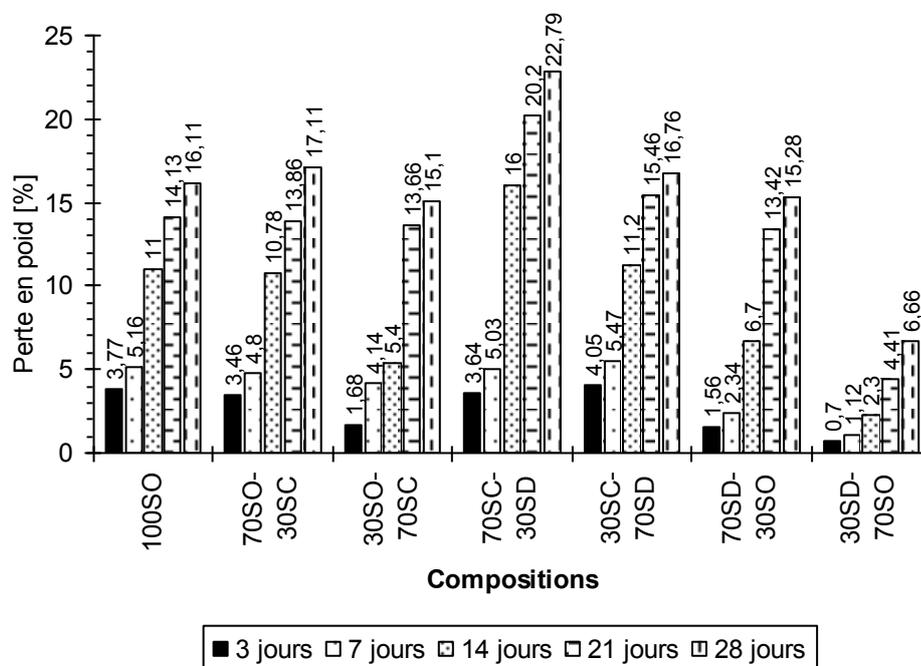


Figure IV.9 : Variation de la masse à 3, 7, 14 et 28 jours des éprouvettes immergées dans 5% NaCl en fonction de sable (2^{ème} série)

Les figures IV.9 et IV.10 montrent l'effet de substitution partiel de sable SO par SC ou SD (ou SC par SD) sur la résistance à l'attaque par NaCl en fonction de l'âge de la 2^{ème} série.

En remarque que la substitution partielle de SO par 30% de SC présente un bon comportement à 3, 7 et 28 jours vis-à-vis l'attaque par NaCl en comparaison au témoin (augmentation de résistance de 22%, 30% et 7% respectivement), mais à 14 jours on a une forte diminution environ 82% par rapport à 100SO et d'ordre 16% à 21 jours.

La substitution partielle de SO par 70% de SC ou de 30% de SD ou la combinaison entre SD et SC par 70% ou 30% présente toujours une réduction de la résistance à l'attaque par NaCl lors les premiers 14 jours ; ensuite la résistance augmente au-delà de 21 jours d'un taux variant entre 19% et 55% contre témoin, sauf la composition 70SD-30SD qui contient 70% de Sable de dune SD et 30% de sable d'oued SO qui indique une diminution de résistance à 21 jours environ 19% en comparaison au témoin.

