

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département : Génie civil et hydraulique  
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم: الهندسة المدنية والري  
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Doctorat en sciences**  
Spécialité : Génie Civil

## **FORMULATION ET ÉTUDE D'UN BÉTON À HAUTE PERFORMANCE (BHP)**

Présentée par : Dalila BENAMARA

Soutenue publiquement le : 13 /11/2011.....

**Devant le jury composé de :**

<b>Abdelhamid GUETTALA</b>	<b>Prof.</b>	<b>Président</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Bouzidi MEZGHICHE</b>	<b>M.C. (A)</b>	<b>Directeur de thèse</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Mekki MELLAS</b>	<b>M.C. (A)</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Hocine CHABIL</b>	<b>Prof.</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Constantine</b>
<b>Leila ZEGHICHI</b>	<b>M.C. (A)</b>	<b>Examinatrice</b>	<b>Université de M'sila</b>
<b>Mekki BIBI</b>	<b>Prof.</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de M'sila</b>

---

---

## REMERCIEMENTS

Ce présent travail a été réalisé au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction de Djelfa (L.N.H.C.)
- Cimenterie de Chlef.
- Université de Chlef (Laboratoire de GC).
- Université de Laghouat (Laboratoire de physique).
- SETIM (Boumerdès).
- Université de Biskra (Laboratoire de GC).
- Université de Djelfa (Laboratoire de Biologie).

Sous la direction de Monsieur le Dr. MEZGHICHE Bouzidi a qui je tiens à témoigner toute ma gratitude, pour ses précieux conseils, ses encouragements, ses aides qui ont permis de finaliser ce travail.

C'est un devoir à remplir en exprimant mes remerciements les plus vifs à Monsieur le Prof. GUETTELA A.hamid Pour l'honneur qu'il me fait autant que président de jury de soutenance.

Je prie à Mrs MELLAS Mekki, CHABIL Hocine. ZEGHICH1 Leila, BIBI Mekki, qui ont eu l'amabilité d'examiner ce travail, de recevoir l'expression de mes sincères remerciements. Ma reconnaissance aussi à Monsieur MELLAS Mekki qui a su donner l'aide nécessaire

Tout mes Respects à Monsieur NAOUI Mohamad (Directeur de Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction de Djelfa) qui a permis d'accommoder la réalisation d'une grande partie de ce travail et qui ma laisser suffisamment de temps.

En fin mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin.

---

---

## TABLE DES MATIÈRES

<b><u>SOMMAIRE</u></b>	<b><u>PAGE</u></b>
<b>Table des matières</b>	<b>01</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>06</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>09</b>
<b>Liste des normes</b>	<b>10</b>
<b>Liste des abréviations et notation</b>	<b>12</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>13</b>
<b>CHAPITRE 1 : LES PRINCIPALES PROPRIETES DES BHP</b>	
<b>1-1 Introduction</b>	<b>16</b>
<b>1-2 Définition le béton à haute performance...</b>	<b>17</b>
<b>1-3 Historique</b>	<b>17</b>
<b>1-4 Classes de bétons</b>	<b>20</b>
<b>1-5 Choix des matériaux</b>	<b>21</b>
<b>1-5-1 Le ciment</b>	<b>21</b>
<b>1-5-2 Les granulats</b>	<b>22</b>
<b>1-5-3 Les superplastifiants</b>	<b>24</b>
<b>1-5-4 Les ajouts cimentaires...</b>	<b>28</b>
<b>1-6 Propriétés constructives des BHP de la macro- à la microstructure.</b>	<b>43</b>
<b>1-6-1 Comportement à l'état frais</b>	<b>43</b>
<b>1-6-2 Comportement à l'état durcis</b>	<b>44</b>
<b>1-6-2-1 Résistance à la compression</b>	<b>44</b>
<b>1-6-2-2 Résistance à la traction</b>	<b>46</b>
<b>1-6-2-3 Rigidité</b>	<b>47</b>
<b>1-6-2-4 Comportement du béton sous compression uni axiale</b>	<b>47</b>

<b>1-6-2-5 Le retrait</b>	<b>49</b>
<b>1-6-2-6 Fluage</b>	<b>50</b>
<b>1-6-2-7 Fragilité et la ductilité</b>	<b>51</b>
<b>1-6-2-8 Microstructure des bétons à hautes performances</b>	<b>52</b>
<b>1-6-2-9 Durabilité des BHP</b>	<b>53</b>
<b>1-7 Conclusion</b>	<b>56</b>

**CHAPITRE 2: COMPATIBILITE CIMENT/SUPERPLASTIFIANT ET  
METHODES DE FORMULATIONS DES BHP**

<b>2-1 Compatibilité ciment /super plastifiant</b>	<b>58</b>
<b>2-1-1 Couple Ciment –Superplastifiant</b>	<b>60</b>
<b>2-1-1-1 Influence des sulfates sur les comportements rhéologiques du ciment</b>	<b>60</b>
<b>2-1-1-2 Influence de la température sur l'hydratation du ciment</b>	<b>61</b>
<b>2-1-1-3 Influence du dosage en superplastifiant</b>	<b>62</b>
<b>2-1-1-4 Influence du contre ion</b>	<b>63</b>
<b>2-1-1-5 Influence du mode d'introduction du superplastifiant</b>	<b>63</b>
<b>2-1-3 Méthode des coulis</b>	<b>64</b>
<b>2-1-4 Evaluation de la compatibilité ciment-superplastifiant</b>	<b>65</b>
<b>2-2 Méthodes de formulations des BHP</b>	<b>68</b>
<b>2-2-1 Loi de féret</b>	<b>68</b>
<b>2-2-2 La méthode ERNTROY ET B. W. SHACKLOCK (1954</b>	<b>69</b>
<b>2-2-3 Méthode de formulation des B.H.P de l'institut Américain du béton (A.C.I) (1984)...</b>	<b>71</b>
<b>2-2-4 Méthode de DELARRARD (1988) (méthode dite des coulis)</b>	<b>72</b>
<b>2-2-5 La méthode de PEDECHES (1988)</b>	<b>73</b>
<b>2-2-6 La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke (2000</b>	<b>74</b>
<b>2-3 Conclusion</b>	<b>75</b>



### **CHAPITRE 3 : ETUDE DES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES**

<b>Introduction</b>	<b>77</b>
<b>3-2 Choix et sélection des constituants</b>	<b>78</b>
<b>3-2-1 Les granulats</b>	<b>78</b>
<b>3-2-2 Le sable</b>	<b>78</b>
<b>3-2-3 Le ciment</b>	<b>81</b>
<b>3-2-4 Les adjuvants</b>	<b>82</b>
<b>3-2-5 Les fillers</b>	<b>82</b>
<b>3-2-6 Le broyage et le traitement des ajouts</b>	<b>85</b>
<b>3-3 Conclusion</b>	<b>87</b>

### **CHAPITRE 4: LE MATERIAU BETON : COMPATIBILITE CIMENT/ SUPERPLASTIFIANT, FORMULATION**

<b>4-1 Introduction</b>	<b>88</b>
<b>4-2 Evolution de la compatibilité Ciment/ Superplastifiant (Méthode des coulis)</b>	<b>88</b>
<b>4-2-1 Appareillage</b>	<b>89</b>
<b>4-2-2 Résultats des essais effectués sur coulis</b>	<b>90</b>
<b>4-2-3 Commentaire</b>	<b>95</b>
<b>4-3 Etude expérimentale de la composition de bétons</b>	<b>96</b>
<b>4-3-1 Formulation d'un béton ordinaire</b>	<b>96</b>
<b>4-3-2 Formulation de béton fluidifié</b>	<b>98</b>
<b>4-3-3 Formulation de béton fluidifié avec des ajouts (BHP)</b>	<b>98</b>
<b>4-3-3 Essais sur bétons frais</b>	<b>100</b>
<b>4-3-4 Commentaire</b>	<b>100</b>
<b>4-4 Conclusion</b>	

**CHAPITRE 5: ETUDE DES COMPORTEMENTS PHYSICO -  
MECANIQUES DES BETONS AVEC AJOUTS**

<b>5-1 Introduction</b>	<b>102</b>
<b>5-2 Description des processus expérimentaux...</b>	<b>102</b>
<b>5-2-1 Les dimensions des éprouvettes et rectification de surfaçage</b>	<b>102</b>
<b>5-2-2 Mise en œuvre</b>	<b>103</b>
<b>5-2-3 Dispositif expérimental</b>	<b>10</b>
<b>5-3 Optimisation des formulations</b>	<b>104</b>
<b>5-4 L'influence de la géométrie des éprouvettes à partir de l'essai de compression</b>	<b>107</b>
<b>5-5 La résistance à la compression à long terme</b>	<b>108</b>
<b>5-6 Résistance à la flexion</b>	<b>110</b>
<b>5-7 Conservation à l'air libre</b>	<b>111</b>
<b>5-8 Le retrait</b>	<b>112</b>
<b>5-9 La déformabilité (déformation des bétons)...</b>	<b>113</b>
<b>5-9-1 Courbe : contrainte- déformation longitudinales</b>	<b>115</b>
<b>5-9-2 Courbe : Contrainte- Déformation transversales</b>	<b>117</b>
<b>5-9-3 Module de déformation</b>	<b>119</b>
<b>5-9-4 Module élasticité</b>	<b>120</b>
<b>5- 10 Microfissuration des BHP</b>	<b>121</b>
<b>5-11 Mode de rupture</b>	<b>125</b>
<b>5-12 Conclusion</b>	<b>126</b>

**CHAPITRE 6: LA DURABILITE DU BHP**

<b>6-1 Introduction</b>	<b>128</b>
<b>6-2 Durabilité des BHP soumis aux cycles EAU/AIR</b>	<b>129</b>

---

---

<b>6-2-1 La résistance à la compression</b>	<b>129</b>
<b>6-2-2 Masses volumiques</b>	<b>130</b>
<b>6-3 La perméabilité à l'eau du béton</b>	<b>131</b>
<b>6-3-1 Description générale du l'appareil utilisé</b>	<b>132</b>
<b>6-3-2 Influence du mode de conservation</b>	<b>133</b>
<b>6-4 Action de forte température sur le BHP</b>	<b>135</b>
<b>6-5 La capacité d'absorption massique</b>	<b>138</b>
<b>6-6 Résistance aux milieux agressifs</b>	<b>139</b>
<b>6-6-2 L'influence des milieux agressifs sur la résistance à la compression du BHP</b>	<b>140</b>
<b>6-6-2 L'influence des milieux agressifs sur la masse du BHP</b>	<b>142</b>
<b>6-6-3 Analyse aux rayons X</b>	<b>142</b>
<b>6-7 Conclusion</b>	<b>147</b>
 <b>COCLUSION GENERALE</b>	 <b>149</b>
 <b>REFERENCES</b>	 <b>155</b>

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le béton moderne est en train d'évoluer, un matériau ordinaire destiné au marché de consommation habituel vers un matériau de pointe destiné à des marchés niches. Cela ne veut pas dire que les bétons de 15 à 20 MPa sont condamnés à disparaître, car il existe de nombreuses applications où les concepteurs n'ont pas besoin de béton ayant une résistance à la compression plus élevées. Cependant, de plus en plus des bétons de pointe commencent à être utilisés dans des marchés niches ou leur utilisation conduit à une diminution significative des coûts initiaux et d'entretien. Il est aussi facile de démontrer que tels bétons sont beaucoup plus avantageux, non seulement du point de vue socioéconomique mais aussi environnemental [60].

L'objectif de ce travail est de fabriquer un BHP performant et économique à base de matériaux locaux. Un BHP ayant des propriétés (mécanique, physique, élastique, durabilité et de mise en oeuvre) très élevées.

D'après les résultats de recherche, toutes les observations effectuées dans ce présent travail, permettent de tirer des conclusions, on peut les classer sur 3 types :

### TYPE 1 :L'OUVRABILITÉ

- Les différents paramètres qui conditionnent la rhéologie des bétons, en présence d'un superplastifiant peuvent être:
  - les teneurs en  $C_3A$ ;
  - la finesse du liant;
  - les dosages en superplastifiant et le mode de leur incorporation.
  
- du point de vue  $C_3A$ , plus le ciment contient du  $C_3A$ , moins le superplastifiant est efficace.
  
- Le mode d'introduction du superplastifiant, influencé sur l'augmentation de l'affaissement. La procédure de l'addition immédiate (1/3 dans l'eau de gâchage et 2/3

avant la mise en oeuvre) produit un béton moins fluide que dans le cas d'une incorporation différée (2'30" après l'introduction de l'eau de gâchage), ce moment correspond au début de la période dormante.

- Dans le béton des ajouts minéraux faiblement actifs sont incorporé pour un rapport E/L inférieur à 0.30. Au début de la réaction d'hydratation ces ajouts remplissent les interstices entre les grains de ciment et ils ont un rôle essentiel c'est que ces ajouts se changent à des ajouts fortement actifs à long terme qui sont contribués par leur pouvoir hydraulique et pouzzolanique, qui donne une structure plus dense.
- L'ouvrabilité des bétons avec des ajouts augmente sensiblement par rapport au béton témoin, par contre le taux de l'air occlus diminue. Cela est dû par les ajouts utilisés qui sont finement broyés donc, ils remplissent les pores et libèrent l'eau emprisonnée.
- La masse volumique, est relativement élevée pour les bétons avec ajouts par rapport au béton de témoin, ce qui explique le rôle de remplissage de ces ajouts. En effet, ces derniers ayant des finesses plus grandes que celles du ciment utilisé,
- Les trois types du ciment utilisé (CPJ-CEMII/A42,5 Ain Touta, CPJ-CEMII/A42,5 M'sila et CPJ-CEMII/A42,5 Chlef), on a trouvé que le ciment CPJ-CEMII/A42,5 M'sila qui a une bonne compatibilité avec le superplastifiant (Meda Flow30) c.-à-d. une rhéologie adéquate.

## **TYPE 2 : LES COMPORTEMENTS PHYSICO- MECANIQUES**

- A partir de cette étude, il y a une possibilité de fabriquer des B.H.P en Algérie, avec des simples moyens, et dont la résistance dépasse les 70 MPa à 28 jours avec une plasticité adéquate.
  - Le broyage poussé des ajouts nous a permis d'atteindre un bon comportement physico- mécanique et durabilité.
  - Pour obtenir un niveau de résistance élevée, il faut abaisser le rapport eau/ ciment aux alentours de 0,25 à 0,30, en utilisant un super plastifiant de haute qualité et tous les
-

ingrédients du béton doivent être aussi de très bonne qualité.

- L'obtention d'un béton à haute performance de bonne adhérence nécessite l'utilisation des granulats cubiques ayant une surface rugueuse, avec un diamètre maximal entre 3/8 et 8/15 mm
  - Pour un rapport E/L égal à 0,26 les bétons fabriqués avec un ciment CPJ 42,5 qui renferme à 10 % de calcaire, 15 % de sable de dune et 15% de déchet de polissage de carrelage présentent des propriétés performantes. En effet avec 10 % de calcaire la résistance à la compression à 28 jours du béton mesurée sur éprouvette cubique est supérieure à 70 MPa avec un affaissement de 8 cm. Les autres caractéristiques de béton sont aussi améliorées .En effet la résistance à la flexions s'améliore avec les ajouts de la même façon que la résistance à la compression. En plus, le retrait au séchage des bétons à hautes résistances est plus faible que celui d'un béton ordinaire.
  - Le mode de conservation a une influence particulière sur les propriétés du béton, quand ce dernier n'était pas protégé, il perdait son eau par évaporation et sa résistance était considérablement réduite. Cependant, pour obtenir un béton relativement imperméable, il faudrait une conservation totale à l'eau, c'est à dire le degré d'humidité est 100%
  - A long terme la résistance à la compression des bétons augmente d'une manière presque linéaire jusqu'a l'âge de 02ans, pour l'ensemble des formulations. Ceci veut dire qu'entre 28jours et 2 ans le processus d'hydratation a continué, ce qui explique que les ajouts faiblement actifs se changera à des ajouts fortement actifs.
  - Le module d'élasticité du béton durci est en fonction de sa résistance mécanique. Cependant, les facteurs agissant sur le module d'élasticité, sont les mêmes que ceux agissant sur la résistance.
  - L'effet des ajouts minéraux sur l'évolution du module élasticité est significatif. Par conséquent, on remarque que le béton renfermant un ajout, présente toujours un module supérieur à celui du béton témoin, ce qui est lié à leur grande compacité.
  - Le superplastifiant a joué, lui aussi, son rôle de densification du squelette béton, ce qui
-

explique l'augmentation sensible du module d'élasticité du béton avec super plastifiant par rapport à celui du béton témoin (BT/0.5).

- Le module d'élasticité continu toujours à augmenter, même à des âges avancés, ce qui confirme la contribution des ajouts minéraux à la densification du béton avec l'âge, ce rôle en plus de son importance par rapport à la résistance, il aura aussi un effet estimable sur la durabilité.
- Le plus grand module d'élasticité c'est celui obtenue avec le BC=45MPa, suivi au BSD et au BDPC nous avons enregistré respectivement les valeurs suivantes 42 MPa, et 41MPa et dernièrement le BO avait un module élasticité de 35MPa. Mais il n'y a pas une grande différence significative entre le module d'élasticité des bétons ajouts et celui d'un béton ordinaire.
- Les déformations élasto- instantanées longitudinales du béton avec ajouts est plus grande que celle obtenu au béton ordinaire tandis que la déformation élasto-instantanées transversales du béton contrairement aux déformations élasto-instantanées

### **TYPE 3 : LA DURABILITÉ**

- L'incorporation des ajouts finement broyés a favorisé l'accroissement de la compacité des bétons, phénomène visualisé par l'augmentation de la masse volumique, conséquence de la densification de la matrice. En favorisant la formation d'un squelette plus compact, ce qui a entraîné en conséquence, une amélioration relative de la résistance mécanique malgré les actions préjudiciables
  - La relation est claire et nette entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression. La perméabilité à l'eau diminue rapidement avec l'augmentation de la résistance, cependant pour des résistances très élevées, la perméabilité évoluera très peu et atteint un niveau très faible.
  - La perte de masse et le retrait des bétons avec ajouts cimentaires aux différentes échéances sont plus faibles que ceux mesurés sur le béton de référence (témoin). Par exemple le retrait des bétons aux ajouts cimentaires se trouve entre 387µm/m, alors que celui du béton de référence est 525 µm/m.
-

- Les granulats calcaires commençaient à se décomposer à 600 C° par une perte de la résistance est attribuée aux endommagements (fissuration interne) causés par:
  - Les déshydrations
  - La pression de vapeur et la destruction des produits d'hydrations surtout au niveau des interfaces granulats/pâte de ciment, et à 900 C° sont déjà très endommagés.
  
- Malgré la longue période de conservation dans des milieux agressifs, les caractéristiques de ces bétons ne sont que légèrement affectées par les dégradations quel que soit le milieu agressif, comparativement au béton témoin, probablement à cause de la compacité très élevée qui est un frein à la pénétration des agents agressifs et aussi un frein à la sortie des cations.
  
- L'analyse aux rayons X effectuée sur des échantillons prélevés des couches superficielles des éprouvettes exposées dans les solutions de (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et l'eau de mer) à l'âge de 9 mois montrent l'apparition des phases cristallines comme le gypse et l'ettringite secondaire qui sont deux produits un peu néfastes.

#### **LES RECOMMANDATIONS :**

A travers cette étude sont proposées ces recommandations suivantes :

- Pour l'élaboration d'un béton à hautes performances sans difficultés il est préférable d'utiliser un ciment sans ajouts tel que un CPA 52,5 (Actuellement ce type de ciment est introuvable en Algérie).
  
  - Les ciments riches en silice et qui contient un taux d'aluminate tricalcique faible sont les meilleurs.
  
  - Pour transporter des BHP dans la centrale a béton aux chantiers, l'utilisation d'un retardateur devient indispensable
  
  - Ces nouveaux bétons ont besoin d'un contrôle rigoureux et continu, parce qu'une variation d'un paramètre peut modifier les caractéristiques de ce béton
  
  - Pour le BHP, il n'y a plus lieu d'utiliser le surfaçage traditionnel, comme le mortier de soufre, de préférence on utilise la boîte à sable qui reste un moyen très efficace
-



pour résoudre le problème de la planéité.

### **LES PERSPECTIVES :**

Cette étude reste toujours insuffisante a cause des nombres de propriétés des BHP mal connues. En perspective nous proposons les axes de recherches suivantes :

- L'élaboration d'un béton à très hautes performances. (Résistance à la compression supérieure à 100 MPa) par l'utilisation des matériaux locaux de très bonne qualité ;
  - L'élaboration d'un béton à hautes performances sur chantier : essais de fabrication in situ et mise au point de procédures et formulations adaptées ;
  - Etudier la ductilité et le fluage des bétons à hautes performances ;
  - L'effet du pourcentage d'armature sur la ductilité des bétons à hautes performances ;
  - L'étude des bétons à hautes performances fibrés ;
  - étudier l'évolution de la chaleur d'hydratation et en fonction des résultats obtenus, recommander la destination de chacun des bétons.
  - Faire une identification microstructurale (interne et en surface) des bétons par une analyse cristallographique.
  - étudier l'effet des ajouts cimentaires sur la fixation de la portlandite (la chaux) par les analyses thermiques différentielle et gravimétrique.
  - mesurer la perméabilité des bétons aux ions chlore.
  - faire une étude technico-économique pour situer l'intérêt de l'utilisation des ajouts cimentaires locaux par rapport à la fumée de silice importée.
  - Dégager des voies d'application de ce nouveau matériau dans notre pays.
-

## CHAPITRE 1

### LES PRINCIPALES PROPRIÉTÉS DES BHP

#### 1-1 INTRODUCTION

La résistance à la compression est généralement considérée comme la principale propriété caractéristique du béton. Depuis la découverte du béton armé, les études ont été axées sur la recherche de méthodes permettant de renforcer cette résistance. Des progrès considérables ont été enregistrés dans ce domaine au cours de ces dernières décennies. Aux Etats-Unis, durant les années 1950, une résistance à la compression de 35 MPa était considérée comme une résistance élevée. Dans les années 1970, la limite a été portée à 70 MPa, alors qu'en 1990, la notion de béton à haute résistance était réservée à un béton d'une résistance à la compression comprise entre 80 et 100 MPa. Et cette évolution n'est pas terminée ! Des résistances à la compression supérieures à 120 MPa ont été réalisées lors de constructions récentes. La notion de 'haute résistance' est dès lors très relative et, de toute évidence, évolutive. Il n'est dès lors pas étonnant que coexistent plusieurs définitions du 'béton à haute résistance'. Selon la norme européenne EN 206-1, le béton est considéré comme un 'béton à haute résistance' à partir d'une classe de résistance de C55/67. Le premier nombre derrière la lettre C fait référence à la résistance à la compression caractéristique mesurée sur des cylindres de 300 mm de hauteur et d'un diamètre de 150 mm, et le deuxième nombre, à la résistance à la compression caractéristique mesurée sur des cubes de 150 mm de côté [3].

L'augmentation de la résistance à la compression du béton s'accompagne fréquemment de l'amélioration d'autres propriétés, comme la résistance à la traction, la rigidité, la résistance à l'usure, la durabilité, etc. Pour certaines applications, ces propriétés peuvent même être plus essentielles que le niveau de résistance atteint. Dans pareil cas, le choix des composants et de la composition ne doit pas être axé sur l'obtention d'une résistance maximale, mais davantage sur l'obtention d'une prestation optimale des propriétés souhaitées. La résistance supérieure obtenue est une incidence de second ordre. En effet, le contenu de l'expression 'béton à haute résistance' s'avère insuffisant. De préférence dès lors l'appellation 'béton à hautes performances', qui est

clairement plus générale. Il est parfaitement possible d'obtenir un béton présentant des hautes performances pour une propriété donnée, tout en ne possédant pas une résistance nettement supérieure. C'est ainsi que le béton autocompactant a été initialement décrit au Japon comme un béton à hautes performances, en raison de son ouvrabilité exceptionnelle et de sa (très probable) amélioration au niveau de la durabilité. Le béton autocompactant ne doit cependant pas nécessairement être un 'béton à haute résistance' [4,5].

### **1-2 DÉFINITION D'UN BÉTON À HAUTE PERFORMANCE**

Le béton à haute performance n'est pas un matériau révolutionnaire, car il contient exactement les mêmes constituants que le béton ordinaire. Les constituants de ce nouveau matériau sont : Les granulats ordinaires quoique de bonne qualité, du ciment Portland ordinaire (ciment Portland à haute résistance initiale), lorsque des résistances élevées au jeune âge sont nécessaires à un dosage important de (450 à 550 kg/m<sup>3</sup>), et il est constitué aussi par la fumée de silice (généralement de 5 à 15% de la masse totale du liant) , et parfois par d'autres ajouts minéraux comme des cendres volantes; ou du laitier de haut fourneau granulé broyé....etc. : toujours du super plastifiant, le dosage en varie entre 5 et 15 litres par mètre cube de béton selon la teneur en matières sèches et sa nature ; un tel dosage permet de réduire la quantité d'eau du béton de 45 à 75 kg /m<sup>3</sup>. Il est essentiel que le béton à haute performance puisse être mis en place dans la structure en utilisant des méthodes usuelles et qu'il soit mûri de manière habituelle même si un bon mûrissement humide est nécessaire.

Généralement le béton à haute performance se différencie à des autres bétons par son très faible rapport eau/ciment : toujours inférieur à 0,3 quelquefois ne dépassant pas 0.25 et occasionnellement 0.20 [6].

### **1-3 HISTORIQUE**

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) sont apparus il y a environ une vingtaine d'années. De résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 70 MPa, ils présentent un squelette granulaire conventionnel noyé dans une matrice de compacité accrue grâce à l'utilisation de superplastifiants (réducteurs d'eau) et des produits ultrafins amorphes ou cristallisés jouant à la fois un rôle de complément granulaire et pouzzolanique. En plus de la fumée de silice jusqu'alors

reconnue comme jouant le mieux ce rôle, d'autres ultrafins (laitier, métakaolin, cendres volantes ...) peuvent être utilisés.

Avant 1980, les (BHP) Bétons à Hautes Performances ou BHR (Bétons à Hautes Résistances) était uniquement produits en laboratoire. Cette situation a beaucoup évolué vers les années quatre vingt, avec l'arrivée des superplastifiants et des fumées de silice. En effet, vers 1970, les restrictions environnementales ont contraint les industries de ferro-silicium à collecter la poussière de leurs cheminées. Comme conséquence, ces fumées se sont retrouvées dans l'industrie du béton.

De résistance en compression de l'ordre de 50 MPa, les BHP ont été utilisés pour la première fois en 1984 dans la construction d'un petit pont.

De nos jours, la production de bétons de résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 100 MPa est très fréquente dans bons nombres de laboratoires dans le monde et, leur utilisation sur les chantiers commence à se développer.

L'emploi des BHP permet d'envisager la réalisation d'ouvrages ou d'éléments en béton de sections réduites ou de plus grandes portées et donc des gains en poids et en matières intéressants. Elle permet aussi d'envisager dans certains cas, le remplacement d'autres matériaux tels que le bitume, l'acier ou le bois par le béton et d'ouvrir de nouveaux marchés à ce dernier (constructions multiétagées en Amérique du Nord, viaducs sophistiqués en France, revêtements routiers aux États Unis).

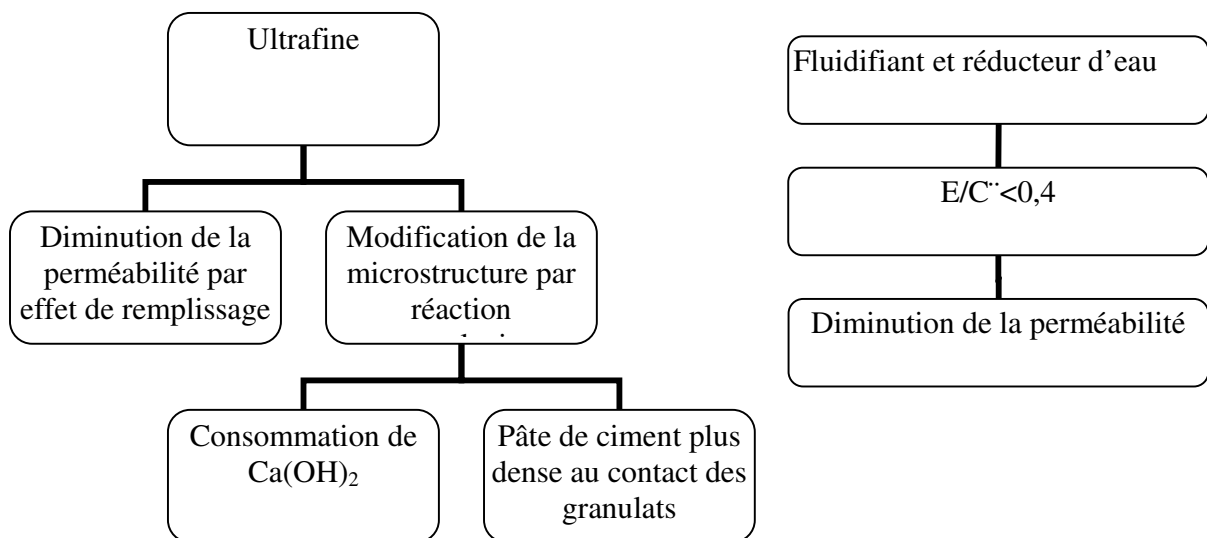
D'autres aspects non liés à la résistance et la durabilité (propriétés très connues des BHP) ont été soulignés par Aïtcin [4] pour l'utilisation bénéfique de BHP dans le futur. En effet, les BHP offrent des propriétés recherchées, avec peu de matériaux. Ils sont donc plus économiques en matériaux naturels que les bétons classiques. cependant l'utilisation des ultrafines.

L'utilisation des ultrafines dans la fabrication des BHP est devenue alternative indispensable pour l'amélioration de la microstructure et de la résistance mécanique, ainsi que la durabilité de ces bétons.

Ces particules ultrafines, généralement des fumées de silice condensées sont des sphères de petites dimensions (granularité entre 0.02 et 1 $\mu$ m, diamètre moyen d'environ 0.4 $\mu$ m) comparées à celles des grains de ciment (granularité entre 1 et 80 $\mu$ m, diamètre moyen d'environ 15 $\mu$ m).

Le remplacement d'une partie de ciment par la fumée de silice permet d'augmenter la compacité, et particulièrement dans la zone de transition entre la pâte durcie et les granulats parce qu'elle comble les vides d'empilements entre les composants granulométriques plus grossiers du mélange.

L'incorporation des fumées de silice permet d'une part, de réduire fortement la porosité initiale de la pâte de ciment du béton ; qui est un effet de remplissage, et d' autre part elles ont un effet pouzzolanique qui est dû a leur réaction avec  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , [7].



**Figure 1-1** : Caractéristiques microstructurales du BHP par rapport au béton ordinaire [7]

Les ultrafines, et particulièrement les fumées de silice, représentent un constituant majeur et indispensable dans les bétons à haute performance, et par conséquent ces matières fines, sont très coûteuses dans le marché de Génie Civil.

La contrainte économique ajoutée au non -disponibilité de cette matière, nous à pousser à rechercher d'autres matières qui peuvent remplacer, les fumées de silice.

Les ajouts minéraux inertes et actifs représentent une bonne alternative pour jouer ce rôle. Cette tendance a été confirmée par plusieurs auteurs dans d'autres pays; P.C AITCIN a conclu que l'utilisation des ajouts minéraux dans la fabrication des bétons à haute résistance est une alternative préférable, car l'introduction d'une certaine quantité d'ajout minéral ( laitier, cendre volante, calcaire ,pouzzolane ...) , qui est toujours moins réactif à très courts terme, facilite le

---

---

maintien des propriétés rhéologiques du béton frais, et la perte des résistances que l'on observe à court terme, est largement compensée par les gains de maniabilité que l'on note à très courts terme.

En poussant au maximum le broyage ( $7500-10000\text{cm}^3/\text{g}$ ), ces ajouts peuvent être extra ultrafines, et jouent un rôle très proche de celui des fumées de silice non disponibles dans notre pays.

En Algérie, la technologie des BHP demeure encore à l'état embryonnaire et l'utilisation de ce matériau n'a pas encore dépassé le 7% [8]. Cependant les horizons et les perspectives de l'évolution de ce matériau sont encourageantes.

#### 1-4 CLASSES DE BÉTONS :

Les BHP sont souvent classés selon leur résistance caractéristique à la compression à 28 jours  $f_{c28}$  en MPa. C'est ainsi que les spécialistes distinguent :

- |                                     |                 |
|-------------------------------------|-----------------|
| - Bétons ordinaire                  | 20 à 50 MPa.    |
| - Bétons à hautes performances      | 50 à 100 MPa.   |
| - Bétons à très hautes performances | 100 à 150 MPa.  |
| - Bétons exceptionnels              | $\geq 150$ MPa. |

Les **BHP** nécessitent l'emploi du ciment choisi, type HPR. Dosé à environ  $400\text{kg}/\text{m}^3$ , leur fabrication suppose l'utilisation d'adjuvants réducteurs d'eau qui permettent de maintenir le rapport E/C à des valeurs comprises entre 0.35 et 0.40 tout en garantissant une bonne maniabilité n'est pas utile d'utiliser des granulats spéciaux à condition que ceux-ci soit propres.

Les **BTHP** sont obtenus en réduisant le rapport E/C à des valeurs de l'ordre de 0.20 à 0.35, ceci implique l'emploi de super plastifiants réducteurs d'eau à dosage élevé. Tous les composants du béton doivent être de bonne qualité. Il devient nécessaire d'utiliser des ultrafines telles que les fumées de silice, les granulats doivent être résistants de forme cubique ou sphérique, et ils présentent un module d'élasticité proche de celui de la pâte durci pour réduire les déformations différentielles entre granulats et matrice de béton. Il semble préférable de retenir des granulats de 10 à 12 mm de dimension maximale.

Les **bétons exceptionnels**, de résistance supérieure à 150MPa, ne sont encore fabriqués que dans un laboratoire. Un béton de 280 MPa à été obtenu dans un laboratoire avec un E/C= 0.16 [4].

---

---

## 1-5 CHOIX DES MATERIAUX

### 1-5-1 LE CIMENT

La compatibilité entre le superplastifiant et le ciment est un facteur très important pour le choix du ciment. La finesse du ciment et sa composition chimique peuvent affecter le comportement du superplastifiant. Il est nécessaire de faire des essais sur coulis ou sur mortier pour le choix du superplastifiant. Les ciments à temps de prise très longue sont à éviter, des dosages élevés en superplastifiant ne permettent pas le démoulage même après 24 heures.

L'obtention de bonnes résistances mécaniques dépend de la finesse de mouture du clinker. On augmente ainsi la proportion d'hydrates dans le ciment durci.

La finesse du ciment confère au béton une résistance précoce. La surface spécifique Blaine doit être de l'ordre de 3 500 à 4 000 cm<sup>2</sup>/g.

Cependant, l'augmentation de cette surface conduit à l'obtention d'un ciment à très forte teneur en fines donc à forte chaleur d'hydratation et par suite il y a risque de prise instantanée.

Ce phénomène induit des contraintes d'origine thermique et donc des fissurations de peau dans des pièces massives. En outre, du point de vue de l'obtention d'une forte compacité dans les BHP, les particules les plus fines du ciment ont des interactions granulaires néfastes avec les grains d'ultrafines. En règle générale, il est recommandé de limiter la taille inférieure des grains de ciment à 1 µm .

Certaines études avaient préconisé l'utilisation des laitiers ultrafins et des ciments au laitier pour diminuer la chaleur d'hydratation, maintenir la maniabilité et améliorer la durabilité.

Les dosages préconisés pour les BHP sont compris entre 350 et 600 kg/m<sup>3</sup> suivant la résistance projetée et le coût comparé de l'ultrafine

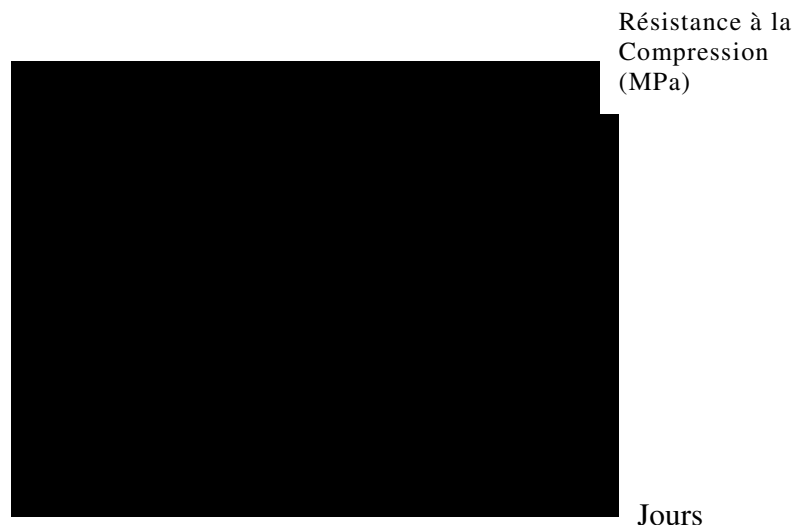
Le dosage en eau conduit à des rapports eau/ (ciment + ultrafine) compris entre 0,2 et 0,3. Si on veut atteindre des résistances élevées, il est important de réduire au plus bas rapport tout en gardant une maniabilité convenable.

Un rapport E/C de 0,35 représente à peu près la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation du ciment. Ce qui signifie qu'un volume assez important de grains de ciment reste anhydre dans un BHP et ceci même à long terme. Le ciment en plus de sa fonction liante joue aussi le rôle d'un granulat inerte de petite dimension [9].

Le choix du ciment fait intervenir à la fois des critères rhéologiques et des critères de résistance mécanique.

D'après certains chercheurs ont constaté que le ciment ayant le plus faible pourcentage d'aluminate tricalcique donne la meilleure maniabilité et les ciments ayant le plus grand pourcentage de  $C_2S$   $C_3S$  donnent la plus grande résistance au béton, (figure1-2 ).

Dans la pratique, on est toujours obligé de faire des essais de vérification sur mortiers et coulis en laboratoire pour sélectionner le meilleur ciment.



**Figure 1-2 :** L'évolution des résistances pour chacune des réactions d'hydratation [4].

### 1-5-2 LES GRANULATS

Les granulats occupent environ 70 % du volume du matériau et, à ce titre interviennent directement sur les propriétés du béton à l'état frais comme à l'état durci. Ils semblent même plus sollicités dans les BHP que dans les bétons classiques. D'une manière générale, les qualités demandées aux granulats pour l'obtention des BHP concernent essentiellement la forme et l'état de surface, la porosité, la granularité, les propriétés mécaniques et la nature minéralogique.

#### a- forme et état de surface

La forme intervient directement sur la compacité propre du béton. La rugosité de la surface favorise l'imbrication de la pâte de ciment. Les granulats concassés à coefficient de forme élevé sont préférés aux granulats roulés lisses (adhérence plus élevée).



Le coefficient de forme est le rapport du volume effectif du granulat sur le volume de la sphère circonscrite. Plus il sera élevé, meilleure sera la compacité. En outre, les formes très anguleuses sont très néfastes quant à l'obtention des bonnes résistances, elles poinçonnent la matrice lors d'une sollicitation.

En effet, lorsque le béton est soumis à une sollicitation de compression, on peut assimiler les granulats à des plateaux de compression d'une presse et, la matrice se trouve donc poinçonnée.

Les granulats lisses favorisent la détérioration rapide de la liaison granulat – pâte très haute performance.

#### **b- porosité**

Les granulats poreux (avec une porosité communicante) modifient la consistance du matériau par absorption d'eau dans le malaxeur. Il est recommandé d'utiliser des granulats de coefficient d'absorption inférieur à 1 %.

#### **c- nature minéralogique**

Elle est caractérisée par la résistance mécanique des grains, la texture (la rugosité de surface) et la possibilité des réactions à l'interface granulat – pâte de ciment.

Les granulats présentant des risques de réactions alcali – granulat sont à proscrire car ces réactions détruisent l'étanchéité des enceintes et la stabilité à long terme des ouvrages.

La présence des poussières ou d'argile sur les granulats réduit l'adhérence et exige une augmentation de la teneur en eau entraînant une chute des résistances.

#### **d- granularité**

C'est elle qui régit la compacité du mélange et sa maniabilité. Les dosages en ciment dans les BHP étant élevés, il n'y a pas intérêt à utiliser des sables fins, Alaejos Gutierrez et al. [10] recommandent le sable de rivière qui réduirait la demande en eau.

Dutruel [11] recommande de limiter la dimension maximale du gros granulat à 12 mm pour avoir des résistances élevées. Metha et al. [12] sans s'y opposer, recommandent les granulats de dimension maximale comprise entre 20 et 25 mm ; Addis et al. [13] avaient trouvé que la résistance du tait avec la dimension du gros granulat entre 13,5 et 26,5 mm ; Alaejos Gutierrez et al. [14] ont affirmé qu'on obtient les meilleurs résultats avec des granulats de dimension maximale comprise entre 13 et 14 mm et un coefficient Los Angeles inférieur à 15.

De Larrard a recommandé un rapport gravier/sable (G/S) compris entre 1,5 et 2 [4].

---

---

### 1-5-3 LES SUPERPLASTIFIANTS

#### 1-5-3-1 INTÉRÊT DE LEUR UTILISATION

La maniabilité des bétons classiques dépend essentiellement du dosage en eau. Malheureusement, l'augmentation de la teneur en eau conduit à la modification des propriétés du béton : à long terme, chute des résistances mécaniques, porosité accrue et donc durabilité réduite ; à court terme, ségrégation accrue et perte d'homogénéité du matériau.

Les BHP sont définis par trois critères : résistance, durabilité et ouvrabilité. Aitcin et al. [4] ont pensé que les aspects les plus importants à développer sont la fluidité et la capacité de mise en oeuvre. Ces suggestions nécessitent l'utilisation des superplastifiants qui peuvent procurer au béton d'excellentes fluidité et résistance à la ségrégation grâce à leur propriété dispersante. Ils permettent de défloculer les grains de ciment ayant tendance à se regrouper en grappes une fois introduits dans l'eau. Leur rôle est donc essentiellement de modifier l'équilibre des forces existant entre les particules de ciment.

Les trois propriétés des BHP citées ci-dessus sont encore améliorées lorsque les superplastifiants sont associés à d'autres produits tels que la fumée de silice, le métakaolin, les cendres volantes, le laitier.

#### 1-5-3-2 Les superplastifiants: état actuel des connaissances

La tendance actuelle est de les classer d'après leur composition et leur mode de préparation en quatre catégories [15] :

- **1<sup>ère</sup> catégorie** : lignosulfonates de calcium ou de sodium modifiés (LMS)

On sait que les lignosulfonates proviennent de l'industrie de la pâte à papier. Ce sont des produits tensio-actifs utilisés comme réducteurs d'eau. On peut les utiliser comme fluidifiants à condition d'opérer une sélection (poids moléculaire élevé, faible teneur en sucre) et de faire subir un certain nombre de traitements : précipitation, neutralisation, ultrafiltration (pour augmenter le poids moléculaire), fermentation (pour éliminer les sucres). Cet adjuvant est commercialisé sous la forme d'un liquide de couleur brun foncé de pH environ 7.5.

- **2<sup>ème</sup> catégorie** : condensé de mélamine sulfonate et de formaldéhyde (MSF)

Ce superplastifiant résulte de la réaction entre une résine de mélamine et du formaldéhyde, suivie d'une sulfonation avec une solution bisulfite de sodium.

On obtient par polymérisation un « polycondensé » d'un poids moléculaire voisin de 30000. Ce produit est disponible soit à l'état de poudre, soit en solution aqueuse à 20 % d'extrait sec. Le plus souvent, c'est sous forme liquide qu'il est utilisé : liquide clair, légèrement laiteux, ne contenant ni sucre, ni chlorure, de pH est compris entre 8 et 9.

- **3<sup>ème</sup> catégorie** : condensé de naphthalène sulfoné et de formaldéhyde (NSF)

Il résulte de la réaction entre le naphthalène et le formaldéhyde, suivi d'une sulfonation et d'une neutralisation par la soude caustique.

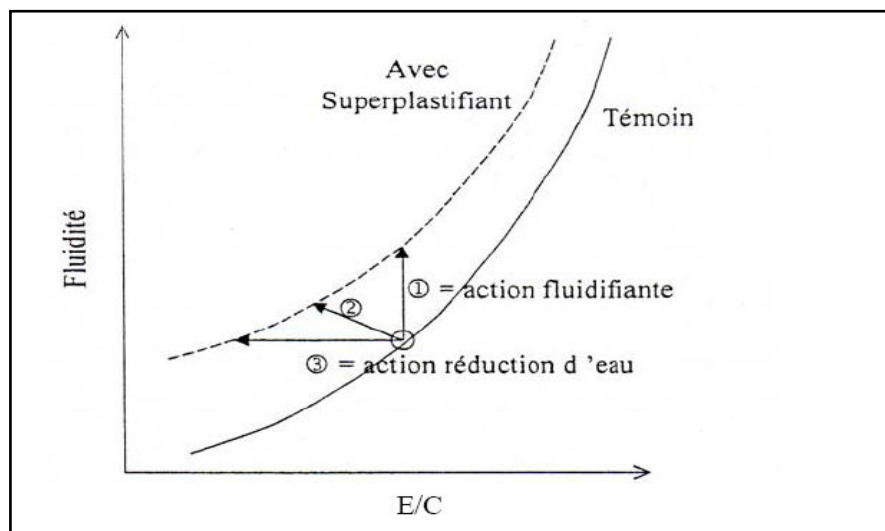
Les produits commerciaux se présentent sous la forme d'une solution aqueuse de 20 à 40% d'extrait sec, de couleur brune (pH d'environ 9).

- **4<sup>ème</sup> catégorie** : nouvelles molécules à base de polymères carboxyliques

Ce sont des adjuvants non chlorés d'une nouvelle génération chimique à base de polymères acryliques, carboxyliques. Le groupe actif anionique est  $\text{COO}^-$ .

Ces polymères ne contiennent pas de groupes sulfoniques, avec leurs molécules de longues chaînes latérales et un poids moléculaire élevé ( $\geq 40000$ ) arrivent à réduire l'eau d'environ 30 à 40 %, leur particularité est le maintien de l'ouvrabilité durant de longues heures sans provoquer d'effet retardateur.

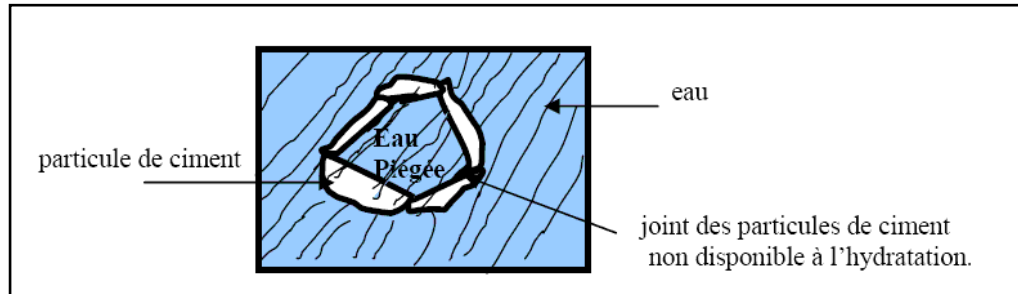
La figure (1-3) permet de privilégier soit l'action « réduction d'eau » ou « l'effet fluidification » ou bien les deux, ensemble.



**Figure 1-3:** l'action « réduction d'eau » ou « l'effet fluidification » ou bien les [15]

### 1-5-3-3 mécanisme de dispersion

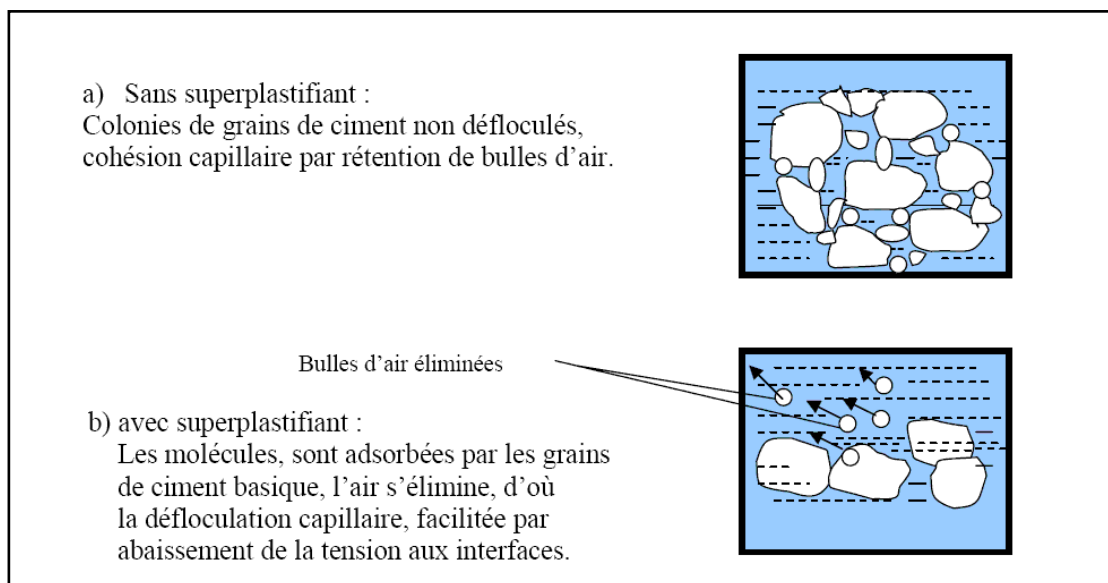
Les grains de ciment Portland présentent un grand nombre de charges électriques sur leurs surfaces, si bien que lorsqu'ils rentrent en contact avec un liquide aussi polaire que l'eau, ils ont tendance à flocculer (représentation schématique sur la figure 1-4).



**Figure 1-4 :** Flocculat de ciment en l'absence de superplastifiant [4]

La figure 1-5 montre l'influence d'un superplastifiant sur les amas de ciment. Suite à la défloculation, une dispersion des bulles d'air et en parallèle une lubrification par adsorption sur les parois des grains sont observées.

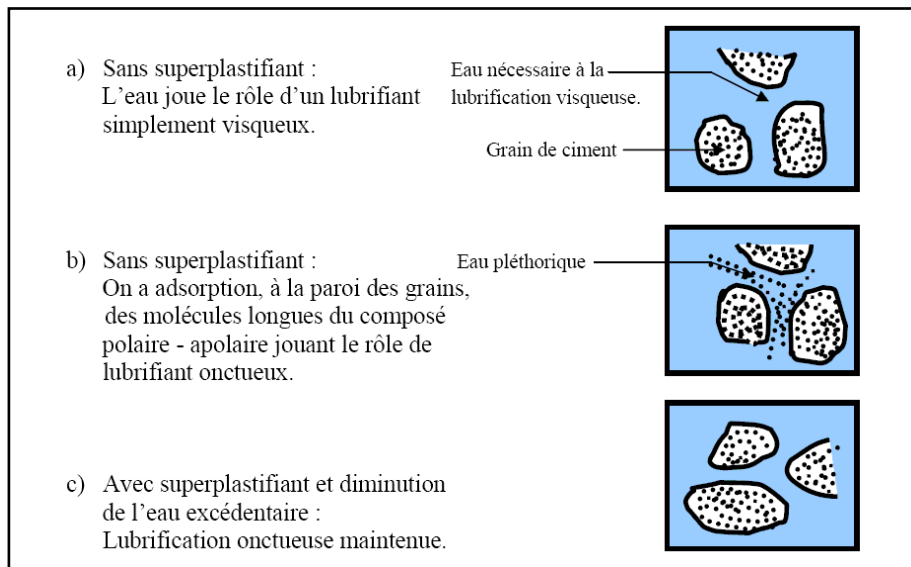
Les superplastifiants de deuxième génération sont les plus efficaces. Ils améliorent la dispersabilité, permettent une stabilité de dispersion à long terme, une excellente ouvrabilité et une résistance à la ségrégation. Leur action dispersive est essentiellement due à la répulsion électrique.