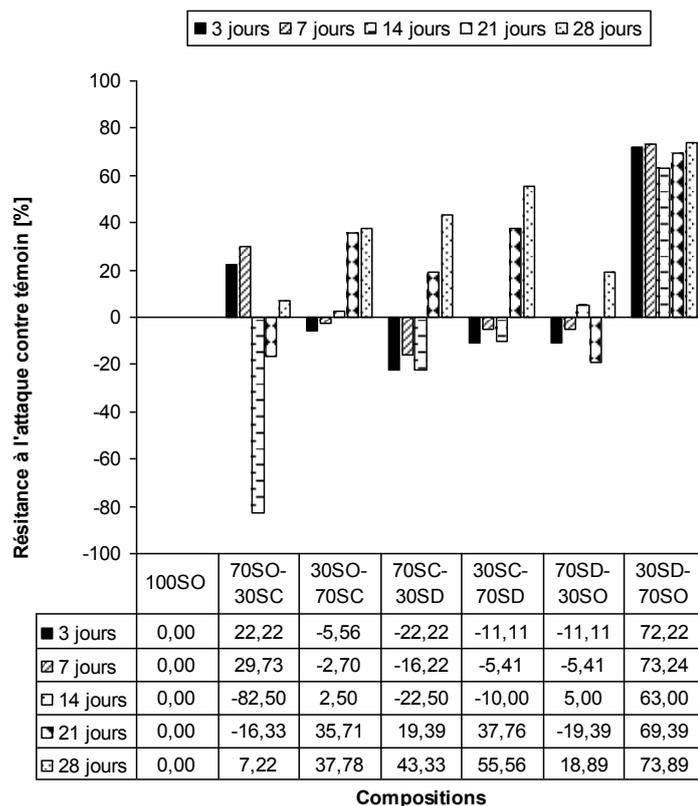


Figure IV.10 : Pourcentage de gain ou perte de la résistance à l'attaque par 5% NaCl des différents BAP en comparaison au témoin 100SO (2^{ème} série)

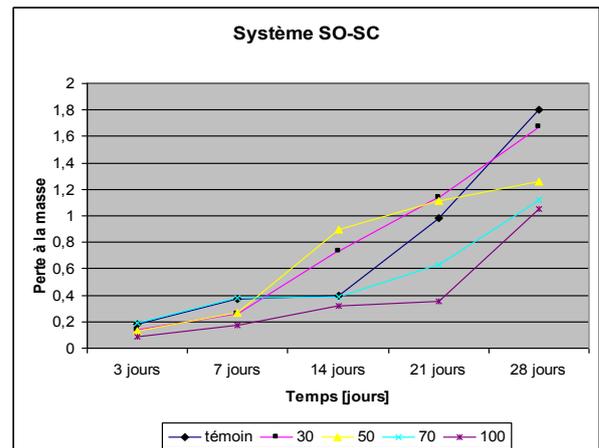
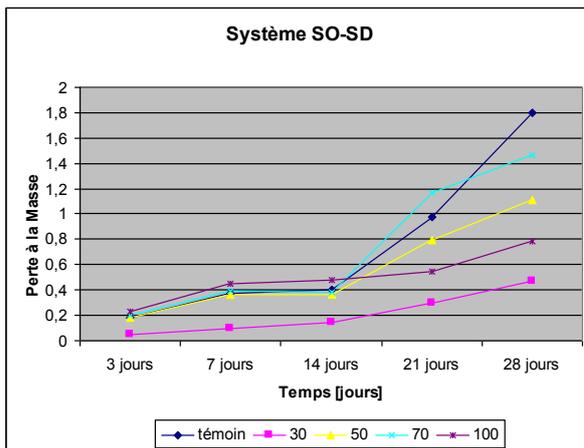
La résistance à l'attaque par NaCl est maximale dans la composition 30% sable de dune et 70% sable d'oued, c'est qu'indique que la compacité dans cette composition est maximale, ce comportement est pareil à celle de l'attaque par acide HCl.

IV.3.2.3. Comparaison de trois systèmes de mélange :

Les figures IV.11(a), IV.11(b) et IV.11(c) représentent la variation de la perte en masse dans 5% NaCl de trois systèmes de mélange SO-SD, SO-SC et SC-SD en fonction de pourcentage de sable et en fonction du temps.

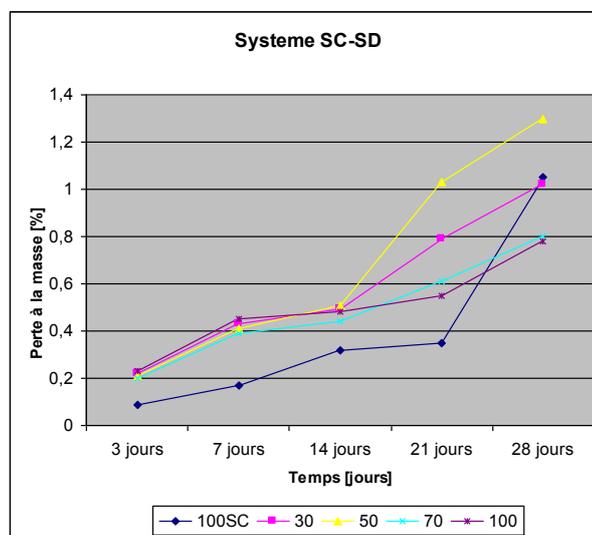
D'après la figure nous pouvons tirer les meilleurs compositions dans chaque système qui sont donné la bonne résistance vis-à-vis l'attaque de NaCl en comparaison au témoin, les meilleur compositions sont :