**Figure 1-5:** Mécanisme de flocculation avec et sans superplastifiants [ 4 ].

### 1-5-3-4 mécanisme de réduction d'eau

La figure (1-6) montre le mécanisme de réduction d'eau avec et sans superplastifiant



**Figure 1-6:** Mécanisme de réduction d'eau avec et sans [4]

### 1-5-3-5 Effets des superplastifiants à long terme

La résistance des bétons a longtemps été limitée car on ne peut pas augmenter indéfiniment les dosages de ciment sans prendre d'autres risques. Avec l'aide des superplastifiants, on va pouvoir baisser considérablement la teneur en eau des bétons tout en hydratant mieux le ciment disponible ; le résultat est une augmentation des résistances finales.

Le béton d'enrobage qui est la surface de contact avec le milieu extérieur doit faire l'objet d'une grande attention, car cette surface est susceptible de se dégrader sous l'influence de certains facteurs tels que : le manque de compacité, la perméabilité, les facteurs climatiques ou les agressions chimiques tel que le  $\text{CO}_2$ . Les superplastifiants sont là pour limiter grandement ces risques, notamment en augmentant la compacité des bétons et en protégeant les armatures pour un meilleur enrobage.

### 1-5-3-6 conséquences sur l'hydratation du ciment

Uchikawa et al. [16], Jolicoeur et al. [17] ont montré que les superplastifiants à base de naphthalène pouvaient réagir avec les particules de ciment à forte réactivité, en particulier avec le  $\text{C}_3\text{A}$ , et réduire la vitesse d'hydratation de la surface. D'après Uchikawa et al. [16], les

---

---

superplastifiants à base de naphthalène sont plus adsorbés par les phases interstitielles et la chaux que par les silicates de calcium.

L'effet retardateur du superplastifiant est proportionnel à son dosage et généralement accentué par une faible concentration en  $C_3A$ . Ils ont suggéré que des temps de prise prolongés et des faibles résistances initiales apparaissent pour de faibles concentrations en  $C_3A$ , puisque de faibles quantités de superplastifiant peuvent réagir avec le  $C_3A$  laissant ainsi une grande quantité de cet adjuvant être absorbée par d'autres phases minérales ( $C_3S$ ) et réduisant ainsi leurs vitesses de réaction de surface.

Pour les ciments contenant une concentration normale en  $C_3A$ , un effet retardateur peut apparaître si de grandes quantités de superplastifiants sont utilisées.

On constate alors que pour un dosage de superplastifiant donné, les concentrations élevées en  $C_3A$  réduisent le temps de prise, et sont préjudiciables pour la résistance des BHP face aux sulfates [4].

#### **1-5- 4 LES AJOUTS CIMENTAIRES**

On peut fabriquer des BHP en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant, la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts cimentaires lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance .

##### **1-5-4-1 ACTION DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES MATÉRIAUX CIMENTAIRES**

La norme européenne EN 206-1 (NF P 18-325) de Février 2002 définit les additions comme des « matériaux minéraux finement divisés utilisés dans le béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières ».

L'action des additions concerne aussi bien l'état frais que l'état durci du béton. En premier lieu, à l'état frais, la présence des additions modifie la structure du squelette granulaire du matériau et les frictions entre les composants de la suspension solide dans la phase liquide. En second lieu, au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment et peuvent modifier la structuration des produits hydratés. En troisième lieu, certaines additions ont la capacité de réagir chimiquement en

---

---

milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant additionnel à celui résultant de l'hydratation du ciment et que les anglo-saxons précisent sous le terme de «supplementary cementitious matériels». De plus, ces différents aspects de l'action des additions peuvent intervenir de manière simultanée, rendant particulièrement difficile l'évaluation de la contribution des additions minérales aux performances des matériaux cimentaires. Toutefois, pour une première analyse de l'action des additions minérales, nous pourrions distinguer trois principaux effets :

- un effet granulaire engendré par la capacité d'empilement des particules de l'addition et par l'intensité des frictions entre les particules de l'addition avec les autres grains solides du mélange. Cet effet agit essentiellement sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais et peut influencer sur le développement et l'intensité des deux autres effets des additions.
- un effet physico-chimique et microstructural engendré par les interactions entre les particules de l'addition et l'évolution du processus d'hydratation du ciment ainsi que par les modifications de la structuration de la matrice cimentaire. Il agit sur l'évolution du processus d'hydratation du ciment et sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires.
- un effet chimique engendré par la capacité de certaines additions caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques à réagir en milieu cimentaire. Il agit sur le volume et la nature des produits hydratés formés. Cet effet est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural. Ils peuvent donc être associés dans une notion unique plus large qui est celle de la contribution des additions à l'activité liante du ciment

Par ailleurs, la normalisation actuelle distingue les additions en deux types : celles quasiment inertes (de type I) et celles à caractères pouzzolaniques ou à caractères hydrauliques latent (de type II). Elle permet la prise en compte dans la formulation de certaines additions en présence de ciments de type CEM I par le biais d'un coefficient forfaitaire  $k$ . Cependant, elle ne propose pas de méthodologie expérimentale permettant d'élargir le concept de coefficient  $k$  à de nouveaux couples ciment addition. A l'issue de notre analyse critique des textes normatifs et des études actuelles sur la prise en compte des additions minérales dans la formulation, il est montré que l'évaluation quantitative précise de la contribution liante des additions rend nécessaire la maîtrise de l'effet granulaire et le maintien de la compacité du squelette solide des mélanges lorsque des additions sont introduites.

---

---

### 1-5-4-2 LES FILLERS CALCAIRES

Les fillers calcaires sont des ajouts cimentaires non hydrauliques (inertes), mais qui peuvent se révéler d'une grande efficacité dans l'utilisation pour les bétons de masse. Par effet filler, ils peuvent en effet améliorer la compacité du squelette granulaire dans les bétons, et par leur relative inertie chimique ils peuvent contribuer à diminuer sensiblement la température dans les bétons de masse.

La norme AFNOR (NF P 15-301) permet de substituer jusqu'à 35 % de filler calcaire au ciment portland.

(Aitcin et al, 1998) [18] estiment qu'en plus de son rôle principal, qui est de densifier la matrice de mortier, le filler calcaire aurait une certaine réactivité chimique qui contribuerait à augmenter les résistances en compression par la formation de carboaluminates

(De larrard F. 1988) [19] ont observé que l'ajout de  $(\text{CaCO}_3)$  au  $(\text{C}_3\text{S})$  accélère l'hydratation du ciment. (De larrard et al.1990) [20], estiment aussi que les fillers fins comme le calcaire, accélèrent les premières réactions d'hydratation. Ces dernières études confirment l'effet non négligeable des fillers calcaires sur l'hydratation du ciment au jeune âge.

Le calcaire se compose principalement de carbonates de calcium  $(\text{CaCO}_3)$ , dans des proportions suivantes de 56.03 % de  $(\text{CaO})$  et de 43.97 % de  $(\text{CO}_2)$ .

Le carbonate de calcium engendre les minéraux de calcite. La calcite sous forme cristalline la plus stable et la plus courante de  $(\text{CaCO}_3)$ .

#### 1-5-4-2 -1 Mode d'actions des fillers

##### A- Action sur la porosité:

Les fillers calcaires auraient tendance à modifier la densité des C-S-H. En général la densité des C-S-H d'échantillons de pâtes contenant du  $\text{CaCO}_3$  (corrigée en prenant en compte la présence de portlandite, de  $\text{CaCO}_3$  et de  $\text{CsS}$  anhydre) est légèrement plus importante. Cependant cette relation dépend également du degré d'hydratation des matériaux. La densité d'une pâte de  $\text{C}_3\text{S}$  incorporant du carbonate de calcium est par contre plus faible dans le cas de l'utilisation de  $\text{CaCO}_3$ .

À un certain degré d'hydratation, une pâte de  $\text{CsS}$  ne contenant pas de  $\text{CaCO}_3$  a une porosité totale plus faible. Cependant durant les sept premiers jours d'hydratation, une pâte contenant par exemple 15% de  $\text{CaCO}_3$  peut posséder une porosité plus faible, due des degrés différents d'hydratation comparativement à une pâte du même âge sans  $\text{CaCO}_3$ .



---

---

**B- Action sur les propriétés mécaniques :**

Aitcin et al.[18] expliquent une amélioration des propriétés mécaniques par une densification de la matrice obtenue.

Le broyage concomitant avec celui des fillers ne favorise pas une bonne répartition de particules en taille. Notamment la plus grande part de clinker dans les larges particules ne favoriserait pas le développement de la résistance au jeune âge.

**1-5-4-2-2 Réactivité directe des fillers calcaires :**

Aitcin et al.[19] ont introduit la notion de filler inerte ou actif. Ils ont proposé d'étudier la réactivité avec le C3A comme évaluation de la réactivité hydraulique d'un filler calcaire donné. En effet, il a été démontré que le  $\text{CaCO}_3$  peut réagir avec le clinker. Des analyses de diffraction aux rayons (X) a permis de détecter la présence de carboaluminates de calcium hydratés dans des pâtes de ciment. Ces produits pourraient se former en présence ou non de gypse dans le mélange. La formation de carboaluminates de calcium hydratés est vue comme analogue à celle de l'ettringite. Il y a composition entre 864 et  $\text{CO}_3$  pour réagir avec les aluminates de calcium.

**1-5-4-2-3 Réactivité indirecte des fillers calcaires :**

Le gypse réagit plus vite avec l'aluminate tricalcique pour former de l'ettringite lorsque du carbonate de calcium est présent dans le mélange. Cela proviendrait de la réaction du  $\text{CaCO}_3$  sur la surface des grains de  $\text{C}_3\text{A}$  formant une membrane plus perméable de plaquettes hexagonales. La conversion d'ettringite en monosulfoaluminate hydraté est aussi accélérée.

Des observations au microscope électronique à balayage ont montré que les produits d'hydratation se font sur les particules de  $\text{C}_3\text{S}$  et aussi de  $\text{CaCO}_3$ , confortant ainsi l'idée du carbonate de calcium comme éventuel site de nucléation.

L'addition de  $\text{CaCO}_3$  augmente le taux d'hydratation du silicate tricalcique. Cet effet serait d'autant plus important que la finesse des particules ajoutées diminuerait et que la quantité de carbonate de calcium ajoutée serait accrue.

Le carbonate de calcium accélérerait l'hydratation du silicate tricalcique comme le déchlorure de calcium .mais sans toutefois diminuer la période d'induction.

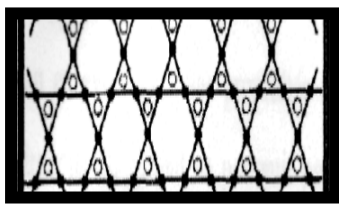
L'effet accélérateur est particulièrement marqué pour une teneur optimale en  $\text{CaCO}_3$ . Après cet optimum, il pourrait bloquer la dissolution et la cristallisation de produits d'hydratation.

Cela pourrait provenir du fait que des particules de  $\text{CaCO}_3$  seraient incorporées dans la phase des C-S-H. Plus la quantité de  $\text{CaCO}_3$  incorporée serait grande, plus cette partie prise par les C-S-H serait importante, du moins jusqu'à une valeur de 25%.

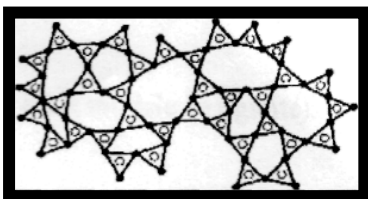
### 1-5-4-3 LE SABLE DE DUNE FINEMENT BROYÉE :

Les caractéristiques des bétons sont régies par l'hydratation du ciment, cette dernière peut être modifiée par l'incorporation d'ajout du sable de dune finement broyé qui conduisent à la formation d'hydrosilicates supplémentaires issues de la fixation de la portlandite par les ultrafines particules de silice, ce dernier va remplir les pores, en effet ce processus a une influence directe sur le squelette de la pâte du ciment et du béton et permet au béton de diminuer les possibilités de pénétration des agents agressifs externes, on obtient ainsi des bétons plus durables (figure 1-7).

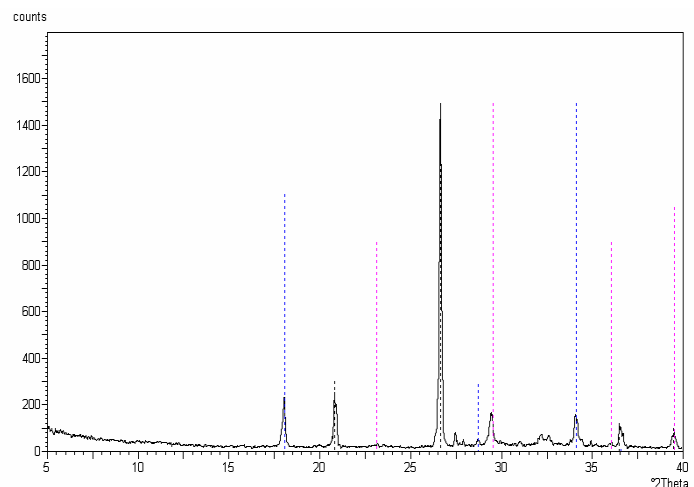
Le sable de dune est composé de minuscules grains de quartz. Le quartz (c-à-d. du  $\text{SiO}_2$ , soit du dioxyde de silicium ou de la silice) est l'un des minéraux les plus répandus sur terre. L'analyse par (DRX) montre que le (SD) ont constitué de ( $\text{SiO}_2$ ) bien cristallisé du type "Low-Quartz", contrairement au (SD), la (FS) à une structure amorphe (vitreux). Figures (1-8,1-9). L'analyse par diffractométrie aux rayons (X) a mis en évidence le rôle pouzzolanique de (SD). En effet, la faible quantité de portlandite détectée par (DRX) dans les pâtes de ciment en présence de (SD), traduit la réaction pouzzolanique partielle de cet ajout, qui contribue à l'augmentation de la résistance mécanique et qui améliore la compacité de la pâte. Contrairement aux jeunes âges (7 j), les résistances mécaniques aux âges avancés (90 j), des bétons à base d'ajout (SD) par substitution dépassent celles du béton témoin à base de CPJ 42.5, ce qui signifie que cet ajout a un rôle pouzzolanique qui se traduit par la formation de CSH II de deuxième génération [21].



**Figure 1-8 :** Architecture atomique de silice cristallisée (ex : quartz) [21]



**Figure 1-9 :** Architecture atomique de silice amorphe (ex : verre) [21]



**Figure 1-7:** L'analyse par (DRX) du sable de dune, d'après [22]

---



---

#### 1-5-4-4 LA POUZZOLANE

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers : Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions alcalins-agrégats et du retrait au séchage. Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment. Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland.



A l'état frais, les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.

A l'état durci, les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables :

- accroissement de la résistance finale.
- réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces. En effet, les eaux naturelles contiennent souvent du gaz carbonique libre. Celui-ci s'attaque à l'hydroxyde de calcium contenu dans la pâte de ciment en le solubilisant, Il en résulte une augmentation de la porosité et donc une diminution générale de la résistance.

Les pouzzolanes et les laitiers ont une particularité commune. Ils renferment à des teneurs différentes - les trois constituants fondamentaux du clinker sont la chaux (CaO), la silice (SiO<sub>2</sub>) et l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Il en résulte la possibilité de caractériser leur composition en fonction de ces trois oxydes par un point ou par une zone limitée dans la représentation triangulaire de RANKIN figure (1-10).

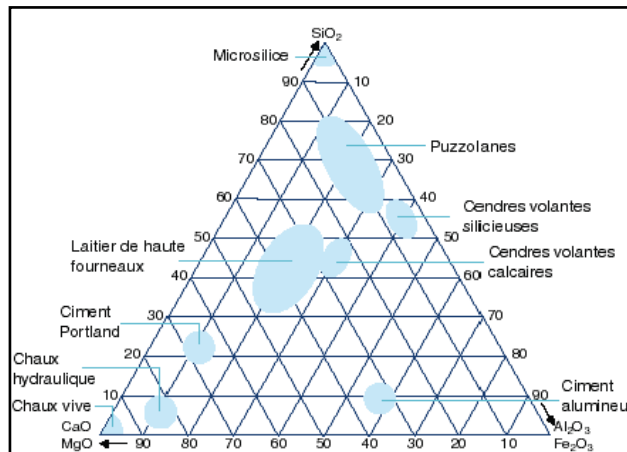


Figure 1-10 : Diagramme ternaire (de RANKIN) CSA [23]

### 1-5-4 -4 -1 activation et hydratation des pouzzolanes

Par définition, une pouzzolane est un matériau ayant une aptitude à réagir avec la chaux en présence d'eau et à former des composés possédant des propriétés liantes.

Si on se base sur cette définition simple et précise, on peut déduire que le meilleur activant des pouzzolanes c'est la chaux.

#### a) Capacité de fixation de la chaux

Il est difficile d'évaluer l'activité pouzzolanique (le pouvoir pouzzolanique d'une pouzzolane) par une méthode purement chimique. Cette activité est liée à la rapidité de durcissement des liants pouzzolaniques, mais il est bien évident que le problème est complexe, du fait que toutes les pouzzolanes ne fixent pas la même proportion de chaux dans le même temps, et que leur capacité de fixation totale de chaux (CaO) n'est pas la même suivant leur composition.

Avec l'addition de la chaux aux pouzzolanes, on obtiendra des aluminates tétracalciques et des silicates de calcium hydratés, cette réaction est schématisée comme suit :



Dans le ciment Portland pouzzolanique, deux processus ont lieu pendant son durcissement :

1. hydratation des minéraux faisant partie du clinker.
2. interaction de l'adjuvant minéral actif (la pouzzolane) avec l'hydroxyde de calcium qui se dégage lors de la prise du clinker.

### Cinétique d'hydratation

L'étude cinétique d'hydratation des laitiers et pouzzolanes, ou l'étude de l'évolution physico-chimique du système initial hors équilibre, vers le système final stable. Nous permet de connaître l'évolution mécanique ; parce que l'augmentation des résistances est liée directement au développement des phases hydratées.

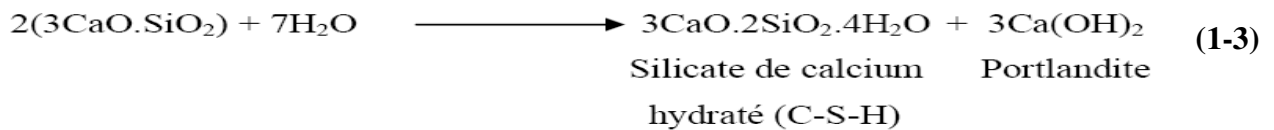
La cinétique d'hydratation est liée à la vitesse de solubilisation des ajouts (laitier et pouzzolane) qui dépend de :

la composition chimique de ces derniers ;

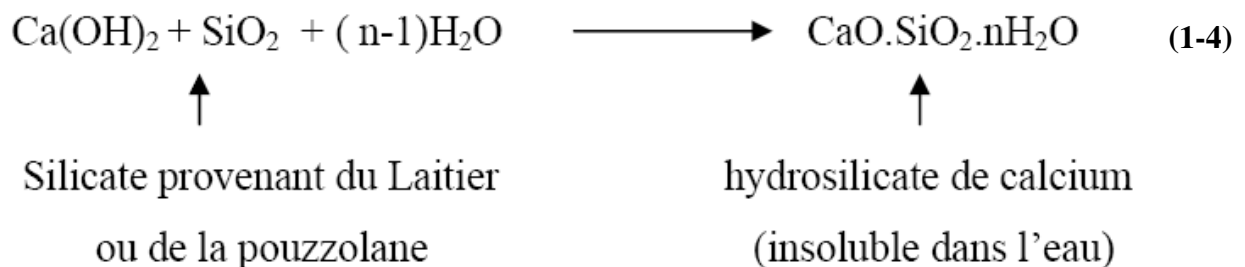
la finesse de broyage (surface spécifique BLAINE) ;

la température, car toutes les transformations chimiques ont une cinétique qui croît avec la température[24] .

Le silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S) s'hydrate au cours des premiers jours qui suivent la mise en œuvre selon le schéma suivant :



L'hydroxyde de calcium (Ca(OH)<sub>2</sub>) provenant de l'hydratation primaire du (C<sub>3</sub>S), joue le rôle de l'activant principal des ajouts pouzzolaniques, ou du laitier, selon la réaction suivante :



L'hydratation du laitier ou de la pouzzolane, ne peut donc débuter que lorsque le (C<sub>3</sub>S) a déjà partiellement réagi. Comme leur cinétique est plus lente que celle du (C<sub>3</sub>S), il va se constituer "une réserve" de portlandite qui sera ensuite progressivement absorbée.

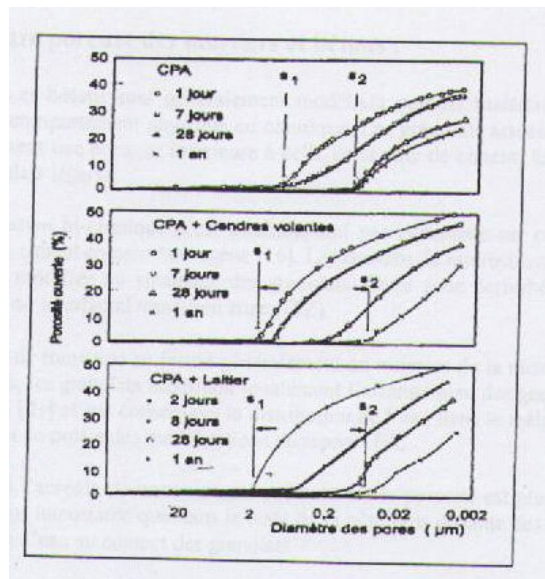
La contribution à l'augmentation de la résistance mécanique est notable dès les premières semaines pour le laitier, elle peut être encore plus tardive pour les produits pouzzolaniques.

Le laitier et la pouzzolane ont des cinétiques d'hydratation plus lentes que celle du ciment Portland (clinker) [24,25].

### 1-5-4-5 LE LAITIER

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans le haut fourneau à partir de minerai de fer (les oxydes  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en proportions variables), de coke et éventuellement d'un fondant. On le recueille liquide vers  $1550^\circ\text{C}$  au-dessus de la fonte (gravitation de la fonte en fusion).

Le laitier et les cendres volantes entraînent un accroissement de la porosité et de la taille aux premiers âges à cause d'un ralentissement des réactions d'hydratations figure (1-11). A plus long terme, sous l'effet de la réactivité hydraulique du laitier ou de l'activité pouzzolanique des cendres, les effets de l'hydratation du clinker sont renforcés ce qui conduit à une porosité du même ordre mais à une diminution de la taille des plus gros pores. Ces résultats positifs ne sont obtenus que si l'humidité de conservation est suffisamment élevée pour permettre la réaction des additions minérales



**Figure 1-11** : Influence minérale sur l'évolution de la structure poreuse des pâtes de ciment au cours du temps [26].

#### A- hydratation du laitier

Contrairement au ciment qui est soluble dans l'eau et s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier vitrifié n'est soluble que dans une eau alcalinisée et a donc besoin, pour faire prise, d'un agent d'addition appelé activant. L'hydratation intervient d'abord par dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution aboutit à une solution concentrée, d'où

résulte une précipitation de composés hydratés qui fait à son tour chuter la concentration des éléments dans la solution.

Ce qui permet la solubilisation d'une nouvelle quantité de produits jusqu'à une concentration entraînant une nouvelle précipitation de composés hydratés. C'est cette répétition du cycle dissolution – concentration – précipitation (plusieurs années), qui constitue la prise et le durcissement du laitier vitrifié.

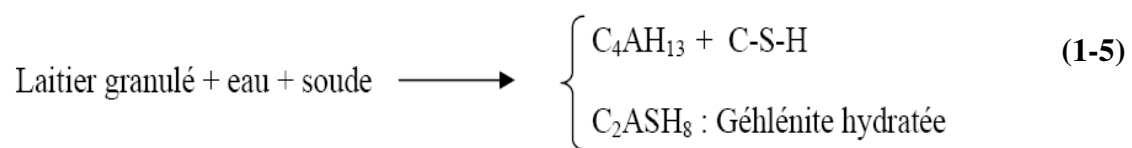
### B- Activation par le clinker

Dans les ciments au laitier, le clinker est l'activant principal du laitier ; cependant les premiers hydrates produits seront ceux du clinker ; C-S-H et  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  qui recouvrent uniformément les grains du laitier et du clinker ; par la suite l'excès de chaux active l'hydratation du laitier avec une texture C-S-H semblable à celle des ciments ; il en résulte alors des silicates de calcium hydratés et des aluminates tétracalciques hydratés .

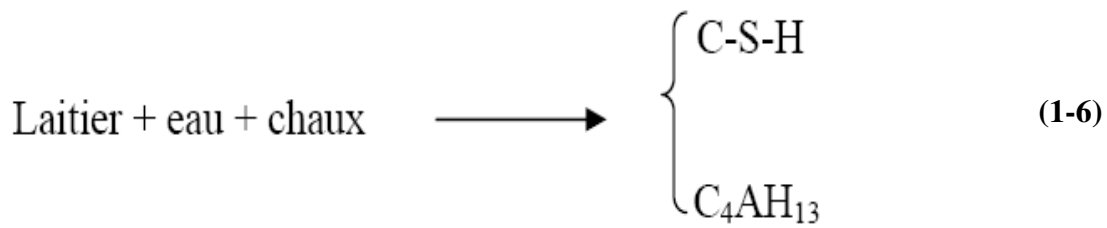
Dans une pâte de ciment contenant du laitier, ce dernier suit la réaction d'hydratation de telle sorte qu'il consomme la chaux à tous les stades de l'hydratation. Du fait de sa forte proportion en chaux ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 1$ ), le laitier est souvent utilisé dans les proportions relativement élevées (25-50 % de la masse de ciment) comme ajout dans l'industrie cimentaire.

### C- Activation alcaline

L'hydratation du laitier activé par une base autre que la chaux telle que la soude, donnera du silicate de calcium hydraté (C-S-H), de l'aluminate tétracalcique hydraté ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ) et la géhlénite hydraté ( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ) [27] ; selon l'équation simplificatrice suivante :

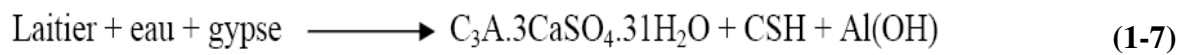


Si le laitier est activé par la chaux on obtiendra des silicates de calcium hydratés ( C-S-H ) et des aluminates tétracalciques hydratés ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ) [28], soit alors :



#### D- Activation sulfatique

Si le laitier est activé par le gypse il donnera des C-S-H, de l'ettringite et de l'hydroxyde d'aluminium selon l'équation suivante :



#### E- rôle du laitier dans le béton

Les précipitations résultantes sont normalement destinées à obturer les grands pores ; cependant les précipitations des ciments au laitier sont fixes et imperméables alors que celles des ciments Portland ne le sont pas. Par conséquent le béton ordinaire est plus poreux que le béton au laitier [4].

Sarkar et al. [29] avaient montré qu'avec un laitier broyé à une finesse de 800 m<sup>2</sup>/kg, on obtient une réduction significative de la chaleur d'hydratation du ciment, un béton à haute résistance et à structure plus compacte. Péra et al. [30] ont montré que plus la finesse de mouture du laitier est élevée, meilleures sont ses performances.

La réduction des contraintes thermiques causées par la chaleur d'hydratation est un facteur important pour la production des BHP. En utilisant 75% de laitier finement broyé, Dron et al. [31] ont montré que les contraintes thermiques étaient réduites de 60%.

L'utilisation de 40% de laitier finement broyé a obtenu un béton à ouvrabilité améliorée, une augmentation des résistances même dans le cas de cure sous température élevée, et une bonne résistance à la diffusion de l'ion chlore.

La microstructure du ciment avec ajout de laitier est caractérisée par une matrice dense avec une croissance des C-H-S sur la surface des particules du laitier. Comparé au ciment, les produits d'hydratations du mélange ciment-laitier ont également un faible rapport Ca/Si mais riche en magnésie et en alumine. Cependant, le laitier ne réagit pas promptement que la fumée



---

---

de silice. Son hydraulité latente s'étend sur plusieurs mois voire des années. Plusieurs grains restent donc anhydres même à long terme.

De nos jours, l'utilisation du laitier devient de plus en plus fréquente. Les résultats sont très peu différents sinon similaires : une chute importante de dégagement de chaleur d'hydratation ; une prise lente ; une bonne ouvrabilité avec réduction du dosage en eau ; une faible résistance au jeune âge ; un accroissement des résistances au-delà de 28 jour [8]

#### **1-5-4-6 LA FUMÉE DE SILICE**

Également appelées « fumées de silice » ou « poussières de silice » ou encore « microsilice », les fumées de silice sont un sous-produit de l'électrometallurgie du silicium et de ses alliages. On charge un four avec du quartz, de la houille et parfois des copeaux de métal. L'ensemble est porté à une très haute température (1500-2000°C) par des arcs électriques. On obtient d'une part le silicium liquide et d'autre part des gaz chargés de poussières dont certains s'oxydent à l'air libre pour donner des fumées de silice.

En tant que sous-produits industriels, leur nature ne fait l'objet d'aucun contrôle lors de sa fabrication. Leurs caractéristiques physico-chimiques peuvent être assez dispersées, non seulement d'une usine à l'autre mais encore à l'intérieur même d'une unité de fabrication : la fumée de silice est un matériau très variable [32].

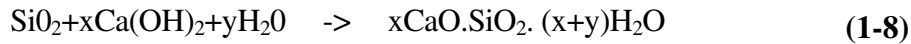
#### **A- L'effet Filler de la fumée de silice**

L'action bénéfique de la fumée de silice peut être attribuée à plusieurs facteurs en même temps. Les caractéristiques principales de la fumée de silice faisant d'elle un bon adjuvant sont : la finesse, la nature amorphe, et le pourcentage élevé en SiO<sub>2</sub>. La fumée de silice agit en tant que filler puisqu'elle occupe l'espace entre les grains de Ciment, qui peut être occupé par l'eau.

Cheng et al. [33] attribue le gain de maniabilité du béton à l'effet filler de la fumée de silice, pour un béton fabriqué avec un superplastifiant et un faible rapport E/C, Les petites sphères de la fumée de silice peuvent déplacer l'eau emprisonnée entre les grains du ciment flocculé. Cette dernière action augmente le pourcentage d'eau libre dans la pâte ainsi que sa maniabilité. L'effet filler et le mode de densification dus à l'action de la fumée de silice sont démontrés par F. De Larrard [34] en utilisant le modèle de Farris.

## **B- L'effet pouzzolanique de la fumée de silice**

La fumée de silice réagit avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment pour former silicates de calcium (C-S-H), selon la réaction suivante (appelée pouzzolanique par les spécialistes de la chimie des ciments).



Phase « C-S-H »

Cette réaction contribue, par la formation d'une phase liante (CSH), au renforcement des propriétés mécaniques du ciment. Plusieurs chercheurs ont étudié les propriétés pouzzolaniques de la fumée de silice.

Les résultats de la réaction entre la fumée de silice et le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  augmentent le volume des CSH et réduisent le volume total des pores capillaires dans la pâte de ciment. Ces résultats ont été vérifiés par de larrad et al [34] sur deux pâtes de ciment fabriquées avec un rapport  $E/(C+F.S)$  égal à 0.33 l'un contenant 10% de F.S., l'autre sans F.S.

Aitcin [4] rapportent que les particules de la F.S. ne réagissent pas toutes avec la même vitesse. En utilisant le microscope électronique à transmission, quelques particules réactives de la F.S. peuvent commencer à réagir en un jour tandis que d'autres ne réagissent qu'avant un mois. Généralement la réaction chaux- silice est pratiquement totale après un mois à 20°C. a titre de comparaison, la réaction entre la chaux et une pouzzolane naturelle n'est pas terminée au bout d'un an.

la réaction pouzzolanique de la F.S. avec  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  réduit le pourcentage des portlandites dans la pâte du ciment hydraté. La concentration des  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , exprimée en pourcentage ce poids du ciment, diminue avec l'augmentation de volume de la fumée de silice.

Mohammad et al. [35], dans leur étude sur l'influence de la F.S. sur la densification de la zone de transition du béton à haute résistance ont observé que le remplacement de 15% ce poids du ciment par la F.S. dans un béton fabriqué avec un rapport  $E/(C+FS)$  égal à 1.55 réduit de façon significative la porosité de la zone de transition en comparaison avec un béton fabriqué classique. Ce résultat est observé après un jour ; il est attribué à l'effet filler de la F.S. A long terme ils ont observé dans la zone de transition pour le mélange de la F.S. que le volume total des pores supérieures à 0.5um est similaire a celui dans la pâte du ciment.

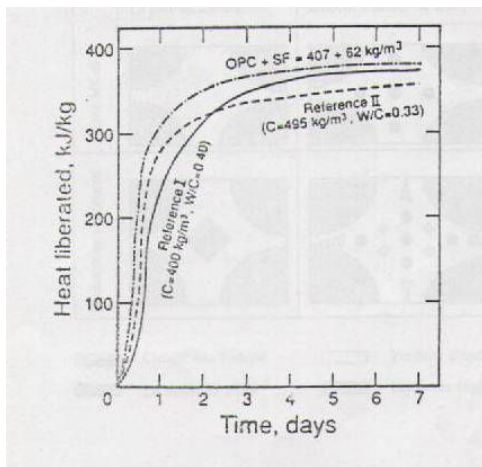
## **C- L'effet de la FC sur les propriétés du ciment et du béton.**

L'effet des pouzzolanes sur les propriétés du ciment et du béton dépend des caractéristiques spécifiques ces matériaux utilisés :

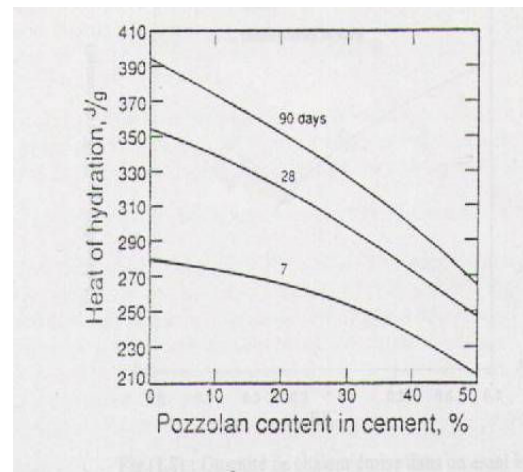
## D- Chaleur d'hydratation

Semblablement à l'hydratation du ciment, la chaleur libérée par la réaction pouzzolanique est plus faible que celle résultant de l'hydratation du ciment. Le remplacement partiel du ciment par la pouzzolane engendrera une diminution de la chaleur d'hydratation qui augmente avec le volume de remplacement du ciment par la pouzzolane

Les résultats représentés sur la figure (1-12) confirment les effets exceptionnels de l'ajout pouzzolanique sur la chaleur d'hydratation des ciments. Ces effets sont aussi confirmés par les résultats représentés sur la figure (1-13) dans laquelle le ciment portland partiellement remplacé par la F.S.



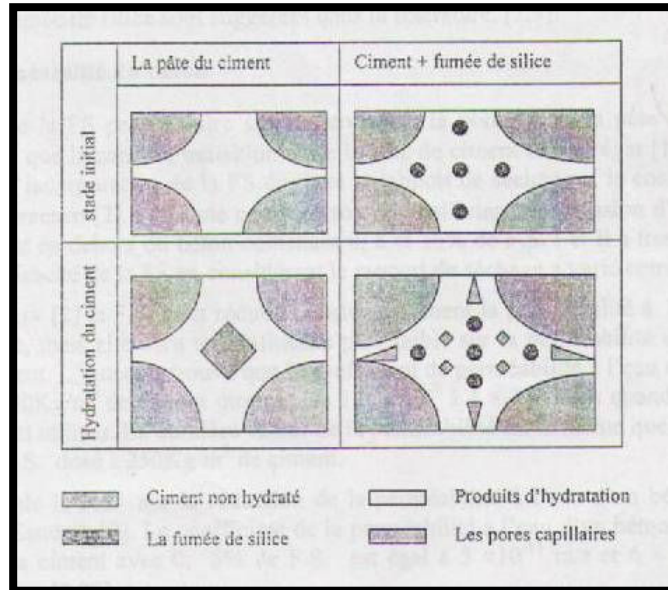
**Figure 1-12** L'effet de la pouzzolane sur la chaleur d'hydratation du ciment [36]



**Figure 1-13** L'effet de la fumée de silice sur la chaleur d'hydratation du ciment [36].

## E- Développement de la résistance

La figure (1-14) représente un diagramme schématique de la contribution de l'effet pouzzolanique et filler de la fumée de silice sur le gain de la résistance du béton. Ces deux effets conduisent à une pâte de ciment dense et solide, spécialement dans la zone de transition avec les agrégats. L'addition de la fumée de silice peut aussi réduire la résistance suite à une augmentation de volume d'eau nécessaire pour maintenir la fluidité désirée. Cet effet négatif peut être éliminé par l'utilisation d'un réducteur ou un superplastifiant pour obtenir la fluidité désirée sans changer le rapport  $E/(C+FC)$ .



**Figure 1-14** L'effet de la fumée de silice sur le système des pores du ciment [36]

Le temps à partir duquel la fumée de silice commence à contribuer à l'amélioration de résistance du béton dépend de plusieurs facteurs, incluant la concentration de la fumée de silice, la température, la cure et le rapport  $E/(C+F.S.)$ . Une amélioration de la résistance du béton aux jeunes âges est surtout remarquée pour les rapports  $E/C$  inférieur à 0,4 .

#### **F- L'effet de la cure sur le développement de la résistance**

Duvalet al [32] ont mené une étude sur l'effet à court terme de la cure sur le développement de la résistance à la compression et le module d'élasticité d'un béton superplastique réalisé avec un rapport  $E/(C+FS)$  égal à 0.28 et contenant 10 % F.S., ont montré qu'un béton dans une cure humide développe un module d'élasticité et une résistance à la compression approximativement 15 % à 18% plus grands que ceux d'un béton conservé 28 jours à l'air libre. D'autres travaux montrent que 7 jours de cure humide sont suffisants pour qu'un pareil béton avec fumés de silice développe sa propre résistance et sa durabilité. Des recommandations similaires sur la durée minimale de conservation à l'air libre d'un béton avec fumée de silice sont suggérées dans la littérature, [18,19].

---

---

## 1-6 PROPRIÉTÉS CONSTRUCTIVES DES BHP DE LA MACRO- À LA MICROSTRUCTURE

### 1-6-1 Comportement à l'état frais

Il est important de contrôler les propriétés d'un BHP frais pour deux raisons : un BHP doit pouvoir être mis en place aussi facilement qu'un béton usuel et un BHP qui a des propriétés à l'état frais bien contrôlées et constantes, aura très probablement des propriétés tout aussi contrôlées à l'état durci.

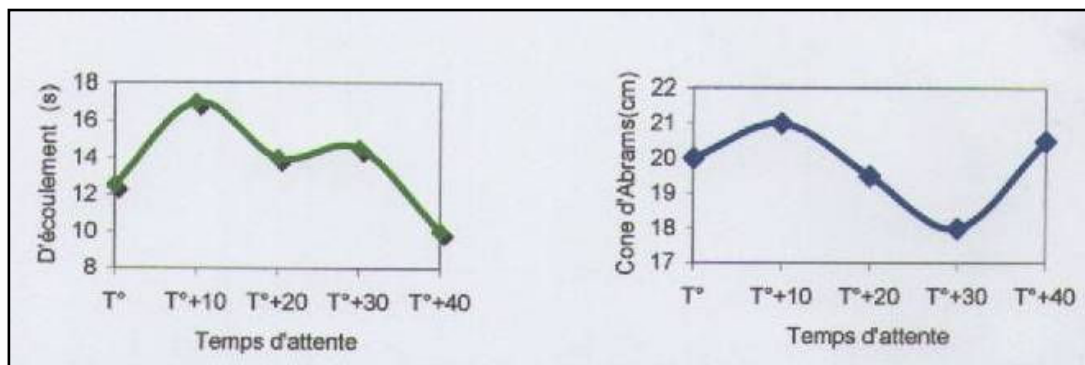
#### 1-6-1-1 La Maniabilité

Malgré des dosages en eau très inférieurs aux dosages usuels, ces bétons présentent le plus souvent un affaissement au cône d'Abrams d'environ 20 cm en sortie de malaxeur. La séparation des particules permise par les superplastifiants supprime en effet le seuil de cisaillement de la pâte de ciment fraîche, d'où un béton qui s'écoule sous le seul effet de la pesanteur, avec cependant une vitesse dépendante de la viscosité du mélange, c'est-à-dire du degré de desserrement de l'empilement granulaire par l'eau de gâchage. Pour des rapports eau/ciment inférieur à 0,30, la consistance, bien que fluide, est souvent visqueuse et « collante ». Le béton se met bien en place, mais nécessite pour cela une vibration comparable à celle de bétons courants de consistance dite « plastique ». Au décoffrage, un certain bullage apparaît parfois, conséquence de la viscosité du matériau frais.

Le maintien de la maniabilité peut être de courte durée, si on n'a pas anticipé sur ce problème lors de la formulation (De Larrard,1988). L'obtention d'une durée pratique d'utilisation supérieure à une heure est cependant tout à fait possible figure (1-15), en utilisant éventuellement un retardateur de prise, lorsque, par exemple, le ciment contient des aluminates en proportion importante. Signalons la relative inadaptation des moyens classiques pour l'appréciation du comportement rhéologique des BHP à l'état frais : le cône d'Abrams et le maniabilimètre LCL donnent des résultats peu corrélés pour ces matériaux. Il est sage, en l'absence de moyen spécifique, il faut pratiquer les deux types d'essais, pour avoir une idée de la consistance des bétons testés. De Larrard a trouvé la composition d'un béton THP qui est la suivante, tableau (1-1)

**Tableau 1-1** : Composition d'un béton THP en kg/m<sup>3</sup> [19].

Granulats du Boulonnais (calcaire concassé)			Sable de Seine	Ciment CPA 55 HTS	Fumée de silice	Fluidifiant N.S.	Eau	E/C
854	411	326	326	421	42,1	7,59	112,3	0,27



**Figure 1-15:** L'évolution du temps d'écoulement au maniabilimetre et l'affaissement au cône d'Abrams du béton THP pendant l'heure qui suit le coulage (essai à 20C°)[19].

## 1-6-2 Comportements à l'état durcis

Les propriétés mécaniques d'un béton sont essentiellement liées à sa structure et à la nature de ses liaisons inter-particulaires. Le béton à hautes performances a des caractéristiques mécaniques supérieures à celles d'un béton ordinaire, lesquelles sont obtenues grâce à plusieurs facteurs. Les différences les plus importantes apparaissent dans la résistance à la compression, flexion et à la ténacité.

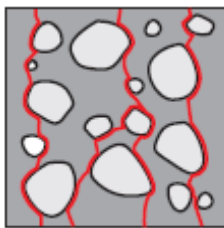
### 1-6-2-1 Résistance à la compression

Lorsqu'un béton doté d'une résistance normale est comprimé, les fissures d'adhérence entre la matrice de mortier et le granulat se propageront autour des granulats. A un niveau proche de la résistance à la compression, ces fissures d'adhérence se propageront à toute la matrice de mortier, entraînant l'apparition de fissures dans le mortier. En définitive, le béton cèdera sous l'effet de tout un réseau de fissures ininterrompues dans le mortier, alors que les granulats ne subiront aucun dommage (figure 1-16).

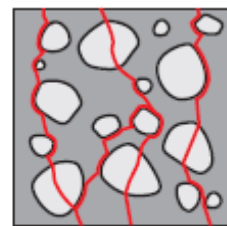
Le béton à hautes performances se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice sera pratiquement égale à la

résistance des granulats. Dès lors, l'apparition et le développement de fissures d'adhérence ou de microfissures seront retardés. A l'approche de la rupture, les fissures se seront désormais généralement propagées au travers des granulats (figure 1-17).

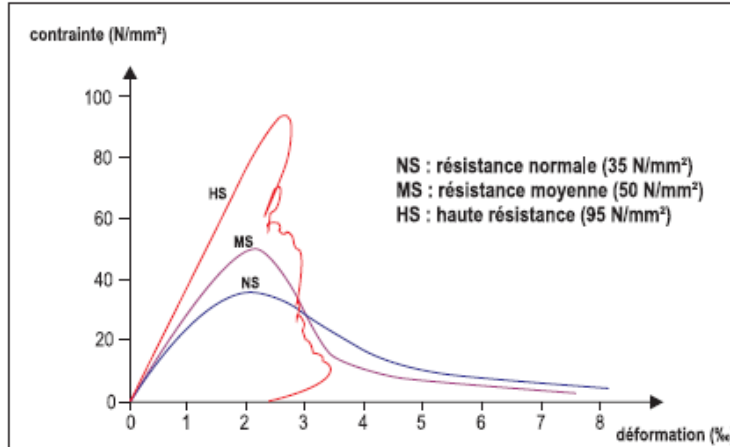
Sur le diagramme contrainte - déformation (figure 1-18), ce phénomène s'exprime par un comportement légèrement plus linéaire par rapport au béton de résistance conventionnelle. De même, le béton à hautes performances présente un retrait plus marqué après l'obtention de la résistance à la compression, c'est-à-dire après la rupture du béton, et la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro. Le BHP présente en d'autres termes un comportement de rupture fragile plus marqué que le béton de résistance conventionnelle.



**Figure 1-16 :** Béton ordinaires : fissures d'adhérence et fissures dans le mortier [5].



**Figure 1-17** Béton à hautes performances : les granulats sont également fissurés [5].



**Figure 1-18:** Diagramme contraintes- déformation [5].

La cinétique de monter en résistance est notablement plus rapide que celle des bétons classiques, voir tableau (1-2). Ceci résulte la proximité initiale des grains de ciment dans le béton frais ainsi que du rôle accélérateur de la fumée de silice. La précocité des résistances dépendra dans la pratique dans la nature (teneur en aluminates, finesse de mouture), du dosage en ciment et de la teneur éventuelle en retardateur de prise, ainsi que, bien sur, de la température du béton.

**Tableau 1-2:**L'évolution des caractéristiques mécaniques [19].

Caractéristiques mécaniques	1j	3 j	7j	14j	28j	90j	1 an
En compression (MPa)	27.2	72.2	85.6	92.6	101.0	109.6	114.1
En traction (MPa)	2.2	5.4	6.4	6.4	6.5	-	-

La résistance de tous les bétons augmente à long terme, concernant la résistance en compression est conventionnellement bornée par les règlements à  $f_{c28}$  dans des justifications concernant la limitation des contraintes et la résistance des sections. Cependant les règlements BAEL et BPEL prennent en considération les performances du béton

Pour les bétons ordinaires  $f_{c28} < 50\text{MPa}$

$$f_{cj} = \frac{j}{4,76 + 0,83j} f_{c28} \quad (1-9)$$

Par contre pour les bétons HP  $f_{c28} > 50\text{MPa}$

$$f_{cj} = \frac{j}{1,4 + 0,95j} f_{c28} \quad (1-10)$$

### 1-6-2-2 Comportement en traction

Généralement, la résistance à la traction du béton est liée à la résistance à la compression. En ce qui concerne le béton conventionnel, différentes formules sont appliquées. Dans la norme EN 1992-1-1:2004, une formule différente est proposée pour le béton à haute résistance par rapport au béton conventionnel tableau (1-3). Un élément essentiel est cependant le caractère fragile du béton à hautes performances, signalé ci-dessus. Dès que la résistance est atteinte, la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro.

**Tableau 1-3 :** Le béton à haute résistance par rapport au béton conventionnel [5].

	Classes de résistance													
	↳ bétons à haute résistance													
$f_{ck}$ résistance caractéristique en compression sur cylindre [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ résistance caractéristique en compression sur cube [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
$f_{cm}$ résistance moyenne en compression [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
$f_{ctm}$ résistance moyenne en traction directe [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$E_{cm}$ module d'élasticité secant [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
$\varepsilon_{c1}$ déformation au pic de contrainte [%]	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8



### 1-6-2-3 Rigidité

La connaissance du module d'élasticité du béton revête une grande importance pour un concepteur quand il lui faut calculer des déformations de ses différents éléments structuraux.

Il est difficile de mesurer, directement le module élastique d'un béton, car il faut enregistrer à la fois la charge appliquée et la déformation générale par cette charge pour cela, les chercheurs ont essayé de trouver des relations empiriques permettant de calculer le module élastique d'un béton en utilisant un théorème ou en utilisant une formule empirique qui relie ce module élastique à la résistance à la compression.

Le module d'élasticité du béton est essentiellement déterminé par les propriétés des granulats et de la matrice de mortier. Au fur et à mesure que la matrice se consolide et se rigidifie, le béton présentera également une rigidité accrue. Le module d'élasticité du béton à hautes performances est dès lors toujours lié à la résistance à la compression tableau (1-3).

Selon (Hashin 1962) [37]. les expressions mathématiques issues des théories de l'homogénéisation, qui montrent le rôle des trois paramètres essentiels : Volume des granulats ( $g$ ), module de la pâte ( $E_p$ ) et module du granulat ( $E_g$ ) sur le module du béton ( $E$ ).

$$E = E_p [(1-g)E_p + (1+g)E_g] / [(1+g)E_p + (1-g)E_g] \quad (1-11)$$

Le module de la pâte sera conditionné par sa compacité. Les termes  $g$  et  $E_g$  sont peu variables quand on passe d'un béton classique à un béton THP. D'où une croissance assez modérée du module, qui peut atteindre de 40 GPa .

Une autre formule a été proposée par :Carasquillo, Nilson, et Slate :

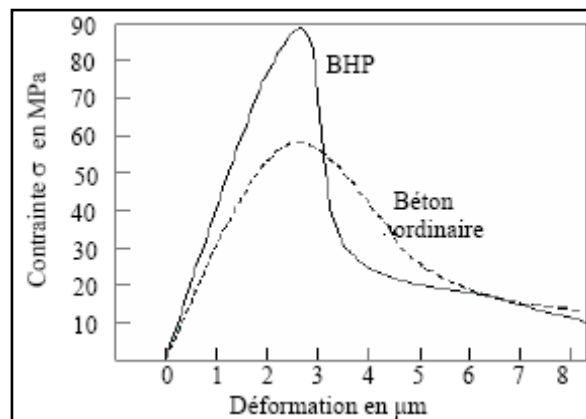
$$E_c = 3320 \sqrt{f_c} \pm 6900 \text{ MPa} \quad (1-12)$$

### 1-6-2-4 Comportement du béton sous compression uni axiale

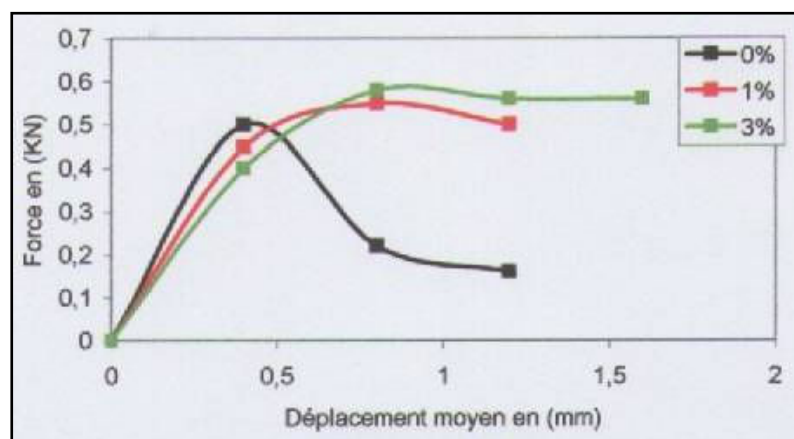
C'est évidemment le mode de travail normal du matériau. Avant la rupture, la relation contrainte- déformation est très linéaire figure (1-19). Au pic des contraintes, la déformation plastique ne représente que 15% de la déformation totale, contre 29% pour le béton témoin. Selon la définition de Rossi (De larrard et al.1992) [38]., le BTHP serait donc

plus fragile en tant que matériau. L'allongement au pic de contrainte est un peu plus important que pour un béton ordinaire.

Plusieurs chercheurs ont examiné le comportement du béton en post – rupture Ainsi (Xie et al.1995) [39]. Ont démontré que les courbes contraintes- déformations d'un béton normal et un béton à hautes performances sont identiques, seulement la partie descendante de la courbe pour les BHP est plus prononcée avec l'augmentation de la résistance. Cette dernière constatation pénalise les bétons à hautes performances par une faible ductilité, ce qui veut dire que les BHP sont des matériaux fragiles, cependant cet écart de comportement pourrait être réduit en augmentant le pourcentage des armatures transversales, figure (1-19).