- 70% sable d'oued SO et 30 % sable de dune SD dans le système SO-SD
- 100% sable concassé dans le système SC-SD
- 100% sable d'oued SO et 70% sable concassé SC dans le système SO-SC



(a)

(b)



(c)

Figure IV.11 : variation de la perte en masse de trois systèmes de mélange SO-SD, SO-SC et SC-SD en fonction de pourcentage de sable et en fonction du temps.

La comparaison de ces trois compositions avec la composition témoin 100SO nous a permis de tracer les courbes suivantes Figure IV.12.

D'après la figure IV.12 on peut dire que la meilleure composition qui nous donne la meilleure résistance vis-à-vis l'attaque par NaCl est le mélange de 70% de sable d'oued SO et 30% de sable de dune SD.

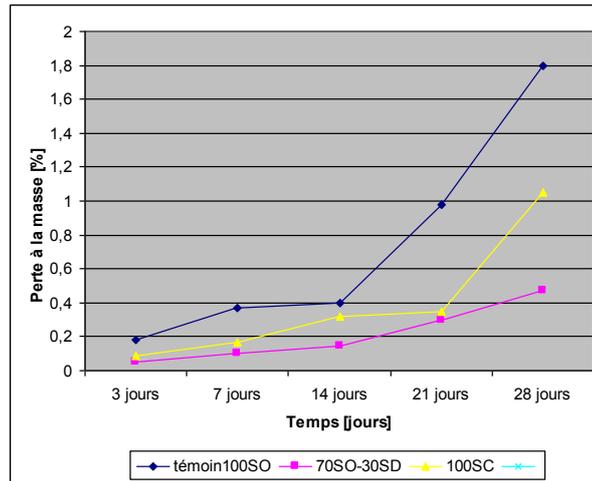


Figure IV.12: Comparaison des trois meilleures compositions avec la composition témoin 100SO.

IV.3.2. Comparaison entre les deux milieux d'attaque :

La lecture sur les résultats de deux milieux d'attaque HCl et NaCl nous permettrons à dire que l'acide HCl affecte rapidement le béton au contraire de sel NaCl, cette variance est en relation avec le degré d'acidité PH et à la dissolution de l'acide dans l'eau. Aussi l'effet de sel NaCl apparaîtra qu'après 28 jours ou plus.

IV.4. Conclusion :

Suite aux résultats de ce chapitre, nous pouvons tirer les points suivants :

- La substitution totale de sable oued SO par sable concassé SC améliore la résistance à la attaque par HCl à 3 et 7 jours d'ordre 97% et 96% respectivement mais à 14 et 21 jours la résistance de 100SC est presque la même avec témoin.
- La substitution totale de SO par SD diminue toujours la résistance vis-à-vis l'attaque par HCl quel que soit l'âge de béton (diminution de 2% à 23% contre témoin).
- Le remplacement partiel de 50% SO par SC ou la combinaison entre SC et SD par moitié, améliore la résistance à l'attaque d'une manière considérable.
- L'utilisation de 30% SD avec 70% SO présente toujours une très bonne résistance vis-à-vis l'attaque par HCl dans tous âges contre témoin 100SO.
- la combinaison de 70% SC et 30% SO augmente la résistance de l'attaque d'une manière très importante lors des premiers 14 jours.
- le remplacement partiel par 30% ou 70 % de SC par SD influe négativement sur la résistance à l'attaque de HCl
- la substitution totale de sable oued SO par sable concassé SC améliore la résistance à l'attaque par HCl quel que soit l'âge. Par contre l'utilisation totale de sable de dune 100SD diminue la résistance à l'attaque dans 14 jours premiers.
- la substitution partielle de SO par 30% de SC présente un bon comportement à 3, 7 et 28 jours vis-à-vis l'attaque par NaCl.
- La résistance à l'attaque par NaCl est maximale dans la composition 30% sable de dune et 70% sable d'oued, c'est qu'indique que la compacité dans cette composition est maximale.
- la meilleure composition qui nous donne la meilleure résistance vis-à-vis l'attaque par HCl ou NaCl est le mélange de 70% de sable d'oued SO et 30% de sable de dune SD.
- L'acide HCl affecte rapidement le béton au contraire de sel NaCl, cette variance est en relation avec le degré d'acidité PH et à la dissolution de l'acide dans l'eau