**Figure 1-19 :** Comparaison de la courbe contrainte- déformation d'un béton ordinaire avec un béton à haute performance [39]



**Figure 1-20 :** l'effet de pourcentage d'acier sur la ductilité du béton à haute performance [38]

### 1-6-2-5 Le retrait

Le retrait est principalement dû à l'évaporation de l'eau du béton, au contact de l'atmosphère.

De façon générale, l'eau existe dans le béton dans les états suivants :

- sous forme de gel dans les sels hydratés.
- en fermée dans les petits interstices sous forme capillaire.
- libre dans les vides les plus importants entre les granulats et la pâte.

Le processus du séchage de l'eau dans le béton est le suivant : lorsque le béton sèche, l'eau s'évapore d'abord à la surface des tubes capillaires ; il en résulte un accroissement de la courbure du ménisque de capillaire, et une tension qui attire l'eau des vides les plus importants ; qui se déplace vers les capillaires. Ce processus se répète, le béton se dessèche de plus en plus au voisinage de la surface. Au fur et à mesure il recule des ménisques intérieurs, les gels d'hydratation arrivent au contact direct avec l'atmosphère.

A priori, on pourrait penser que pour un béton qui contient une grande quantité de pâte de ciment et d'eau, les pores capillaires sont nombreux et le séchage est accéléré.

Dans le béton à haute résistance, la réaction chimique de la chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  avec la silice  $\text{SiO}_2$  donne naissance à un silicate du calcium  $\text{CaOSiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$ . Ce silicate, qui remplit les pores capillaires réduit leur volume libre, ce qui évite la migration de l'eau et le séchage des gels. Par conséquent, la déformation de retrait est réduite.

D'après Chaid et al : Le retrait total des bétons avec ajouts cimentaires, mesuré sur éprouvettes 7 x 7 x 28 cm, est plus faible que celui mesuré sur celles de béton de référence figure (1-21). Cependant, le béton avec ajout de calcaire se comporte mieux. Ce fait, est du en particulier à la grande finesse de cet ajout, qui avantage la densification dès les premières échéances et diminue par conséquent le retrait.

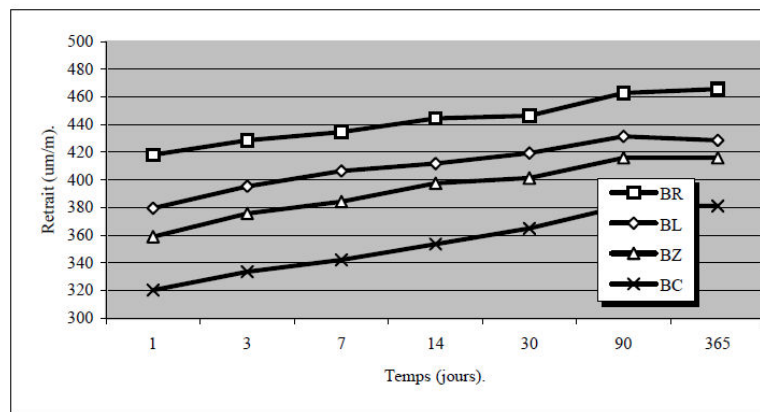


Figure 1-21 : Évolution des retraits des différents bétons [8].

### 1-6-2-6 Le fluage

Le fluage du béton à hautes performances – c'est-à-dire la déformation croissante sous l'effet d'une contrainte constante – est fréquemment inférieur au fluage observé pour un béton de résistance conventionnelle. L'âge du béton au moment de la sollicitation est également extrêmement important pour le BHP. Lorsque la charge est exercée sur un béton jeune, la déformation par fluage sera plus importante que dans le cas d'un béton plus âgé. Il en va de même en ce qui concerne le béton conventionnel.

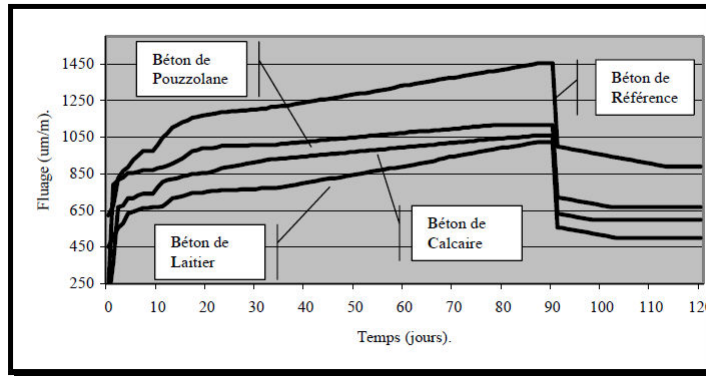
La norme EN 1992-1-1:2004 définit les formules nécessaires au calcul du fluage ; le tableau (1-4) mentionne quelques résultats. Il en ressort par exemple que le coefficient de fluage d'un béton de classe de résistance C 25/30 est environ trois fois supérieur à un béton de classe de résistance C 90/115 pour une humidité relative de 50 %. Il convient cependant de conserver à l'esprit que les contraintes observées dans le BHP sont nettement supérieures à celles inhérentes au béton conventionnel. Les déformations immédiates peuvent dès lors devenir aussi importantes – en fonction, bien évidemment, de la résistance à la flexion, dans le cas d'une poutre par exemple. Il va sans dire que ce phénomène est encore renforcé à long terme par le biais de l'utilisation d'un coefficient de retrait. En cas de constructions en BHP, la limitation des déformations et des flèches peut devenir le facteur déterminant du projet, plutôt que la portance proprement dite. Ce faisant, le matériau ne peut pas toujours être utilisé de manière optimale.

**Tableau 1-4 :** Coefficient de fluage (\*) en fonction de  $f_{ck}$ , de l'humidité relative (HR) et du délai de mise en charge suivant la NBN EN192-1-1[5]

$f_{ck}$		20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
HR = 50 %	mise en charge après 5 jours	3,91	3,60	3,21	2,82	2,52	2,27	2,08	1,91	1,77	1,55	1,38	1,25
	10 jours	3,62	3,34	2,97	2,61	2,33	2,11	1,92	1,77	1,64	1,44	1,28	1,16
	15 jours	3,44	3,17	2,82	2,48	2,21	2,00	1,83	1,68	1,56	1,36	1,22	1,10
	20 jours	3,30	3,04	2,71	2,38	2,12	1,92	1,75	1,61	1,50	1,31	1,17	1,05
	30 jours	3,10	2,85	2,54	2,23	1,99	1,80	1,64	1,51	1,40	1,23	1,09	0,99
	50 jours	2,84	2,62	2,33	2,05	1,83	1,65	1,51	1,39	1,29	1,13	1,00	0,91
HR = 80 %	mise en charge après 5 jours	2,69	2,48	2,24	2,00	1,82	1,66	1,54	1,43	1,34	1,20	1,08	0,99
	10 jours	2,50	2,30	2,07	1,86	1,68	1,54	1,43	1,33	1,25	1,11	1,00	0,92
	15 jours	2,37	2,18	1,97	1,76	1,60	1,46	1,35	1,26	1,18	1,05	0,95	0,87
	20 jours	2,27	2,09	1,89	1,69	1,53	1,40	1,30	1,21	1,13	1,01	0,91	0,845
	30 jours	2,13	1,97	1,77	1,59	1,44	1,32	1,22	1,14	1,06	0,95	0,86	0,78
	50 jours	1,96	1,80	1,62	1,45	1,32	1,21	1,12	1,04	0,98	0,87	0,79	0,72

(\*) hypothèses pour le calcul : épaisseur fictive = 100 mm, ciment rapide (R), à long terme

D'après Chaid [8], les bétons avec ajouts cimentaires présentent des déformations aux retraites et un fluage plus faibles par comparaison avec le béton de référence figure (1-22).



**Figure 1-22** Évolution du fluage des différents bétons. [8]

### 1-6-2-7 Fragilité et la ductilité

La fragilité du béton caractérise sa capacité à atteindre la rupture en ne subissant qu'un minimum de déformation.

A chaque fois la résistance d'un BHP augmente, le caractère de ce matériau sera fragile

La surface de rupture des bétons HP et THP montre que les fissures traversent indifféremment la pâte et les granulats, il y a donc une certaine parenté avec le caractère des matériaux fragiles.

Ce caractère fragile, c'est à dire non ductile, pourrait être préoccupant, car les méthodes de dimensionnement modernes reposent entre autres sur les théories de la plasticité des matériaux et prennent en compte leur comportement non-linéaire. Ceci est particulièrement vrai pour les structures soumises aux séismes, aux chocs ou à des déformations imposées.

Les essais de rupture en flexion d'éléments en BHP armé, confirment le fait que la ductilité réelle de ces éléments est équivalente à celle d'éléments en béton armé ordinaire.

Le caractère fragile des bétons sous compression est éliminé par la présence:

- d'armatures longitudinales, qui permettent un report de l'effort sur l'acier évitant ainsi une rupture quasi-instantanée de l'élément.

- d'armatures transversales, qui empêchent ou retardent le flambement des armatures longitudinales lorsque la résistance du béton est épuisée.

---



---

**1-6-2-8 Microstructure des bétons à hautes performances :**

FERET, 1897 a exprimé la résistance à la compression par la relation suivante :

$$f_{c28} = \frac{K_g \cdot R_{c28}}{\left(1 + \frac{3,1E/C}{1,4 - 0,4e^{(-11S/C)}}\right)^2} \dots\dots\dots (1-13)$$

$f_{c28}$  : La résistance moyenne de compression à 28 jours.

E, C et S : sont les poids respectifs d'eau, de ciment et de fumée de silice au m<sup>3</sup> de béton.

$R_{c28}$  : est la classe vraie de ciment.

$K_g$  : est un paramètre dépendant de la qualité des granulats (pour les granulats courants, la valeur  $K_g = 4,91$  conduit à des résultats corrects).

La réduction du rapport E/C entraîne une augmentation de la résistance, il y a cependant une limite à ce rapport qui est liée à la maniabilité du béton frais. Lors de la formulation des bétons H.P, on réduit le dosage en eau par étalement de la partie fixe de leur granularité et par ajout de super plastifiant ou des hauts réducteurs d'eau; cet état initial explique pour un large part la microstructure du béton durci.

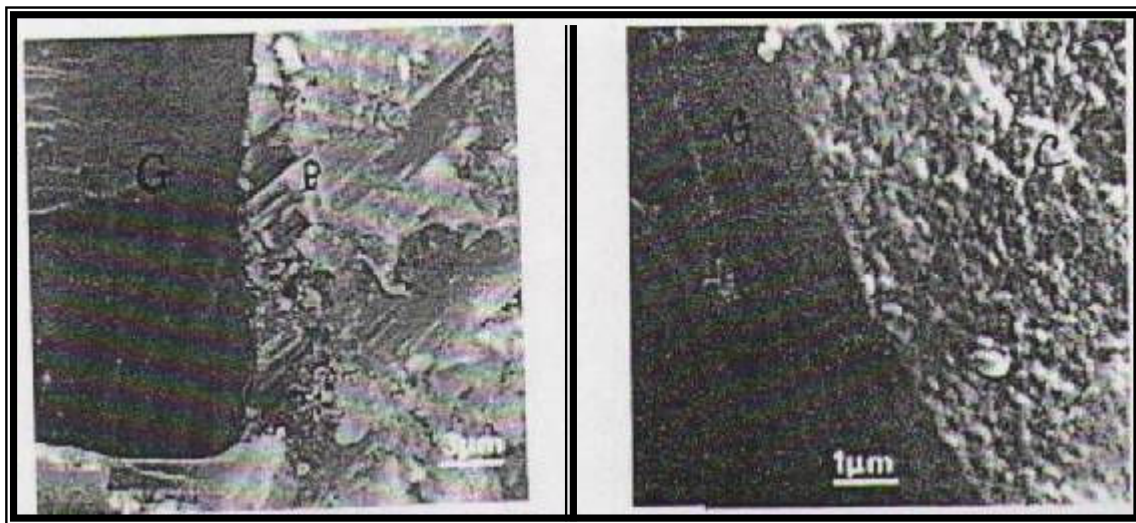
L'utilisation des fluidifiants pour une meilleure dispersion des particules solides permet une réduction du rapport E/C. Des études en résonances magnétique nucléaire du proton ont montré que le fluidifiant s'absorbe sur les particules solides formant des pellicules dans lesquelles les molécules d'eau gardent une grande mobilité. A l'effet pelliculaire s'ajoute celui de la dispersion des particules solides, les deux créant une meilleure rhéologie de suspension.

Si on s'intéresse aux volumes non solides (liquide ou gaz) du béton durci et en affinant progressivement l'échelle d'observation, on trouve les vides suivants :

- Les bulles d'air occlus entraînées lors de malaxage du béton en faible quantité du fait de la fluidité du béton H.P.
- Les interfaces pâte- granulats : les caractéristiques pâte de ciment - granulat comprennent la surface de fracture, la fissuration, la composition et la texture des hydrates.
- Sur la surface lisse des granulats le dépôt d'hydrates est composé d'un film de Ca(OH)<sub>2</sub> et de fibre de silicate C-S-H, ce dépôt n'est liée que très faiblement aux granulats et se détache facilement.

- Les vides constitués des vestiges des espaces inter granulaire de la pâte fraîche: ces interstices sont incomplètement comblés par les hydrates du fait de la contraction et de la non-combinaison d'une partie de l'eau de gâchage, mais l'eau libre est en quantité très limitée dans les bétons H.P et T.H.P grâce au faible dosage initial. Par ailleurs dans cette gamme de rapports E/C, la quantité d'hydrates est probablement plus faible que dans un béton ordinaire ayant le même dosage en ciment.

- Les vides présents dans la structure et même dans des hydrates: ces vides sont à l'échelle de nanomètre.



**Figure 1-23:** Interface pâte de ciment- granulats cristaux de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  orientés (P) sur le granulats [40]

En fin la microstructure des bétons à hautes et à très hautes performances est très dense et globalement amorphe, et elle comporte un volume inhabituel de grains anhydres (restes de ciments non combinés par manque d'eau disponible). En plus les interfaces pâte- granulats sont peu poreux et ne présentent pas l'accumulation de cristaux de chaux.

#### 1-6-2-9 DURABILITÉ DES BHP

Etant donné la structure plus dense des pores du béton de hautes performances, ce matériau affiche un meilleur comportement face aux mécanismes d'agression. La plupart des processus de dégradation sont en effet causés par l'entrée de substances agressives, telles que des

---

---

chlorures, du dioxyde de carbone, des acides,... Si la pénétration de ces substances dans le béton est entravée, comme dans le cas du BHP, les processus de dégradation y afférant ne pourront bien évidemment se produire que bien plus tard. Quoi qu'il en soit, il convient toujours de veiller à la pureté des éléments constitutifs du béton, afin d'éviter toute agression par des mécanismes internes (présence de sulfates, d'alcalis, de granulats réactifs, ...). Toutefois, la durée d'utilisation d'une construction est en grande partie également déterminée par les conditions d'exécution. Dans ce cadre, nous avons déjà fait allusion ci-dessus au risque de fissuration prématurée résultant des effets thermiques et du retrait (principalement endogène). La présence de telles fissures peut influencer sensiblement la durabilité de la construction.

Les principaux mécanismes de dégradation du béton sont [41]:

- Les altérations chimiques purement externes (solution acide, eaux contenant des ions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , eau de mer, ... etc) qui sont étroitement liées aux actions physico-chimiques, physiques et même mécaniques. En pratique, il n'est pas possible de séparer ces actions qui agissent simultanément ou successivement et de ne tenir compte que de l'une d'entre elles en négligeant les autres. La durabilité soulève donc des problèmes d'une grande complexité.

D'après l'étude de (Lévy ,1990) [42] le comportement global du B.H.P vis à vis des ions agressifs, lorsqu'il n'est pas fissuré devrait être très satisfaisante grâce à une faible teneur en chaux et à sa faible perméabilité.

Les altérations internes, dû à la formation de gel de silicate expansif au cours des réactions d'hydratation des alcalins ( $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{Na}_2\text{O}$ ).

La nature et la qualité du liant jouent un rôle très important dans la durabilité, dans ce sens, de nombreuses recherches ont montré qu'il y a une amélioration de la résistance des bétons à hautes performances aux agressions dû à la réaction alcalis - granulats.

Cette amélioration est liée à :

- Une structure poreuse fine et discontinue qui réduit les diffusions ioniques à travers la matrice et de l'interface pâte du ciment- granulats.

- Une réduction de la teneur en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  par l'effet pouzzolanique des ultrafines.

- Une réduction des ions  $\text{OH}^-$  dans la solution interstitielle (Lévy, 1990) [42].

Les altérations dû à la carbonatation du béton qui peut avoir soit un effet bénéfique par l'augmentation de la résistance en compression (couche superficielle dense de microcristaux de calcite) soit un effet néfaste par la diminution du PH de la solution interstitielle et la dépassivation des armatures.



Un mode opératoire fiable a été mis au point pour caractériser la durabilité des bétons vis à vis de la carbonatation.

D'après les résultats de (Aitcin, 2001) il apparaît clairement que la durabilité vis à vis de la carbonatation des bétons à hautes performances ( $R_c 28 = 65 \text{ Mpa}$ ) est très nettement supérieure à celle d'un béton ordinaire d'ouvrage d'air ( $R_c = 40 \text{ Mpa}$ ). En effet la pénétration des molécules d'anhydride carbonique est quasiment nulle dans le cas du B.H.P, béton dont la compacité est bien meilleure que celle d'un béton plus ordinaire.

D'après les études de Aitcin la résistance à l'abrasion peut devenir un facteur critique de conception dans certains ouvrages en béton : pavages, zone d'accélération et de freinage aux abords des péages et des tunnels urbains, de même que dans certaines parties d'ouvrages hydrauliques tels que les déversoirs, les bassins de dissipation et les piles de pont qui sont soumises à l'action de l'eau contenant des sédiments en suspension. On ne sait pas beaucoup préoccupé jusqu'à présent la résistance à l'abrasion du béton. Des expériences ont clairement démontré que la résistance à l'abrasion du BHP est très bonne, non seulement en raison de la grande résistance du béton, mais aussi de la bonne adhérence entre les gros granulats et la matrice cimentaire, ce qui préserve la surface du béton d'une usure différentielle.

Concernant l'étude de feu sur le BHP, les essais montrent que : a une moins bonne résistance au feu que, les bétons usuels parce que sa très faible perméabilité qui ne permet pas la sortie de la vapeur provenant de l'eau de la pâte de ciment hydraté [43].

Plusieurs solutions ont déjà été mises en avant pour améliorer la résistance au feu d'un BHP [44]. Une option particulièrement astucieuse consiste à ajouter des fibres de polypropylène dans un BHP de façon que ces fibres fondent lorsque la température de béton s'élève et qui peut créer des canaux par où la vapeur d'eau qui s'y développe puisse être éliminée [45]. La pression de la vapeur d'eau qui s'établit juste derrière la surface du béton exposée au feu peut aussi être réduite de façon significative par la tendance des BHP à écailler sous l'effet du feu, en effet la disparition des fibres de plastique augmente la porosité d'un BHP.

Il faut enfin mettre l'accent sur le fait que la peau du béton joue un rôle critique en ce qui concerne la durabilité du béton en général et que tout effort déployé pour améliorer la peau du béton allongera le cycle de vie des structures en béton.

---

---

## 1-7 CONCLUSION

Dans cette partie de la recherche bibliographique on a présenté plusieurs ouvrages et articles qui alimentent notre thème de recherche et qui traitent particulièrement les principales propriétés des BHP et son utilisation mondiale ainsi que les diverses solutions proposées pour améliorer les caractéristiques de ces matériaux. Donc on peut dire dans ce chapitre que :

- Le rapport E/C des bétons à haute performance est beaucoup plus faible (0,25 à 0,35) que celui des bétons ordinaires (0,50 à 0,70).
- Lorsqu'on désire fabriquer un béton à hautes performances, il est très important de sélectionner avec soin les différents ingrédients que l'on utilisera. Lorsqu'on cherche à optimiser la composition d'un béton à hautes performances en un lieu donné, il s'agit donc de trouver le ciment ayant la plus faible réactivité rhéologique, c'est à dire celui qui fixera le moins d'eau de gâchage dans les instants qui suivent le malaxage, et de l'utiliser avec le fluidifiant qui entrera le moins en compétition avec les cristaux d'ettringite qui se forment dès que le ciment entre en contact avec l'eau. Malheureusement il n'existe aucun moyen théorique qui permette de prédire l'un ou l'autre de ces deux comportements.
- Le gros granulat idéal pour un béton à très haute résistance doit être très résistant à l'écrasement, avoir un module d'élasticité aussi voisin que possible de celui du mortier, de façon à minimiser les déformations différentielles au niveau de l'interface granulat/mortier, qui présente une surface favorisant l'adhérence du mortier et enfin, il ne faut pas diminuer la maniabilité du béton frais.
- On peut aussi atteindre des hautes résistances en compression en substituant une certaine fraction du ciment par des matériaux cimentaires supplémentaires .En plus a intérêt économique, cette option permet un meilleur contrôle des pertes d'affaissement puisque ces matériaux cimentaires sont beaucoup moins réactifs que le ciment portland surtout durant les premières heures qui suivent le malaxage, il sera préférable d'utiliser de la fumée de silice, mais jusqu'à 70 MPa, on peut s'en passer à la rigueur.
- La résistance du béton augmente en général avec : le module d'élasticité, et la concentration des granulats. Par contre elle diminue avec l'augmentation de la taille

des agrégats. L'effet de ces propriétés est généralement négligé, par contre la surface caractéristique des agrégats a une grande influence sur la résistance de l'interface pâte – agrégat ainsi que la résistance en compression du béton et plus ou moins sa résistance à la flexion.

- Le futur béton sera plus durable et sera plus développé pour satisfaire les besoins socioéconomiques réels avec le moindre d'impact possible sur l'environnement. Le coût d'un projet dans l'avenir devra incorporer non seulement les coûts économiques actuels que nous utilisons dans nos calculs actuels, mais aussi les coûts sociaux et environnementaux qui vont de l'extraction de la matière première, à son utilisation et aussi à son élimination à la fin de la durée de vie des structures.

## CHAPITRE 2

### LA COMPATIBILITÉ CIMENT/ SUPERPLASTIFIANT, MÉTHODES DE FORMULATIONS DES BHP

#### 2-1 COMPATIBILITÉ CIMENT /SUPER PLASTIFIANT

Le choix de ciment est évidemment crucial dans la fabrication d'un béton à haute performance, d'un point de vue résistance, et d'un point de vue rhéologique de la pâte de ciment avec un faible rapport E/C. En effet, étant donné les forts dosages en super plastifiant que l'on doit utiliser pour fluidifier les bétons à haute performance, de 5 à 15 L et même quelques fois plus, on s'aperçoit que pour des très faibles valeurs du rapport E/C, certains ciments développent des phénomènes de raidissement prématuré en présence des forts dosages en superplastifiant contenant des groupements sulfonâtes. Ce phénomène de raidissement de la pâte se traduit évidemment au niveau du béton par des pertes d'affaissement prématuré très difficile ou très coûteux à contrôler. Très souvent d'ailleurs, on éliminera l'utilisation de certains ciments commerciaux à cause de ce phénomène de perte d'affaissement prématuré puisqu'il sera très difficile, pour ne pas dire impossible, de maintenir un niveau de maniabilité suffisant au béton à un coût raisonnable (en terme de superplastifiant), pour qu'on puisse le mettre en place de façon satisfaisante avec les moyens de mise en place que l'on rencontre couramment dans les chantiers modernes. Dans quelques rares cas on a beaucoup augmenté le dosage en superplastifiant, cela n'a aucun effet sur la maniabilité du béton à haute performance ou encore cela ne fait qu'empirer la situation [46].

Parmi les facteurs qui influencent le plus, c'est la rhéologie des bétons de très faible rapport E/C, a été trouvé: la teneur en C<sub>3</sub>A, la teneur en C<sub>4</sub>AF, la finesse et aussi la solubilité des sulfates présents dans le ciment. L'expérience démontre aussi que tous les super plastifiants qui répondent aux normes d'acceptation pour ce type d'adjuvant n'ont pas tous la même efficacité lorsqu'il s'agit de disperser un ciment donné dans un béton à très faible rapport eau/ciment. Dans ce cas n'oublions pas que les superplastifiants sont testés en vue de leur acceptation dans des conditions qui sont loin d'être celles que l'on retrouve dans les

bétons à haute performance. Parmi les facteurs qui influencent le plus pour l'efficacité des superplastifiants on retrouve la position des sites sulfonâtes, la longueur des chaînes, le degré de réticulation et la nature du contre -ion qui a été utilisé pour neutraliser le super plastifiant.

La formulation des bétons superplastifiés dépend du comportement du couple ciment-superplastifiant. Ce comportement est en fonction de la réactivité du ciment d'une part, et de l'efficacité du super plastifiant d'autre part. Les données des auteurs font ressortir les différents paramètres qui conditionnent la rhéologie des bétons, des mortiers ou des coulis en présence du super plastifiant.

Ces paramètres dépendent:

- de la forme du sulfate de calcium (gypse, hémihydrate ou anhydrite) et sa proportion ajoutée;
- des teneurs en  $C_3A$  ;
- de la nature chimique du super plastifiant (polycondensat de naphthalène sulfone et de formaldéhyde, polycondensat de mélamine sulfonée et de formaldéhyde, à base de polymères acryliques, etc.) et surtout sa masse moléculaire; le type de contre ion présent dans le super plastifiant;
- les dosages en super plastifiant et le mode de son incorporation ;
- contre ion.

Pour essayer de résoudre ce problème de compatibilité ciment/superplastifiant lorsqu'il n'est pas trop aigu, on a tout intérêt à envisager l'utilisation d'un matériau cimentaire supplémentaire, de façon à réduire les coûts de production du béton à haute performance, d'une part mais aussi d'autre part, à mieux contrôler les pertes d'affaissement, puisque ces matériaux cimentaires supplémentaires sont beaucoup moins réactifs que les ciments dans la période qui suit le malaxage du béton. Evidemment, il faut que ces matériaux cimentaires supplémentaires soient disponibles à un prix intéressant.

La façon pratique pour l'étude du comportement rhéologique d'un ciment vis-à-vis d'un superplastifiant se fait par "la méthode des coulis". Elle permet de caractériser les interactions ciment-superplastifiant, et d'optimiser le choix et le dosage en superplastifiant pour chaque ciment pour détecter les risques de raidissement précoce liés à une incompatibilité de nature physico-chimique entre ciment et superplastifiant. Un grand avantage de cette méthode est sa simplicité permet d'alléger grandement le travail de formulation des bétons fluidifiés [47].

## 2-1-1 Couple Ciment -Superplastifiant

### 2-1-1-1 Influence des sulfates sur les comportements rhéologiques du ciment

Le ciment réagit dès qu'il est en contact avec l'eau. Parmi les réactions chimiques qui peuvent avoir lieu, la plus importante est celle qui fait intervenir l'aluminate tricalcique  $C_3A$  et le gypse, lequel est ajouté au ciment précisément pour régler sa prise. Le comportement du béton frais dépend, dans une large mesure de la cinétique de cette réaction. Plusieurs facteurs peuvent intervenir la nature du sulfate de calcium (gypse, héli hydrate, anhydrite).

Les sulfates jouent un rôle important lors de l'hydratation d'un ciment. Le contrôle de l'hydratation est lié à la quantité d'ions  $SO_4^{2-}$  en solution qui dépend elle-même de la solubilité du sulfate de calcium ajoutée au clinker. Le sulfate de calcium existe sous trois formes différentes:

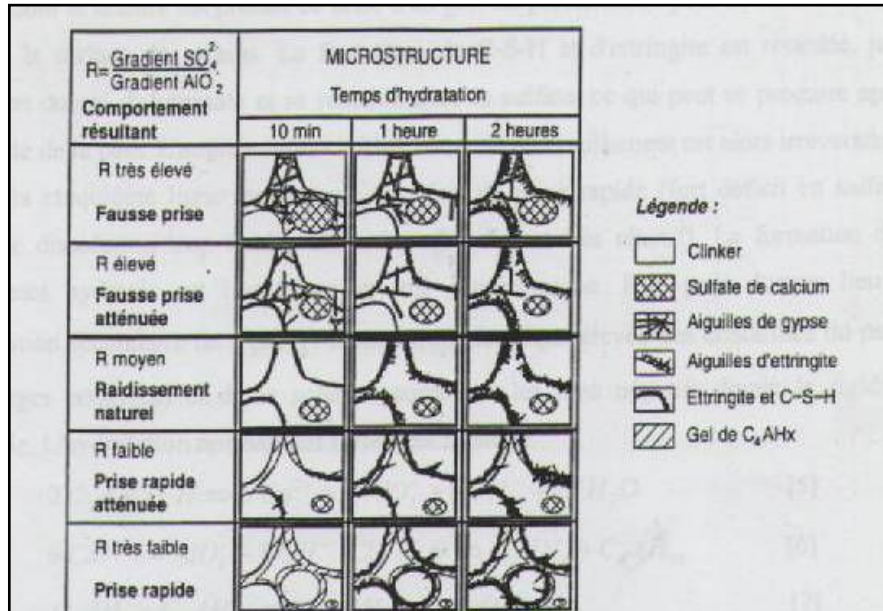
- le gypse naturel ( $CaSO_4, 2H_2O$ ) dont la dissolution est quasi instantanée lorsque sa surface spécifique est supérieure à  $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ;
- l'hémihydrate ( $CaSO_4, 1/2H_2O$ ) obtenu par déshydratation du gypse :  $150C^\circ$  à  $160C^\circ$  ;
- l'anhydrite naturelle ( $CaSO_4$ ) formée par déshydratation du gypse :  $600C^\circ$  à  $700C^\circ$ .

(Older et al, 1980) [48], ont étudié l'influence du sulfate de calcium, sous forme d'anhydrite, d'hémihydrate et de gypse sur l'hydratation du  $C_3A$ . Ils ont affirmé que l'ettringite est le premier produit à être formé lors de l'hydratation du  $C_3A$  en présence de sulfate de calcium, et que le taux de formation de cette ettringite est plus faible avec l'anhydrite qu'avec les deux autres formes du sulfate (gypse et héli hydrate). Cette différence peut être due au taux de dissolution de l'anhydrite qui est le plus faible. Leurs résultats ont montré que le temps du début de prise pour une même teneur en  $SO_3$  (3%) dépend de la nature du sulfate de calcium utilisé. Il est plus court avec l'héli hydrate (15 min). Cette prise rapide est reliée à la conversion en gypse. Il devient plus élevé avec l'anhydrite (115 min) et ensuite avec le gypse (180 mn). La prise est plus rapide et la demande en eau est plus grande avec l'anhydrite elles sont dûs à la formation d'une quantité significative de différents aluminates de calcium hydratés plutôt que d'ettringite.

Les résultats expérimentaux de (Atcinet al,) ont montré qu'une forte teneur en  $C_3A$  (30,1%) dans le clinker peut causer une fausse prise, voire une prise rapide. Lorsque la teneur en  $SO_3$  est faible (1,5% de  $SO_3$ ), une prise rapide a été observée (moins de 10 min). Elle est due à la formation de monosulfoaluminate de calcium hydraté. Une teneur en  $SO_3$  suffisante

(3 à 4,5%) conduit à une fausse prise qui est dûe à la formation d'une quantité importante d'ettringite.

La figure (2-1) montre l'évolution de la microstructure d'une pâte en fonction du rapport des gradients de concentration en sulfate de calcium et aluminat.



**Figure 2-1:** Evolution de la microstructure d'une pâte en fonction du rapport des gradients de concentration en sulfate de calcium et aluminat à l'interface solide liquide [4].

### 2-1-1-2 Influence de la température sur l'hydratation du ciment

La chaleur constitue un accélérateur de prise et de durcissement des ciments. La vitesse d'hydratation du ciment augmente avec la température; celle-ci modifie de façon importante les temps de prise du ciment, le tableau suivant indique l'influence de la température sur le temps de prise des ciments

**Tableau 2-1 :** Influence de la température sur le temps de prise des ciments [49].

Températures	5°C		10°C		20°C		30°C	
	Début de prise ± lh	Fin de prise ± lh	Début de prise ±lh	Fin de prise ±lh	Début de prise ±lh	Fin de prise ±lh	Début de prise ±lh	Fin de prise ± lh
52,5	7h 00	12h 00	5h 00	8h 00	3h 00	5h 30	2h 00	4h 00
42,5	9h 30	14h 30	6h00	10h 30	3h 30	6h00	2h 30	4h 30
32,5	10h00	15h30	7h00	11h30	4h00	7h00	3h00	4h30

L'influence de la température sur la prise du ciment peut dans certains cas, être plus marquée en présence d'adjuvant, comme le montre le tableau (2-2) réalisé sur mortier normalisé avec un dosage en plastifiant de 0,3% par rapport à la masse du ciment.

**Tableau 2-2** Influence de la température sur la prise du ciment en présence d'adjuvant [49].

	Témoïn (sans adjuvant)			Avec plastifiant		
Températures	5°C	10°C	20°C	5°C	10°C	20°C
Début de prise	7h 40	6h 05	3h 50	12h 00	7h 40	4h 50
Fin de prise	14h 40	11h 30	6h 45	16h30	13h 40	8h20

Des faibles variations sur le dosage de certains adjuvants (retardateur, plastifiant...) peuvent avoir des incidences très importantes sur les temps de prise, ont constaté que l'introduction d'un retardateur de prise dans les pâtes de ciment ne provoque aucune influence significative sur la prise à des températures élevées (40°C et 50°C).

### 2-1-1-3 Influence du dosage en superplastifiant

L'incorporation du superplastifiant dans le ciment conduit à une augmentation de la fluidité des pâtes de ciment.

L'augmentation de la fluidité est plus marquée pour de faibles dosages en superplastifiant [50], ont mis en évidence l'existence des trois plages de dosages influençant le maintien de la maniabilité du béton:

- Une plage de faibles pourcentages d'adjuvant inférieurs à 1% extrait sec, soit environ 5% de produit commercialisé. Dans cette plage, le maintien de la maniabilité est faible, sa durée maximale étant de 15 mn;
- Une plage de pourcentages élevés en adjuvant, en fonction des dosages en superplastifiant supérieurs à 1% et pouvant atteindre jusqu'à 3% en extrait sec. On constate ici un phénomène de fluidification du matériau hydraulique en fonction du temps. Cette fluidification passe par un dosage optimal en adjuvant lorsque la durée de maniabilité décroît, elle est accompagnée d'une désorption de superplastifiant ou encore d'une augmentation de la concentration de ce produit dans la solution interstitielle du mortier.



- Une plage de pourcentages très élevés en adjuvant. Les valeurs sont supérieures à 3 ou à 4% d'extrait sec. Dans cette plage, le maintien de la maniabilité est très faible.

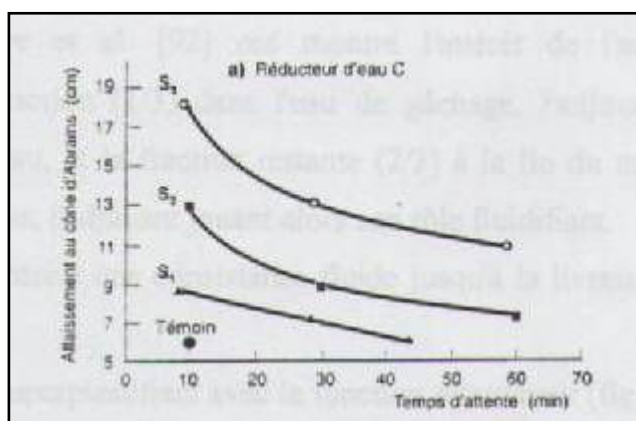
L'addition du superplastifiant conduit également à un retard de l'hydratation du ciment, donc à un ralentissement du dégagement de la chaleur d'hydratation et à une augmentation de la durée de prise, l'effet retardateur du superplastifiant est étroitement lié aux dosages de ce produit, il augmente graduellement lorsque la concentration en superplastifiant augmente. Ce retard est dû d'une part, à l'absorption du superplastifiant sur le C3A, ce qui empêche le contact de l'eau avec ce composé et d'autre part, à la formation des particules plus fines d'ettringite dont la texture est plus dense en présence de superplastifiant .

#### 2-1-1-4 Influence du contre ion

Les résultats de (Aitcin et al.) [51] ont montré que l'effet fluidifiant du polynaphtalène sulfonate dépend du type de contre -ion de ce superplastifiant. La présence des ions calcium diminue l'effet fluidifiant du NSF (naphtalène sulfonate formaldéhyde) par rapport aux ions sodium. En revanche, l'effet retardateur du superplastifiant est indépendant du type de contre -ion.

#### 2-1-1-5 Influence du mode d'introduction du superplastifiant

Le mode d'introduction du superplastifiant peut également influencer la fluidité des pâtes de ciment et la vitesse d'hydratation. Ceci est vrai pour les adjuvants en général et plus particulièrement pour les réducteurs d'eau. L'introduction d'un réducteur d'eau vers la fin de la période de malaxage augmente son efficacité aussi bien comme réducteur d'eau que comme plastifiant figure (2-2).



S1: au moment du chargement;  
S2 : 30 secondes après le début  
du premier malaxage  
S3 : à la fin de la période de repos.

**Figure 2-2** : Influence du moment d'introduction du plastifiant sur la valeur initiale de l'affaissement et sur la perte d'affaissement en fonction du temps d'attente [51].

(Dakhmouche et al., 2009) [15] ont observé que l'addition différée du superplastifiant (2 mn 30 après mélange eau- ciment) conduit à une augmentation de la fluidité.

(Paillere et al,1980 ) [52] ont signalé que les polymères de synthèse incorporés en différé (30 mn) et plus, après fabrication des mélanges hydrauliques) présentent un effet fluidifiant très élevé.

(Chiocchio et al. 1985) [53] ont rapporté que l'addition différée du superplastifiant( naphtalène sulfonate formaldéhyde ou mélamine sulfonate formaldéhyde (NSF ou MSF) de quelques minutes augmente la fluidité par rapport à une addition dans l'eau de gâchage, dans ce cas, la diminution de l'ouvrabilité en fonction du temps est faible et la nature du superplastifiant n'influence pas ce changement de fluidité au cours du temps. Le moment d'addition optimal est de deux minutes après le mélange eau- ciment. Il correspond au début de la période dormante de l'hydratation du ciment (sans adjuvant).

### 2-1-2-Méthode des coulis

Pour étudier la rhéologie des coulis de ciment, le groupe de recherche à l'Université de SHERBROOKE a conçu un appareil appelé rhéopompe figure (2-3) qui mélange de façon énergique un coulis composé d'eau, de ciment et de superplastifiant ou un autre adjuvant. La rhéologie du coulis de ciment est quantifiée par une simple mesure au cône de Marsh figure (2-4), c'est-à-dire par la mesure du temps que prend un litre de coulis ainsi préparé pour s'écouler à travers l'orifice inférieur du cône.



Figure 2-3 : Rhéopompe[4]



Figure 2-4 : Cône de Marsh [4]

Pour la formulation des BHP, (De Larrard et al.1996) [54] ont procédé à des essais sur coulis, en mesurant leur consistance à l'aide du cône de Marsh.

Les résultats obtenus à la rhéopompe n'ont jamais été mis en défaut à chaque fois qu'il a été fait en parallèle avec des essais de perte d'affaissement sur béton.

Le premier avantage de la méthode est d'être économique en main d'oeuvre et en matériaux, car la plupart des manipulations sont exécutés sur des coulis. Elle permet de caractériser les interactions ciment-superplastifiant, d'optimiser le choix et le dosage en superplastifiant pour chaque ciment et de détecter les risques de raidissement précoce liés à une incompatibilité de nature physico-chimique entre ciment et superplastifiant.

La nécessité de modifier certains aspects de cet essai, traditionnellement appliqué au coulis d'injection de précontrainte qui provient des pâtes du BHP qui sont généralement plus visqueuses. La gravité est alors souvent insuffisante pour vider complètement le cône, qui se bouche, alors qu'il contient encore du coulis. Par ailleurs, le rétrécissement de la surface libre entrain parfois la formation de "plis" qui perturbent l'écoulement. C'est pourquoi on a choisi de limiter le volume de pâte écoulé.

On cherche à aligner les temps mesurés de l'ensemble des coulis de référence en laissant le soin à l'opérateur de choisir l'ajutage et la contenance du flacon pour obtenir un temps de référence entre 5 et 15 secondes. On mesure dès la fin du malaxage le temps d'écoulement. Lorsqu'on désire voir son évolution en fonction du temps, on prendra le soin de remalaxer le mélange une minute avant chaque mesure. Ce dernier est gardé au repos dans un récipient et recouvert d'un film plastique pour éviter toute évaporation d'eau.

Le volume de coulis qui a été préparé doit être supérieur à celui du cône, car à chaque transvasement on perd une partie de la pâte [55].

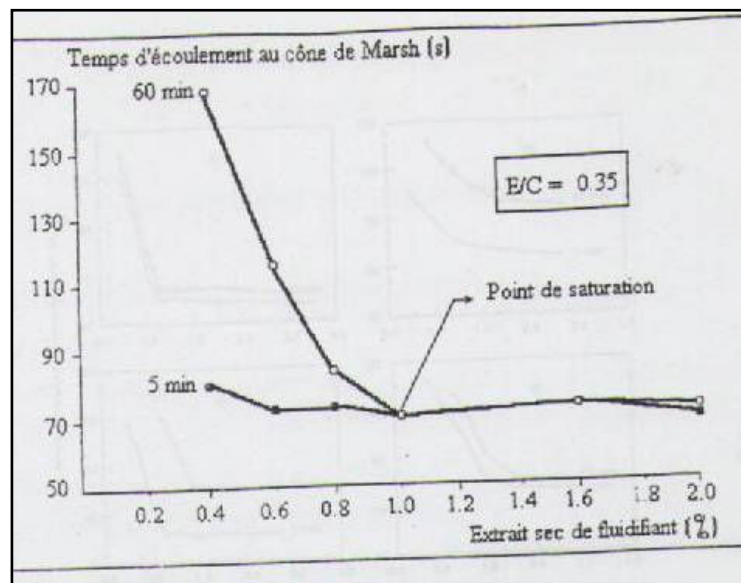
### **2-1-3 Evaluation de la compatibilité ciment-superplastifiant**

L'étude de la compatibilité ciment-superplastifiant peut se faire sur coulis en utilisant un essai d'écoulement du type cône de Marsh.

Les essais d'écoulement consistent à mesurer le temps d'écoulement d'un litre de coulis placé dans un cône muni d'un orifice dont le diamètre peut varier de 5 à 10 mm. Le coulis est préalablement vigoureusement malaxé mais il faut que nous soyons sûrs d'obtenir

un système bien défloculé. Le rapport E/C est choisi dans la plage 0,30 à 0,40 et on fait en général varier le dosage en fluidifiant autour d'une valeur moyenne de 1%, exprimé en terme d'extraits secs par rapport à la masse de ciment.

La fluidité du coulis est suivie pendant une heure. On se retrouve avec une courbe donnant la fluidité du système en fonction du dosage en superplastifiant juste après le malaxage du coulis et une heure après, figure (2-5) [55].



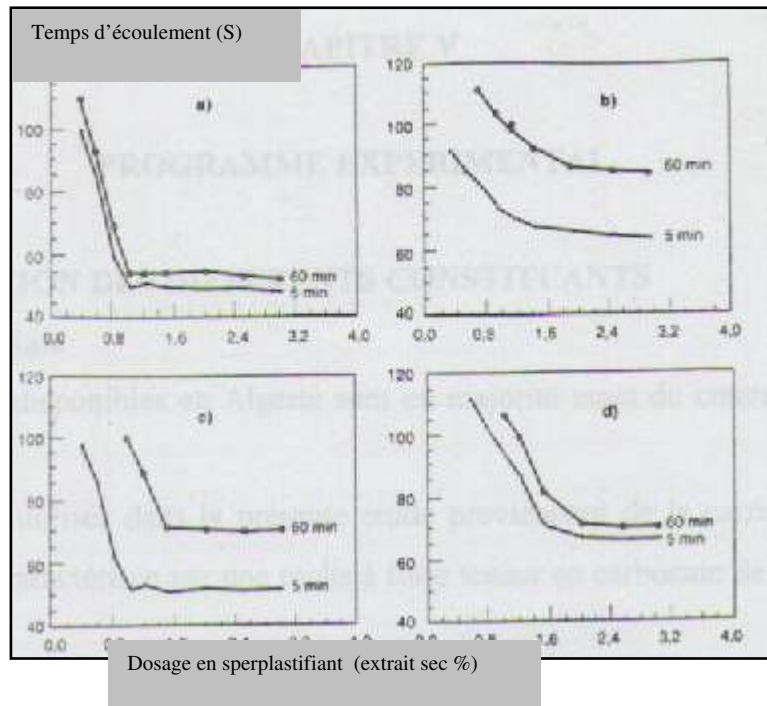
**Figure 2-5 :** Variation de la fluidité d'un coulis en fonction de son dosage en superplastifiant [55].

Le type de la courbe obtenue nous donne trois points essentiels qui gouvernent le comportement rhéologique de la combinaison ciment-superplastifiant étudiée :

- le dosage critique correspond au point de saturation (cassure dans la courbe);
- le degré de fluidité atteint pour ce dosage critique (temps d'écoulement);
- l'évolution dans le temps de la fluidité de la combinaison ciment-superplastifiant (position relative des deux courbes à 5 et 60 min).

Au-delà du point de saturation, il est inutile de rajouter du superplastifiant dans le coulis car on n'améliore pas la fluidité du coulis. Un excé de dosage risque de retarder indûment le durcissement du béton, pour créer un phénomène de ségrégation, tout ajout de superplastifiant au-delà du point de saturation est un gaspillage.

Lorsqu'on veut étudier la compatibilité ciment-superplastifiant, on peut se retrouver face à quatre situations, représentées schématiquement sur la figure (2-6).



**Figure 2-6 :** Caractéristiques rhéologiques des différentes combinaisons ciments - superplastifiants pour un coulis de rapport E/C de 0,35 testé à 22°C [55].

La figure (a) présente le cas d'une compatibilité parfaite entre le ciment et le fluidifiant: le dosage en plastifiant au point de saturation est relativement faible, en général il est compris entre 0,5 et 1% et le temps d'écoulement est faible, de 50 à 60S pour un coulis de rapport E/C = 0,35. La distance verticale entre la courbe d'écoulement à 5 et 60 mn est assez faible, traduisant ainsi l'inexistence de dégradation dans la rhéologie du coulis durant la première heure qui suit le malaxage;

La figure (b) représente au contraire le cas d'une incompatibilité: le point de saturation est nettement moins bien défini que dans le cas précédent, le dosage correspondant est beaucoup plus élevé, 1,5 à 2%, et la distance entre les courbes d'écoulement entre 5 et 60 mn est beaucoup plus grande. Dans certains cas, le coulis se fige dans les quinze premières minutes qui suivent le malaxage et il est alors impossible d'établir la courbe à 60 mn.

Les figures (c) et (d) représentent des cas intermédiaires. Dans la figure (c) on a le cas d'une combinaison ciment-superplastifiant qui présente un excellent comportement rhéologique à court terme, mais qui se dégrade dans le temps. Par contre, dans la figure (d), on est en présence d'une combinaison qui ne présente pas un excellent comportement rhéologique initial (dosage de saturation et temps d'écoulement élevés) mais dont la rhéologie ne se détériore pas dans le temps.

## 2-2 LES MÉTHODES DE FORMULATIONS DES BHP

Le problème de la formulation des BHP est plus complexe, où le nombre accru de paramètres (jusqu'à 4 ingrédients supplémentaires) qui sont susceptibles d'être introduits dans le matériau (adjuvant « super plastifiant », fumée de silice, et autres fines telles que cendres volantes, etc.). Pour une optimisation, il faudrait plusieurs gâchées.

On peut citer certaines méthodes utilisées sur un BHP

### 2-2-1 Loi de féret

René Féret a proposé une formule empirique utilisée à notre époque, pour les B.H.P à base de ciment et de silice. (Baron et. Lesage ,1969) [56], ont proposé une extension de cette loi.

$$f_{c28} = \frac{K_g \cdot R_{c28}}{\left(1 + \frac{3,1E/C}{1,4 - 0,4e^{(-11S/C)}}\right)^2} \dots\dots\dots(2-1)$$

$f_{c28}$  résistance maximale de compression à 28 jours.

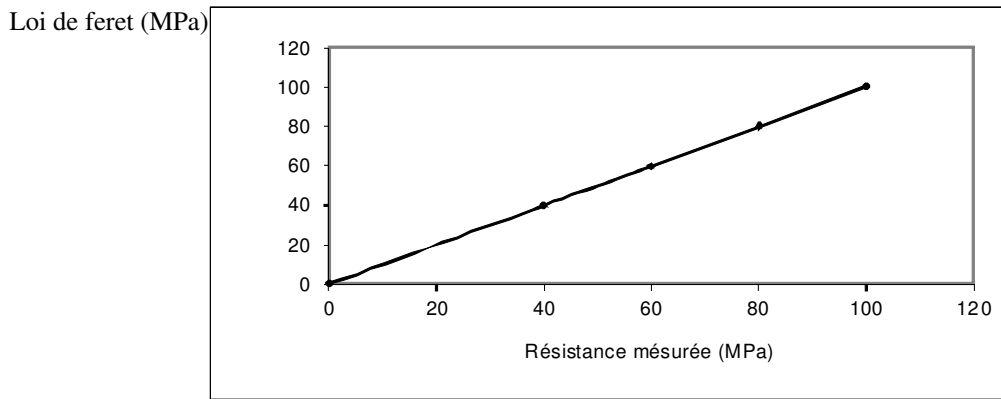
e, c, s : les poids respectifs d'eau, de ciment et de silice au m<sup>3</sup> de béton.

$K_g$  : paramètre qui est en fonction des granulats.

$R_{c28}$  classe vraie du ciment.

#### Remarque :

Dans les B.H.P  $E/C < 0,4$ , la précision de cette formule est de l'ordre de 5MPa, figure (2-7).



**Figure 2-7 :** Formule empirique utilisé pour les BHP [56].

### 2-2-2 La méthode ERNTROY et SHACKLOCK B. W. (1954):

Cette méthode s'applique à des bétons de ciment portant de plus de 40 MPa à 28 jours, fabriqués avec du gravier de forme irrégulière et de sable naturel, ou avec du granite concassé et du sable naturel.

Les auteurs de la méthode ont préparé des graphiques empiriques qui lient la résistance en compression simple à un nombre de référence arbitraire.

Les étapes de formulation d'un BHP sont :

1- On choisi le nombre de référence du BHP en fonction des performances, est indiqué sur la figure (2-8).

2 -Connaissant le nombre de référence du BHP, la grosseur maximale des granulats et l'ouvrabilité du béton, on détermine le rapport E/C requis sur la figure (2-9)

3- Sur le tableau (2-3) on détermine le rapport granulats/ciment, connaissant le rapport E/C, l'ouvrabilité du BHP, le type de gros granulats à utiliser et leur grosseur maximale.

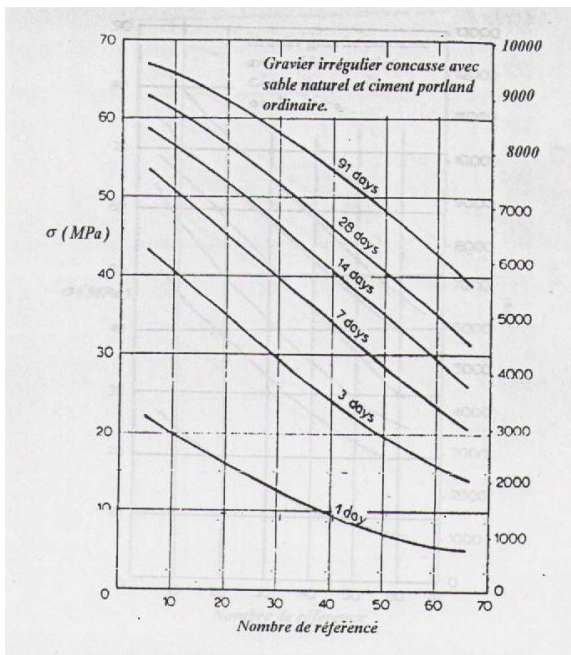


Figure 2-8 : Nombre de référence du BHP en fonction de la résistance[57].