CONCLUSION GENERALE :

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence de l'utilisation de divers types de sables sur le comportement d'un BAP vis-à-vis les milieux agressifs. Les principaux résultats qu'on peut tirer de cette étude sont:

Suite aux résultats de ce chapitre, nous pouvons tirer les points suivants :

- L'acide HCl affecte rapidement le béton au contraire de sel NaCl, cette variance est en relation avec le degré d'acidité PH et à la dissolution de l'acide dans l'eau
- On peut améliorer la résistance à la attaque par Hcl par substitution totale de sable oued SO par sable concassé SC.
- La substitution totale de SO par SD influe négativement sur le comportement des BAP dans les milieux agressifs tel que l'acide HCl ou Sel NaCL.
- Le sable concassé SC ou SD améliore la résistance à l'attaque d'une manière considérable par remplacement partiel de 50% SO.
- L'utilisation de 30% de SD avec 70% de SO augmente toujours la résistance vis-à-vis l'attaque par acides ou sels.
- le remplacement partiel par 30% ou 70 % de SC par SD influe négativement sur la résistance à l'attaque de HCl ou NaCl
- La résistance à l'attaque par HCl ou NaCl est maximale dans la composition 30% sable de dune et 70% sable d'oued, c'est qu'indique que la compacité dans cette composition est maximale.
- La meilleure composition qui nous donne la meilleure résistance vis-à-vis l'attaque par HCl ou NaCl est le mélange de 70% de sable d'oued SO et 30% de sable de dune SD.

Bibliographie

- [24] GUEMMADI Z., ESCADEILLAS G., TOUMI B., HOUARI H. ET CLASTRES P., « Influence des fillers calcaires sur les performances mécaniques des pâtes de ciments », 1er congrès international sur la technologie et la durabilité du béton CITEDUB 1, USTHB Alger, mai 2004
- [41] Merdia A., Talah A., Kharchi F. et Chaid R., “Contribution à l’étude de la corrosion des BHP de pouzzolane en milieu sulfaté”, Colloque International CMEDIMAT2005, Oran, Algérie, les 06 et 07 Décembre 2005.
- [42] Mather B., « Sulphate attack on hydraulic cement concrete », Fifth International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Spain, p12-23, 2000.
- [59] GUILLON.E., « Durabilité des matériaux cimentaires –modélisation de l’influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles», Thèse de doctorat, d’Ecole Normale Supérieure de Cachan, France 2004.
- [60] ADENOT F., BUIL M., «Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water», Cement and Concrete Research 22, 259-272, 1992.
- [61] KAMALI S., « Modélisation de la lixiviation de matériaux cimentaires, application à différents ciments dans différents environnements », Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2003.
- [62] NGUYEN V.H., NEDJAR B., COLINA H., TORRENTI J.M., «A separation of scales analysis for the modelling of calcium leaching in concrete», Computer methods in applied mechanics and engineering, 195, 7196-7210, 2006.
- [63] CARDE C., FRANÇOIS R., «Effect of ITZ leaching on durability of cement-based materials», Cement and Concrete Research 27, 971-978, 1997.
- [64] ROZIERE E., « Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle », Thèse de doctorat, l’Ecole Centrale de Nantes, 2007.
- [65] Kamali S., Gérard B., Moranville M., «Modelling the leaching kinetics of cement-based materials influence of materials and environment», Cement and Concrete Composites 25, 451-458, 2003.