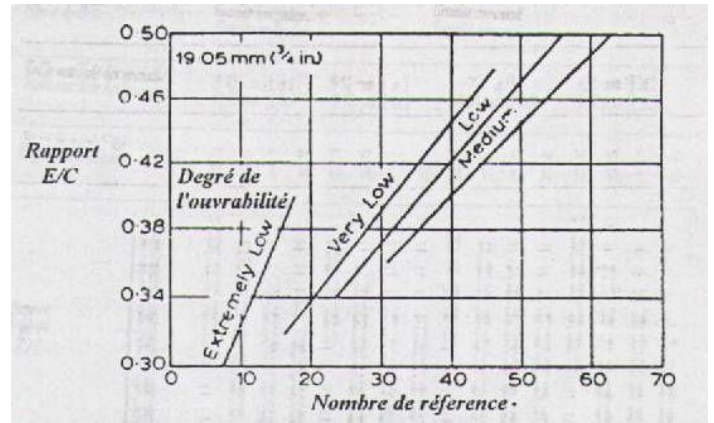


Figure 2-9 : Nombre de référence du BHP en fonction E/C[57].

Le tableau (2-3) indique le rapport G/S en fonction du degré de maniabilité et la nature des granulats pour divers rapports E/C,avec un ciment portland ordinaire.

Tableau 2-3 : Détermination G/C en fonction de (E/C et la maniabilité) [57]

Type d'agrégat	Gravier irrégulier				Gravier concassé			
	19 :05 (in)		19 :05 (in)		19 :05 (in)		19 :05 (in)	
Degrés de maniabilité	EL	VL	L	M	EL	VL	L	M
Rapport E/C :								
0,32	2,6				2,9			2,5
0,34	3,4	2,2			3,6	2,4		3,2
0,36	4,1	2,7	2,3		4,3	2,9	2,4	3,9
0,38	4,8	3,2	2,8	2,3	4,9	3,4	2,9	4,5
0,4	5,5	3,7	3,2	2,7	5,5	3,9	3,3	5,0
0,42		4,2	3,6	3,0		4,2	3,6	5,5
0,44		4,6	4,0	3,4		4,7	4,0	4,2
0,46		5,0	4,3	3,7		5,1	4,3	4,6
0,48		5,5	4,7	4,0		5,5	4,6	5,0
0,50			5,5	4,3			4,9	5,3

EL: Très très lent

VL: Très lent

L: Lent

M: Moyen



### 2-2-3 Méthode de formulation des B.H.P de l'institut Américaine du béton (A.C.I) (1984)

Cette méthode est très indicative, elle présente un mode opératoire pour sélectionner et mélanger dans des proportions données, les matériaux de base qui sont eux mêmes de bonnes performances pour la réalisation d'un B.H.P. Cette méthode est applicable pour des gros granulats aux alentours de 10-14 mm.

Etapes de détermination d'un B.H.P :

- La relation  $E/C = f_{tj}$  ( $f_c 28$ ) conçue pour les bétons ordinaires reste valable pour les B.H.P, alors il faut choisir un rapport E/C nécessaire pour obtenir les performances désirées.

- La quantité de ciment peut-être établie par gâchée d'essai, cependant les quantités déjà utilisées varient entre 392 et 557  $kg/m^3$  de béton.

- La proportion des granulats est importante du point de vue volume qu'ils occupent dans un B.H.P (jusqu'à 60% du volume absolu). Les granulats fins ont plus d'impact sur les B.H.P compte tenu de leur grande surface spécifique. La quantité optimale d'eau et de ciment dépendra des proportions relatives du rapport gros granulats/granulats fins et ceci pour obtenir affaissement et maniabilité donnés. On peut déterminer la quantité des gros granulats connaissant leur grosseur maximale et le module de finesse du sable tableau (2-4).

- Le dosage des ajouts minéraux (la fumée de silice) varie entre 10 et 14% du poids du ciment.

**Tableau 2-4 : Volumes des granulats par unité de volume [4]**

Module de finesse	2.40	2.60	2.80	3.00
Grosseur maximale des granulats (in)	Volume des granulats Par unité de volume		Par unité de volume	
3/8	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4	0.66	0.64	0.62	0.60
1	0.71	0.69	0.67	0.66
1/3	0.75	0.73	0.71	0.69
2	0.78	0.76	0.74	0.72
3	0.82	0.80	0.78	0.76
6	0.87	0.85	0.83	0.81

### 2-2-4 Méthode de DELARRARD (1988) (Méthode dite des coulis) :

C'est une méthode expérimentale de formulation des bétons ordinaires, et elle s'appuie sur la loi de FERET généralisée, qui permet d'évaluer la résistance moyenne à 28 jours.

La méthode s'appuie aussi sur le modèle classique de viscosité des suspensions de FARRIS d'un mélange à n classes granulaires.

Où

$$\eta = \eta_0 \frac{H(\Phi_1 / (\Phi_1 + \dots + \Phi_n + \Phi_0)) H(\Phi_2 / (\Phi_2 + \dots + \Phi_n + \Phi_0)) \dots H(\Phi_n / (\Phi_n + \Phi_0))}{\Phi_1 \Phi_2 \dots \Phi_n}$$

$\Phi_1 \Phi_2 \dots \Phi_n$  sont les volumes occupés par les classes de granulats, 1,2,...,n (n est un volume unitaire de la suspension )

- $\Phi_0$ : le volume du liquide dans le volume unitaire de suspension.
- $\eta_0$  : la viscosité du liquide seul.
- $H$  : une fonction de la variation de la viscosité relative d'une suspension.

Les étapes de cette méthode sont :

- On formule le BHP « 0 » de référence, en rajoutant au squelette de formule régionale 425 Kg de ciment et de l'équivalent de 1.5% ce fluidifiant en extrait sec, et on recherche le dosage en eau qui donnera un affaissement égal à 20 cm.
- La formulation du coulis de référence. Sa composition correspond à celle de la pâte du BHP « 0 », sans eau de mouillage. Des granulats (10L/m<sup>3</sup> de béton). Le temps d'écoulement au cône de MARSH entre 5 et 15 sec.
- On détermine la composition minérale des coulis HP, en faisant varier la nature du ciment, le taux de fumée de silice (entre 5 et 10%) et en prévoyant éventuellement une partie de fines.
- On détermine le dosage en super plastifiant des coulis HP Pour chaque coulis HP avec 0.3% de superplastifiant, on détermine la quantité d'eau nécessaire pour une consistance fluide, puis on mesure révolution des temps d'écoulement en fonction du dosage croissant en adjuvant ou superplastifiant
- On détermine le dosage en eau des coulis HP fluidifiés de façon à obtenir le temps d'écoulement de référence.

Ces BHP que l'on pourra confectionner avec ces coulis auront la même quantité de pâte et la même maniabilité.

**2-2-5 La méthode de PEDECHES (1988)**

L'auteur de cette méthode propose des courbes de résistances en fonction des dosages E/C et du liant, et ceci en tenant compte du critère économique.

Les étapes de cette méthode sont :

- 1- Etablir différents mélanges granulaires à partir des cinq classes suivantes : 0/0.5 ; 0.5/1.25 ; 1.25/3 ; 2.5/5 et 4/10 mm, pour concevoir des BHP avec quatre dosages en liant 250, 350, 500 et 600 Kg/m<sup>3</sup>.
- 2- Avec la méthode DREUX-GORISE, on détermine le mélange dosé à 500 Kg/m<sup>3</sup> de liant dont le sable 0/5 mm, figure (2-10).

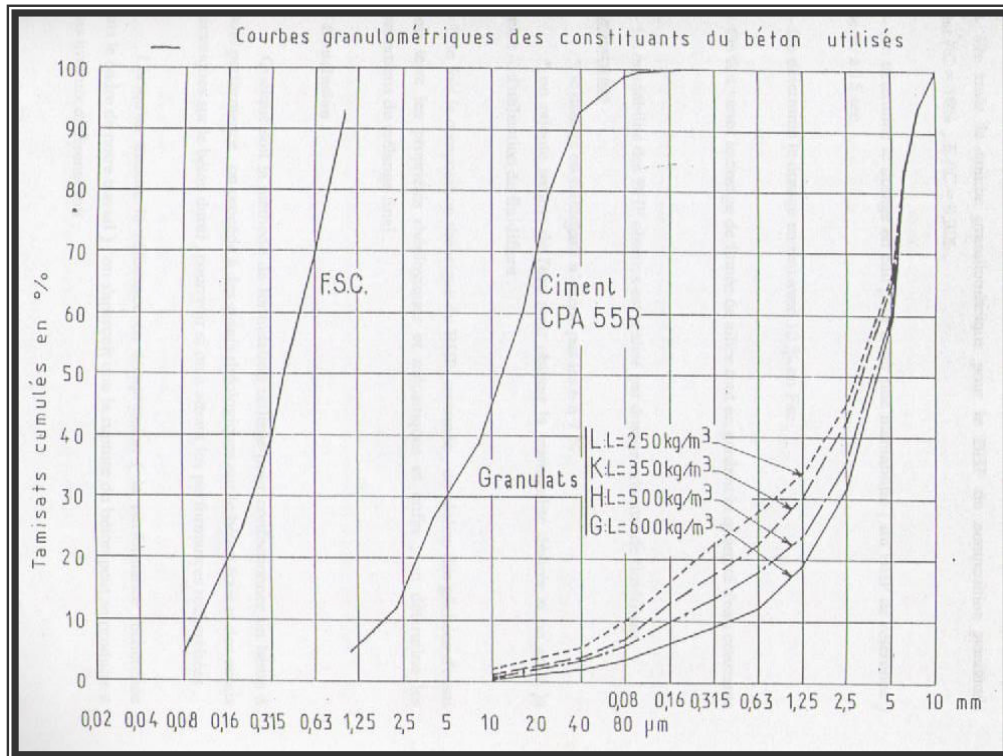
Remarque :

Le sable à un module de finesse impose égal à 3.

- 3- On trace la courbe granulométrique pour le BHP de composition pondérale  $F_{sc}/C=10\%$ ,  $E/C=0.305$ .
- 4- On détermine le dosage en eau pour avoir une maniabilité (du BHP de référence) de 10 à 15 sec.
- 5- On détermine le dosage en eau avec 10% en fumée de silice.
- 6- On fait varier le dosage de fumée de silice tout en gardant la quantité d'eau constante.
- 7- La maniabilité des BHP obtenus est réalisée par dosage adéquat de fluidifiant

Remarque

- Le dosage en fluidifiant ne dépasse pas les 6 à 7 %.
  - On rajoute parfois de l'eau pour obtenir la maniabilité désirée si on est à la limite d'utilisation du fluidifiant.
- 8- Une fois la composition théorique du BHP terminée, on réalise des gâchées d'essai on teste les propriétés rhéologiques et mécaniques et enfin, on détermine les proportions du mélange final.



**Figure 2-10** : Détermination des mélanges selon DREUX-GORISE [58]

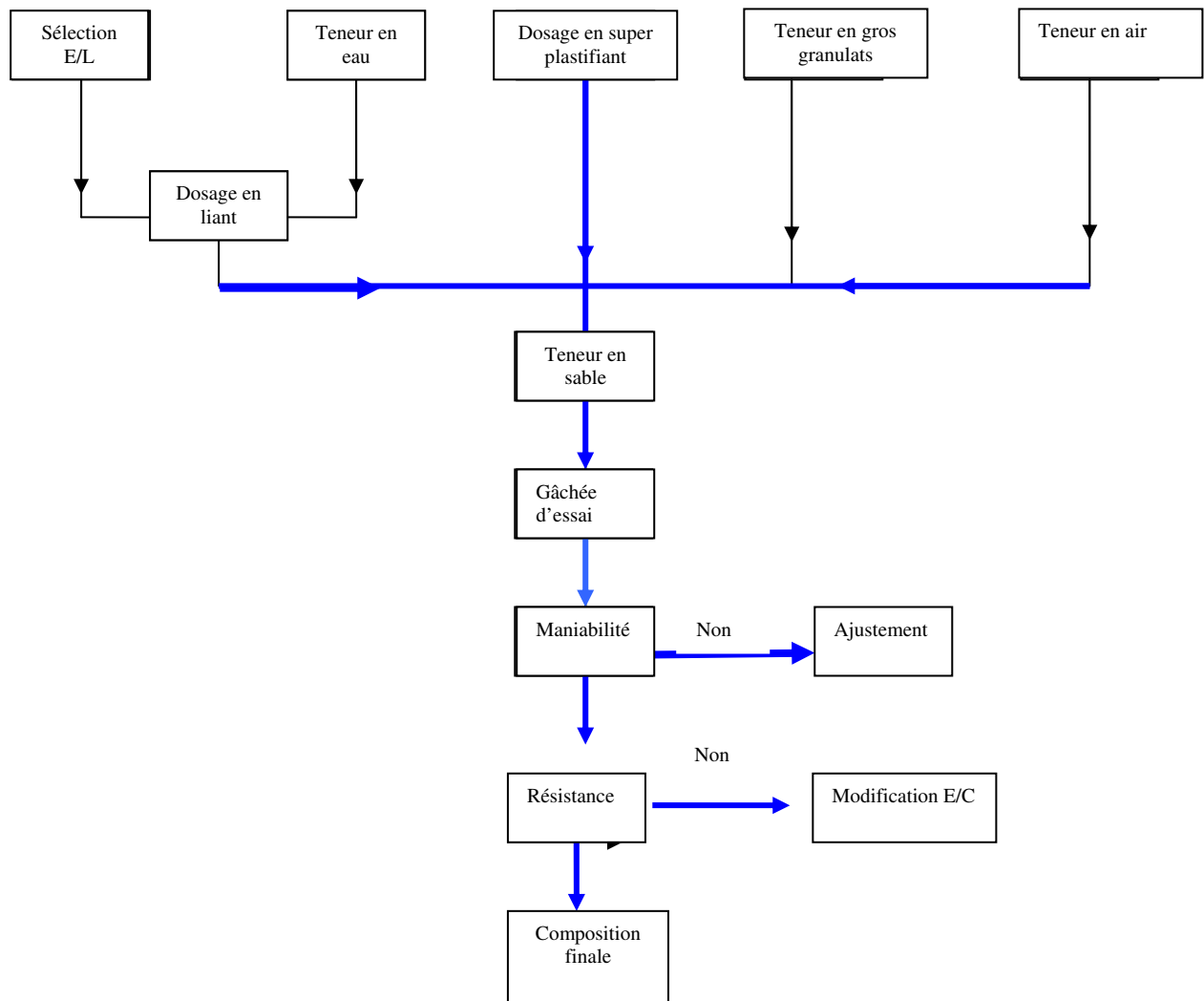
### 2-2-6 La méthode de formulation de l'Université de Sherbrooke (2000)

La méthode de formulation développée à l'Université de Sherbrooke permet de formuler un BHP sans air entraîné : elle peut aussi être utilisée pour formuler un BHP à air entraîné à condition de tenir compte de la réduction de la résistance à la compression due à la présence du réseau de bulles d'air contenu dans le béton

Cette méthode très simple suit la même approche que la norme ACI 211-1. Il s'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basée sur la méthode des volumes absolus (Aitcin et al, 2001). La quantité contenue dans le super plastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage.

L'organigramme de cette méthode est présenté à la figure (2-11). La procédure de formulation commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés :

- ❖ le rapport eau/liant ;
- ❖ le dosage. en eau ;
- ❖ le dosage en superplastifiant ;
- ❖ le dosage en gros granulat ;
- ❖ la teneur en air.



**Figure 2-11** : Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP [4].

### 2-3 CONCLUSION

- La compatibilité des différents couples ciment-superplastifiant peut être étudiée par la méthode des coulis. Elle permet de caractériser les interactions ciment-superplastifiant, d'optimiser le choix et le dosage en superplastifiant pour chaque ciment, de détecter des risques de raidissement précoce lié à une incompatibilité physico-chimique entre ciment et superplastifiant.
- Les différents paramètres qui conditionnent la rhéologie des bétons, des mortiers ou des coulis en présence de superplastifiant peuvent être:
  - les teneurs en C3A;

- la finesse du ciment;
  - la nature chimique du superplastifiant;
  - le type de contre-ion;
  - les dosages en superplastifiant et le mode de leur incorporation.
- 
- La sélection d'un super plastifiant efficace est aussi cruciale que celle d'un ciment lorsque'on veut fabriquer des BHP parce que tous les types et toutes les marques de super plastifiant ne réagit pas de la même façon avec tous les ciments. L'expérience démontre que tous les super plastifiants commerciaux n'ont pas la même efficacité pour disperser les particules de ciment a l'intérieur d'un béton en réduisant la quantité d'eau de gâchage et en contrôlant la rhéologie des bétons de très faible rapport eau/liant durant la première heure qui suit le contact entre le ciment et l'eau.
  
  - Quelque soit la méthode de formulation utilisée pour confectionner un béton à haute performance, on procède à des essais rhéologiques sur le béton frais et des essais mécaniques sur le béton durci,
  
  - La formulation d'un BHP est tout autant un art qu'une science à l'heure actuelle. Il est difficile de formuler un BHP on connaissant seulement la fiche technique des matériaux qui le composent. En effet plusieurs combinaisons des mêmes matériaux permettent d'obtenir une résistance à 28 jours donnée.
  
  - Pour optimiser des BHP, il faudrait plusieurs gâchées de béton. La méthode de De larrard procède à des essais sur coulis, et puis la vérification sur béton, sans changer le squelette, ou la nature des proportions. Cette méthode réduit donc considérablement le nombre de gâchées, en plus, le matériel utilisé est un matériel usuel disponible dans la plupart des laboratoires, cette méthode semble la plus simple par apport aux autres méthodes.

## CHAPITRE

### ETUDE DES CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS

#### 3-1 INTRODUCTION

La normalisation des modes d'essais et de la confection du béton dans un laboratoire de recherche est une condition nécessaire pour l'obtention d'un béton de «Bon qualité » qui peut satisfaire aux normes internationales afin qu'on puisse comparer ses qualités et ses caractéristiques avec des résultats obtenus ailleurs.

Cependant, dans un essai de recherche, on peut dire, que tout est normalisé, la première étapes c'est faire un bon choix des matériaux, ce choix restera la dernière étape, c'est-à-dire jusqu' a l'écrasement de l'éprouvette.

On distingue cinq types d'essais suivant les normes (AFNOR) (NF P18-102) :

- 1) Essai de recherche
- 2) Essais d'étude de convenance et de contrôle.
- 3) Essai d'information.
- 4) Essai de contrôle non destructif
- 5) Essai de détection.

L'essai de recherche se base sur exécute entièrement en laboratoire destiné à étudier l'influence de certains paramètres sur les caractéristiques du béton [58].

#### **Remarque :**

La plupart des essais physiques et mécaniques sont réalisés dans le Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction de Djelfa (L.N.H.C.)

---

---

### 3-2 CHOIX ET SÉLECTION DES CONSTITUANTS :

Ce n'est pas avec n'importe quel granulat, n'importe quel ciment et n'importe quel adjuvant qu'on peut fabriquer un BHP économiquement fiable. Cependant, et à travers la littérature existantes, un cheminement est tracé dans ce qui suit afin d'aider à l'élaboration de ce matériau.

Ce cheminement consiste à :

- un choix plus rigoureux des constituants (l'aspect qualitatif) ;
- le dosage de ces constituants (l'aspect quantitatif).

#### 3-2-1 Les granulats :

La taille maximale du granulat, des essais ont montré que pour une résistance optimale du béton avec une quantité de ciment élevée et un rapport E/C faible, doit- être gardé entre (9,5 ÷ 12,5) mm. Ceci s'explique par le fait qu'il y a peu de concentration de contraintes autour des particules, causée par la différence des modules de déformation de la pâte de ciment et des granulats, quand leur dimension est faible [59]. En d'autres termes, réduire la dimension maximale du granulat, c'est réduire ses plans de faiblesse pour qu'il ne se casse pas sous des résistances de plus en plus élevées.

Les graviers utilisés ont été fournis par la Carrière ZAKAR de Djelfa .Ce sont des graviers concassés d'origine calcaire (couleur noir), qui est caractérisée par une roche à forte teneur en carbonate de calcium ( $\approx 98\%$ ).

Les différents mélanges granulaires utilisés ont été élaborés à partir de 2 classes : 3/8 et 8/15. L'analyse granulométrique, les caractéristiques physiques et chimiques, mécaniques et morphologiques de ces graviers sont représentées sur les tableaux suivants (3-1,.....3-6)

#### 3-2-2 Le sable :

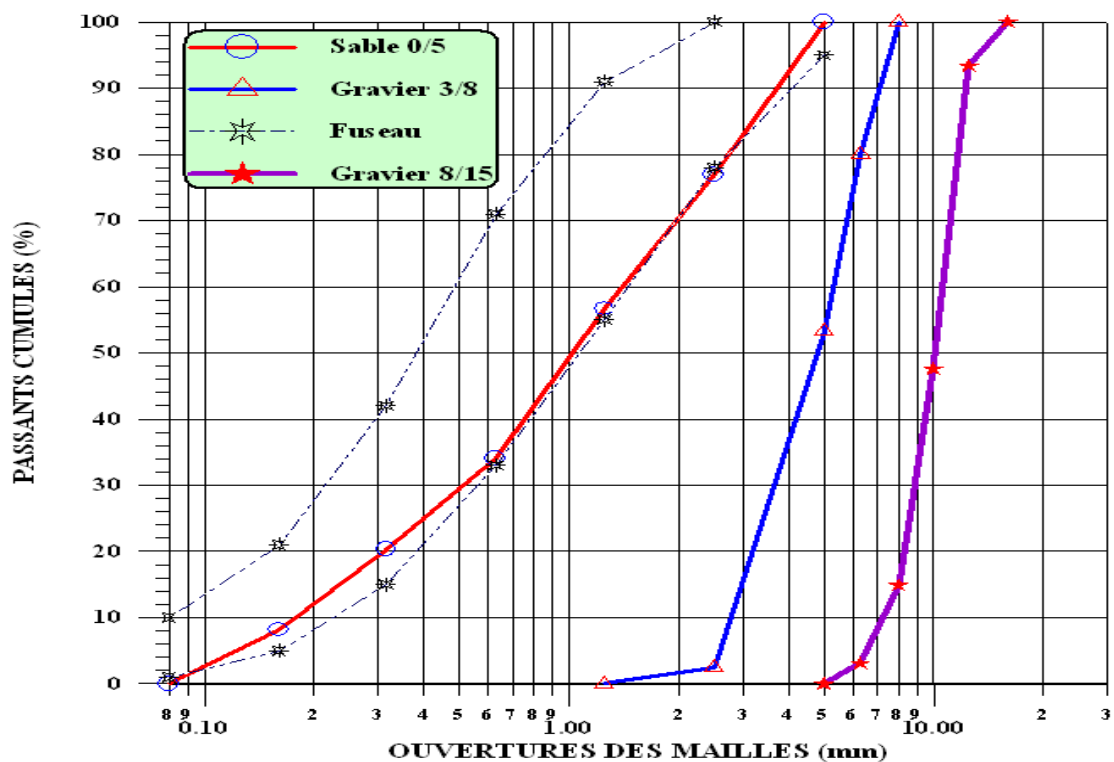
Le sable utilisé est un sable de rivière de la région de Djelfa, dont l'analyse granulométrique et chimique est sur les tableaux suivants :



**3-2-1-1 Etude des caractéristiques des granulats utilisés :**

**Tableau 3-1 : Caractéristiques géométriques des granulats**

Classe granulaire	16	12.5	10	8	6.3	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	0.08
8/15	100	93,39	47,5	14,86	3,1	1	0					
3/8				100	80	53,33	2,5	0				
0/5						100	78	57,7	35,07	21,34	9,23	0



**Figure 3-1 : Courbes granulométriques des granulats**

Constatation sur la courbe granulométrique :

La courbe montre que la granularité du granulat est monotone et croissante. Il n'existe pas de palier sur cette courbe, ce qui indique que le granulat utilisé dans notre étude est un granulat continu.

**Tableau 3-2:**Module de finesse de sable :

Tamis (%)						Mf= $\Sigma$ refus/100
0.16	0.315	0.63	1.25	2.5	5	
98,77	77,66	63,93	42,3	22	0	<b>3.05</b>

Le module de finesse du sable utilisé est égal à 3.05. Cette valeur correspond à un sable qui manque de fines, mais convenable à des projets de recherche pour des bétons à haute performance.

**Tableau 3-3 :** Caractéristiques mécanique et morphologiques des granulats :

Classes granulats	Los Angeles (%)	Micro Deval (%)	Coeff. d'aplatissement (%)	ES (%)	Propriété (%)	Essai au bleu
8/15	19.2	16.6	16.5	-	3.8	-
3/8	21	17.5	15	-	6.2	-
0/5	-	-	-	80	4.5	0.25

**Tableau 3-4:**Caractéristiques physiques des granulats :

Classes granulats	M <sub>app</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	M <sub>abs</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Porosité (%)	Compacité (%)
8/15	1.4	2.7	48.15	51.85
3/8	1.36	2.65	47.92	52.07
0/5	1.45	2.64	45	54.9

**Tableau 3-5. :** Composition chimique des granulats :

Les échantillo	P.A.F. %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	SO <sub>3</sub> %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	TiO <sub>2</sub> %
Gravier	41.11	5.25	0.95	0.51	49.13	2.22	0.42	0.17	0.16	0.02	0.06
Sable	1.71	88.91	0.71	0.91	4.13	0.22	0.06	0.25	0.03	0.07	0.081

**Tableau 3-6 :** Matière chimiques dans les granulats :

Les échantillons	Sulfates SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (%)	Chlorures CL (%)	Carbonate de calcium (CaCO <sub>3</sub> ) %	Matières organiques (%)
Sable	Trace	0.75	-	Trace
Gravier	Trace	0.3	97.5	Trace
Sable de dune	Trace	0.7	-	Trace
Calcaire	Trace	0.45	96,51	Trace
Déchet de polissage de carrelage	Trace	0.56	80.4	Trace

### 3-2-3 Le ciment :

Selon les auteurs [4,60] le ciment le plus approprié pour l'élaboration d'un BHP c'est le CPA55, mais vu les difficultés pour l'élaboration de ce ciment en Algérie. Ont été choisis 3 types de ciments des différentes régions et a été utilisé un essai de compatibilité ciment /super plastifiant et a été sélectionné un seul type, a condition qu'il donne une meilleure propriété rhéologique et mécanique (Chapitre 4)

Les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques ainsi que la composition minéralogique de ces ciments sont indiquées sur les tableaux suivants :

**Tableau 3-7 : La composition chimique :**

Elément %	P.A.F. %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	SO <sub>3</sub> %	Insolubles (CaO libre)
CPJ (CEM II/A 42,5)Chlef	1,84	20,39	4,91	3,14	62	1,13	2,57	0,02
CPJ (CEM II/A 42,5)M'sila	1,5	26,96	4,75	3,75	62,92	1,35	2,54	0,75
CPJ (CEM II/A 42,5)Ain Touta	2,15	20,7	5,36	2,71	58,90	2,32	2	-

**Tableau 3-8 : La composition minéralogique**

	C3S	C2S	C3A	C4AF
CPJ (CEM II/A 42,5) Chlef	58,69	21,52	7,7	11,97
CPJ(CEM II/A 42,5) M'sila	60,51	23,72	6,13	9,55
CPJ(CEM II/A 42,5) Ain Touta	59,49	21,81	8,32	10,27

**Tableau 3-9 : Les principales propriétés physiques**

Propriété	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g) <sup>o</sup>	Début de prise (min)	Rc : moyenne à 28 jours (MPa)
CPJ(CEM II/A 42,5) Chlef	2,95	3500	2h52	44,50
CPJ(CEM II/A 42,5) M'sila	3,11	3705	2h30	47,5
CPJ(CEM II/A 42,5) Ain Touta	3,1	3630	2h10	45,80

### 3-2-4 Les adjuvants :

Sur le marché Algérien on trouve trois producteurs d'adjuvants : Sika, Contact International et Granitex. L'examen des fiches techniques des adjuvants produits par ces entreprises nous a permis de choisir trois types d'adjuvants qui sont pratiquement les plus adaptés à l'élaboration d'un BHP.