- [66] BADOZ C., FRANCISCO P., ROUGEAU P., «A Performance Test to Estimate Durability of Concrete Products Exposed to Chemical Attacks», Proceedings of the Second International Congress of FIB, June 5 -8, 2006.
- [69] RAHMANI H., RAMZANIANPOUR A.A., «Effect of silica fume and natural pozzolanas on sulfuric acid resistance of dense concretes». Asian Journal of Civil Engineering (building and housing) VOL. 9, Nbr. 3, pp 303-319, 2008.
- [83] PAPADAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N., “Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete”, ACI materials journal, vol. 88, n° 2, p. 186-196, 1991.
- [84] PAPADAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N., “Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation”, ACI Materials Journal, V. 88, No. 4, July- August 1991
- [85] THIERY M., DANGLA P., VILLAIN G., PLATRET G., MASSIEU E., DRUON M., BAROGHEL-BOUNY V., « Modelisation de la carbonatation atmospherique des matériaux cimentaires », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 252-253, septembre-octobre-novembre-décembre, pp. 153-187, 2004.
- [86] THIERY M., « Modelisation de la carbonatation atmospherique des matériaux cimentaires, Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques », Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées‘ LPC, OA 52, 2006.
- [87] VAN BALEN K., VAN GEMERT D., “Modelling lime mortar carbonation”, Materials and Structures, n° 27, pp 393-398, 1994.
- [88] SAETTA A.V., SCHREFLER B.A., VITALIANI R.V., “2-D Model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials”, Cement and Concrete Research, vol. 25, n° 8, pp 1703-1712, 1995.
- [89] ROY S.K., POH K.B., NORTHWOOD D.O., “Durability of concrete, accelerated carbonation and weathering studies”, Building and Environment, 34, pp 597-606, 1999.
- [90] BAROGHEL-BOUNY V., “Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons - Méthodes, Analyse, Interprétations’, (LCPC, Paris, France) décembre, 468 p, 1994.
- [91] CHAUSSADENT T., « Analyse des mécanismes de carbonatation du béton » Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM Durabilité des bétons’. Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées a la durabilité’, pp 75-87, 1997.
- Okamura H., Ouchi M., “Self-compacting concrete”, journal of advanced concrete

Technology, Vol. 1, No. 1, pp 5-15, April 2003. Okamura H. and Ouchi M., "Self-compacting concrete. Development, present and future", Proceedings of First International RILEM Symposium on Self- Compacting Concrete (PRO7), Stockholm, Suède, pp. 3-14, 13-15 September 1999.

Assié S., « DURABILITE DES BETONS AUTOPLAÇANT », thèse de Doctorat INSA-UPS de Toulouse, N° d'ordre : 747, soutenue le 29 Octobre 2004.

Hayakawa M., Matsuoka Y. and YOKOTA K., "Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan", Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 381-397, 1995.

Nagataki S. and Fujiwara H., "Self compacting property of highly flowable concrete", Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 301314, 1995.

Petersson Ö., Billberg P. and Van B.K., "A model for Self-Compacting Concrete", International Rilem Conference on „Production methods and workability of concrete“, RILEM Proceedings 32, 1996.

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

[08] 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.

Sedran T., « Les Bétons Autonivelants », bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.

Jacobs F. and Hunkeler F., "Design of self-compacting concrete for durable concrete structures", Proceedings of First International Symposium on Self- Compacting Concrete, (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 397-407, 13-15 septembre 1999.

Gibbs J.C. and Zhu W., " Strength of hardened self-compacting concrete ", Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO7), Stockholm, Suède, pp. 199-209, 13-15 September 1999.

De larrard F., "Concrete mixture-proportioning - A scientific approach", Modern Concrete Technology Series, N°9, E&FN SPON, 1999.

Pera J., Husson S. and GUILHOT B., “Influence of finely ground limestone on cement hydration”, *Cement and Concrete Composites*, pp. 99-105, 1999.

Petersson Ö., “Limestone powder as filler in self-compacting concrete–Frost resistance and compressive strength”, *Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, Japon, pp. 277-284, 23-25 octobre 2001.

Felekoglu B., Yardimci M. Y. and Baradan B., “Acomparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete”, *Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33)*, Reykjavik, Iceland, pp. 446-456, 17-20 Août 2003.