Un seul type d'adjuvant doit être utilisé pour la confection des bétons, après l'essai de compatibilité.

Les caractéristiques principales des adjuvants sont indiquées sur le tableau suivant :

**Tableau 3-10** : Les caractéristiques des adjuvants utilisés :

Adjuvants	Densité	Forme	Couleur	PH	Teneur en chlore (g/L)
<b>Meda Flow 30</b> (Granitex)	1,07	Liquide	Jaunâtre	6-6,5.	<0.1
<b>Meda Plast</b> <b>SP40(Granitex)</b>	1,18	Liquide	Marron	7.5-8	<0.1
<b>Sika fluid 200R</b>	1.15	Liquide	Marron	5.5-6	<0.1

Ces adjuvants seront testés en laboratoire pour choisir le plus adapté aux ciments. (voir chapitre suivant)

### 3-2-5 Les fillers

Trois types de fillers ont été utilisés : le calcaire, le sable de dune et déchet de polissage de carrelage, qui existent partout à des bas prix, au lieu de les acheter de l'étranger avec des prix chers comme la fumée de silice ou la cendre volante.

#### a) Le calcaire

Le calcaire utilisé nous a été fourni par la cimenterie de Chlef. C'est une roche concassée sous forme de cailloux de granulométrie (20 /100 mm), de couleur blanche - jaunâtre de masse volumique absolue de  $2.65 \text{ g/cm}^3$ .

La composition chimique du calcaire de Chlef est donnée sur ce tableau suivant :

**Tableau 3-11** : La composition chimique du calcaire

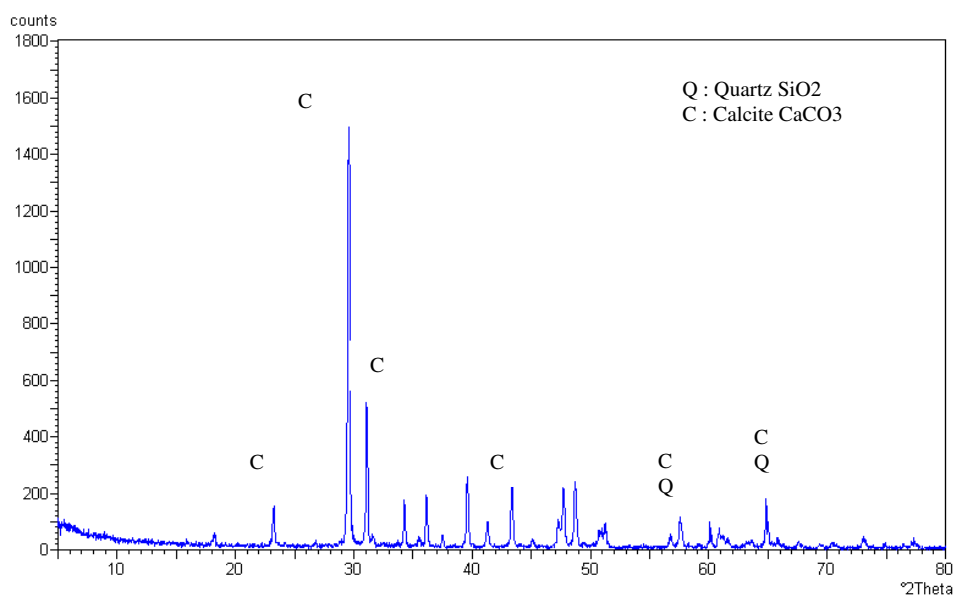
Les échantillons	P.A.F. %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	SO <sub>3</sub> %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	TiO <sub>2</sub> %
Filler (Calcaire)	41.33	5.96	0.93	0.41	48.19	2.34	0.49	0.15	0.15	0.02	0.04

### Diffractogramme du calcaire

#### Analyse aux rayons X :

Les analyses ont été faites au laboratoire de physique à l'université de LAGHOUAT. L'appareil utilisé est un Diffractométrie X'PERT couplé à un système informatique permettant l'exploitation et le tracé des résultats acquis. La diffraction aux rayons X est effectuée sur les fines particules des ajouts broyés ( $\varnothing \leq 80\mu\text{m}$ ).

L'analyse par diffraction aux rayons X (DRX) montre que le calcaire est constitué essentiellement de calcite (CaCO<sub>3</sub>), il est représenté sur la figure (3-2)

**Figure 3-2** : Diffractogramme du calcaire

### b) Le sable de dune

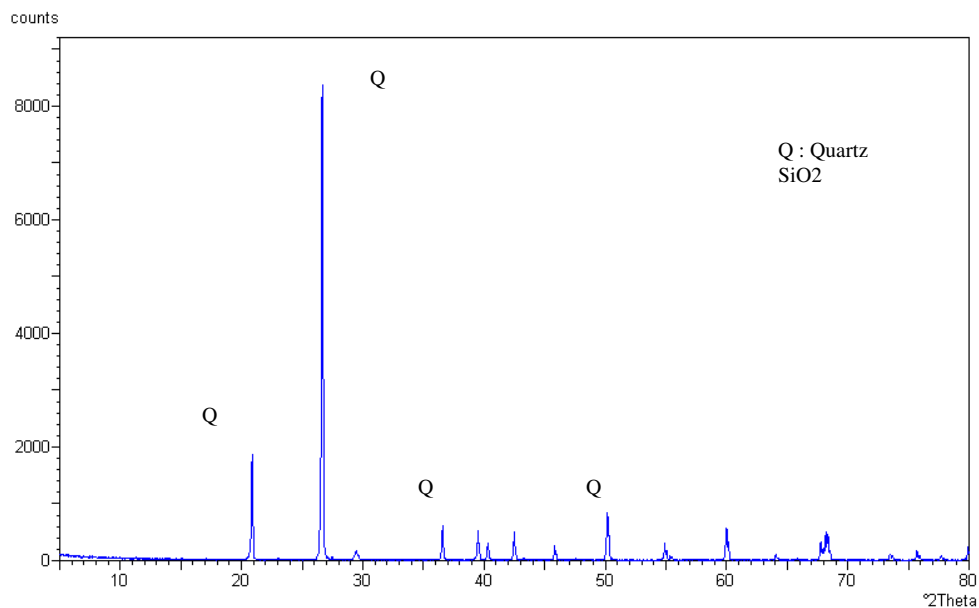
C'est un sable de dune provenant de la région de Djelfa, l'étude de la composition chimique et représentée sur le tableau suivant :

**Tableau 3-12** : Composition chimique de sable de dune:

Les échantillo	P.A.F. %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	SO <sub>3</sub> %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	TiO <sub>2</sub> %
Sable de dune	1.76	94.51	0.64	0.72	1.94	0.07	0.03	0.20	0.06	0.01	0.05

### Diffractogramme du sable de dune

L'analyse diffractométrique aux rayons X, figure (3-3) indique que le sable de dune est constitué de (SiO<sub>2</sub>) cristallisé sous forme de quartz  $\alpha$ .



**Figure 3-3** : Diffractogramme du sable de dune

### C) Le déchet de polissage de carrelage :

La composition chimique de ce déchet est représentée sur ce tableau suivant :

**Tableau 3-13.** : Composition chimique de déchet de polissage de carrelage:

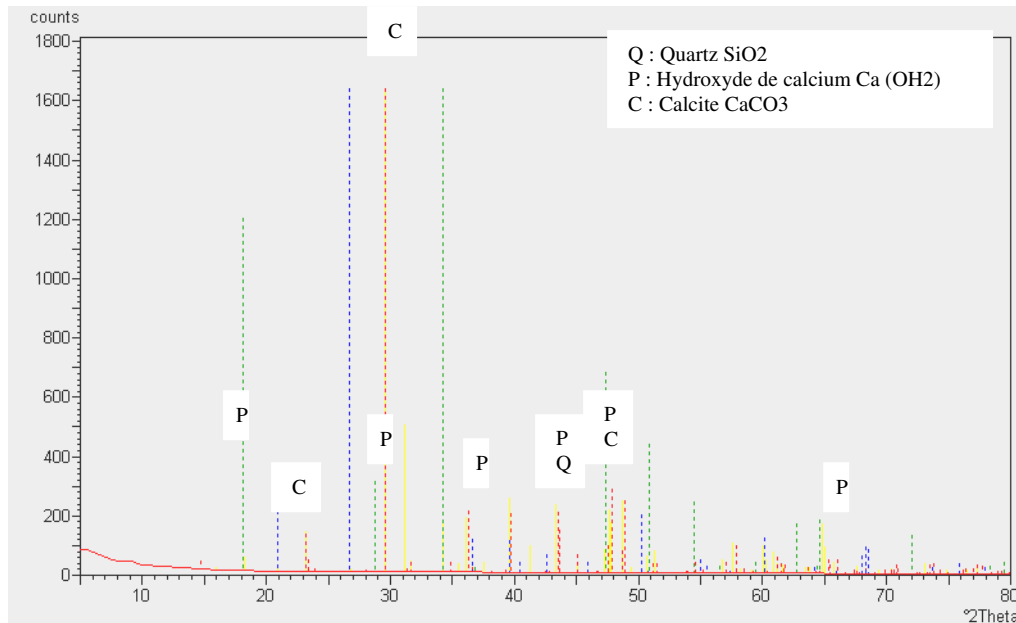
Les échantillons	P.A.F. %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	SO <sub>3</sub> %	Nacl %
Filler (DPC)	42,84	0,58	0,06	0,02	55,80	0,06	0,08	0,56

---

---

### Diffractogramme du déchet de polissage de carrelage

L'analyse par diffraction aux rayons X (DRX) montre que le DPC a une teneur excellente en calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), il est représenté sur la figure (3-4)



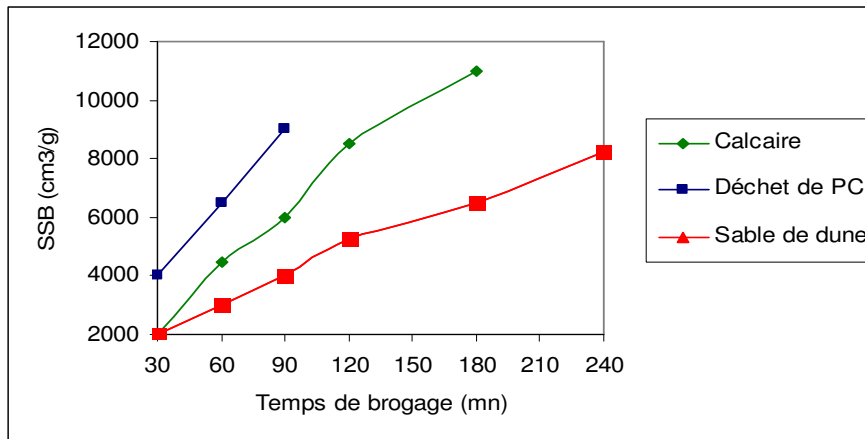
**Figure 3-4 :** Diffractogramme du déchet de polissage de carrelage

Ces analyses par Diffractogramme au RDX sont faites au laboratoire de physique de l'Université de Laghouat, mais les analyses chimiques sont faites à SETIM (Boumerdess)

#### 3-2-6 Le broyage et le traitement des ajouts :

Avant le broyage des ajouts, on les pose sur une étuve sous une température de  $105\text{C}^\circ$  pendant quelques heures, puis on les broie dans un broyeur jusqu'à la finesse désirée.

L'évolution de la finesse (SSB) en fonction du temps est présentée sur la figure (3-5)



**Figure 3-5 :** Evolution de la finesse des ajouts en fonction du temps de broyage

Concernant le sable de dune est relativement dur par rapport aux autres ajouts (calcaire et DPC), nous étions obligé d'utiliser un broyeur spéciale de type HERZOG, disponible au cimentrié de Chlef comme l'indique la figure (3-6), par contre les autres ajouts sont broyés à l'université de Chlef (Laboratoire de GC) par un simple broyeur dite boulets.

On va prendre les valeurs suivantes de la finesse :

1. **Calcaire:** 11.000 cm<sup>2</sup>/g
2. **Déchet de polissage de carrelage:** 9000 cm<sup>2</sup> /g.
3. **Sable de dune broyé:** 8230 cm<sup>2</sup>/g,

**Remarque :** il ne faut pas dépasser ces valeurs là, sinon la matière se colmate



**Figure 3-6 :** Broyeur de type HERZOG



**Figure 3-7 :** Broyeur à boulets



### 3-3- Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre sont :

- L'obtention d'un béton à haute performance de bonne adhérence nécessite l'utilisation des granulats cubiques ayant une surface rugueuse, avec un diamètre maximal de 15mm.
- L'emploi judicieux des matériaux utilisés dans la fabrication du Béton exige la connaissance de leurs diverses propriétés : Physiques, chimiques, minéralogiques, physico-chimiques et mécaniques pour permettre de faire un choix répondant à leur destination.
- L'analyse chimique des trois ajouts minéraux a montré que ces derniers présentent des caractéristiques satisfaisantes. Ces caractéristiques peuvent être améliorées par l'augmentation de la finesse de ces ajouts.
- Le broyage poussé des ajouts nous a permis d'atteindre une SSB élevée. Cette finesse est relativement plus grande que celle du ciment.

## CHAPITRE 4

### LE MATERIAU BÉTON : COMPATIBILITE CIMENT/ SUPERPLASTIFIANT, FORMULATION

#### 4-1 INTRODUCTION

La difficulté majeure rencontrée dans la formulation des bétons à base de super plastifiants est de choisir le couple Ciment-Superplastifiant le plus efficace qui permet d'obtenir une réduction maximale de l'eau, une bonne ouvrabilité et une rhéologie satisfaisante du béton pendant la mise en oeuvre. En effet, lors de l'utilisation des superplastifiants dans la confection des bétons, certains ciments peuvent présenter des phénomènes d'incompatibilité ciment- superplastifiant: irrégularité des affaissements au cône d'Abrâms et des temps de prise, ainsi qu'une perte rapide de maniabilité après fabrication [15,47].

Dans ce chapitre une étude sera entamée l'étude de la compatibilité ciment /superplastifiant et méthode de formulation du béton choisi.

#### 4-2 EVOLUTION DE LA COMPATIBILITE CIMENT/ SUPERPLASTIFIANT (MÉTHODE DES COULIS)

La méthode de coulis a été utilisé de façon pratique pour l'étude du comportement rhéologique d'un ciment avec les superplastifiants, elle permet : de caractériser les interactions ciment-superplastifiant, d'optimiser le choix et le dosage en super plastifiant pour chaque ciment, et de détecter les risques de raidissement précoce liés à une incompatibilité de nature physico-chimique entre ciment et superplastifiant. Un grand avantage de cette méthode est sa simplicité, ce qui permet d'alléger grandement le travail de formulation des bétons à haute performance

L'étude de la compatibilité ciment /superplastifiant peut se faire sur coulis en utilisant un essai d'écoulement de type cône de Marsh figure (4-1)

La préparation de l'échantillon comprend les étapes suivantes :

- 1) mettre dans le bol du malaxeur le mélange  $2/3$  eau +  $1/3$  superplastifiant;
- 2) verser la quantité de ciment et malaxer 1 min.30 sec. à petite vitesse;
- 3) arrêter le malaxeur pour écraser les grumeaux qui peuvent rester collés sur les parois du bol, sans que cette opération dépasse 30 sec.;
- 4) ajouter la quantité  $1/3$  eau +  $2/3$  superplastifiant et malaxer dans 1 min. à petite vitesse et dans 2 min à grande vitesse.

La première mesure de la fluidité est faite à 5 minutes après le début du malaxage. Ensuite, le coulis est placé dans un récipient recouvert d'un film plastique pour éviter toute évaporation d'eau. On effectue une deuxième mesure de l'écoulement 60 minutes après, en prenant le soin de malaxer le coulis une minute avant l'essai.

En général, l'essai est réalisé pour un rapport eau / ciment entre (0,3-0,35) de façon que le ciment et le superplastifiant sont utilisés dans des conditions assez semblables à celle de la pâte d'un BHP.

#### 4-2-1 Appareillage:

- un cône de Marsh avec un ajutage de 10 mm, figure (4-1);
- un chronomètre au dixième;
- des éprouvettes pour mesurer l'eau;
- une spatule pour racler la paroi du bol du malaxeur;
- une balance ;
- un malaxeur avec axe et palette.



Figure 4-1 : Cône de Marsh

La réalisation de cet essai a été effectuée au laboratoire de Génie civil à l'université de Chlef

Le comportement rhéologique a été étudié des trois types de ciments provenant des régions différentes : CPJ-CEMII/A 42.5 (Ain Touta), CPJ-CEMII/A 42.5 (M'sila) et CPJ-CEMII/A 42.5 (Chlef), avec trois types des super plastifiants et un seul type de chaque catégorie qui nous donne le meilleur résultat sera choisi.

**Tableau 4-1** : Les différents coulis utilisés

N°	Désignation	
	Type de ciment	Type et dosage d'adjuvant
01	CPJ (CEM II/A 42,5) (Ain Touta)	MEDAFLOW30,% Variant de 0.5 à 2,5
02	CPJ (CEM II/A 42,5) (Ain Touta)	MEDAPLAST SP 40,% Variant de 0.5 à 2,5
03	CPJ (CEM II/A 42,5) (Ain Touta)	SIKA FLUID 200R,% Variant de 0.5 à 2,5
04	CPJ (CEM II/A 42,5) (M'sila)	MEDAFLOW30,% VARIANT de 0.5 à 2,5
05	CPJ (CEM II/A 42,5) (M'sila)	MEDAPLAST SP 40,% VARIANT de 0.5 à 2,5
06	CPJ (CEM II/A 42,5) (M'sila)	SIKA FLUID 200R,% Variant de 0.5 à 2,5
07	CPJ (CEM II/A 42,5) (Chlef)	MEDAFLOW30,% VARIANT DE 0.5 à 2,5
08	CPJ (CEM II/A 42,5) (Chlef)	MEDAPLAST SP40,% VARIANT de 0.5 à 2,5
09	CPJ (CEM II/A 42,5) (Chlef)	SIKA FLUID 200R,% Variant de 0.5 à 2,5

#### 4-2-2 Résultats des essais effectués sur coulis :

Le tableau (4-2) présente le dosage de saturation et le temps d'écoulement à 5 et 60 minutes, des différents couples ciment- superplastifiant.

**Tableau 4-2** : Dosage de saturation et temps d'écoulement à 5 et à 60 minutes

Super plastifiants	Type de ciment	Notation	Dosage de saturation (%)	Fluidité à 5min en (sec)	Fluidité à 60min en (sec)	Observations
<b>MEDA-FLOW30</b>	CPJ CEMII-42.5 M'sila	C01	0.50	34	45.1	incompatible
		C02	1.00	23.7	32.8	incompatible
		C03	1.25	19.1	23.2	intermédiaire
		C04	1.50	15,1	16.2	compatible
		C05	2.00	18	25	incompatible
		C06	2,50	20	27	incompatible
	CPJ CEMII-42.5 Ain Touta 1	C07	0.50	34	48.6	incompatible
		C08	1.00	24.2	40.7	incompatible
		C09	1.25	20	24.2	incompatible
		C10	1.50	14,4	16.8	compatible
		C11	2.00	11.4	22.8	incompatible
		C12	2,50	15	26	incompatible
	CPJ CEMII-42.5 Chlef	C13	0.50	42.5	55	incompatible
		C14	1.00	34.7	46	incompatible
		C15	1.25	29.7	35.2	incompatible
		C16	1.50	25.2	29.4	compatible
		C17	2.00	22.7	22.8	intermédiaire
		C18	2,50	25,2	28	incompatible
<b>MEDA-PLAST SP40</b>	CPJ CEMII-42.5 M'sila	C19	0.50	51.2	66.2	incompatible
		C20	1.00	48.7	60.1	incompatible
		C21	1.25	41.1	52.7	incompatible
		C22	1.50	34.2	45.7	intermédiaire
		C23	2.00	29.7	33.8	intermédiaire
		C24	2,50	31	36,2	incompatible
	CPJ CEMII-42.5 Ain Touta	C25	0.50	40	55	incompatible
		C26	1.00	33.4	45.2	incompatible
		C27	1.25	28.2	31.7	incompatible
		C28	1.50	22.4	28.2	intermédiaire
		C29	2.00	20.6	22.8	intermédiaire
		C30	2,50	22	25	incompatible
	CPJ CEMII-42.5 Chlef	C31	0.50	32	43.8	incompatible
		C32	1.00	21.2	25.7	incompatible
		C33	1.25	15.7	21.2	incompatible
		C34	1.50	11.2	13.9	intermédiaire
		C35	2.00	19.3	22.8	intermédiaire
		C36	2,50	20,1	26,2	incompatible
<b>SIKA FLUID 200R</b>	CPJ CEMII-42.5 M'sila	C37	0.50	79	85.4	incompatible
		C38	1.00	60.1	74.9	incompatible
		C39	1.25	55.7	67.8	incompatible
		C40	1.50	49.4	61.1	intermédiaire
		C41	2.00	37.4	39.2	intermédiaire
		C42	2,50	40	45,3	incompatible
	CPJ CEMII-42.5 Ain Touta	C43	0.50	77.4	84	incompatible
		C44	1.00	52.2	66.3	incompatible
		C45	1.25	49	57	incompatible
		C46	1.50	40.7	49	incompatible
		C47	2.00	31.4	31.9	compatible
		C48	2,50	35	36,4	incompatible
	CPJ CEMII-42.5 Chlef	C49	0.50	76.1	81.2	incompatible
		C50	1.00	45.7	56.7	incompatible
		C51	1.25	39.2	48.4	incompatible
		C52	1.50	31.4	40.2	incompatible
		C53	2.00	26.4	29.1	intermédiaire
		C54	2,50	30,2	37,8	incompatible

Les courbes de fluidité à 5 et 60 min en fonction du dosage en superplastifiant sont présentées sur les figures (4-2.....4-10)

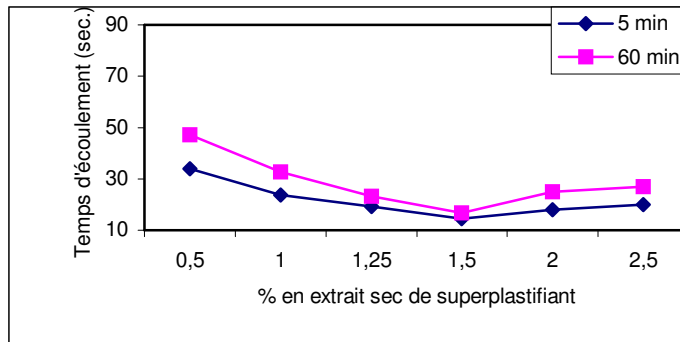


Figure 4-2 : Couple ciment CPJ CEMII-42.5 M'sila /MEDA- FLOW30

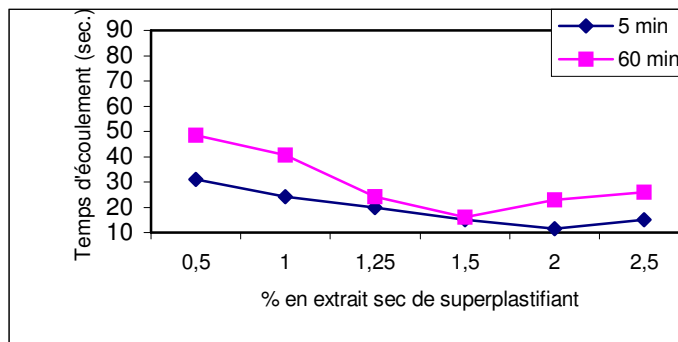


Figure 4-3 : Couple ciment CPJ CEMII-42.5 Ain Touta /MEDA- FLOW30

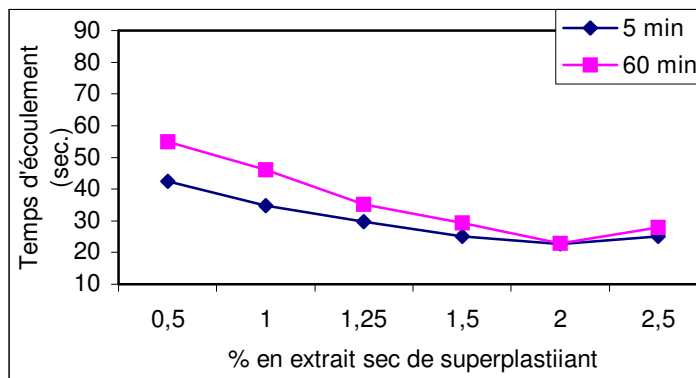


Figure 4-4 : Couple ciment CPJ CEMII-42.5 Chlef /MEDA- FLOW30

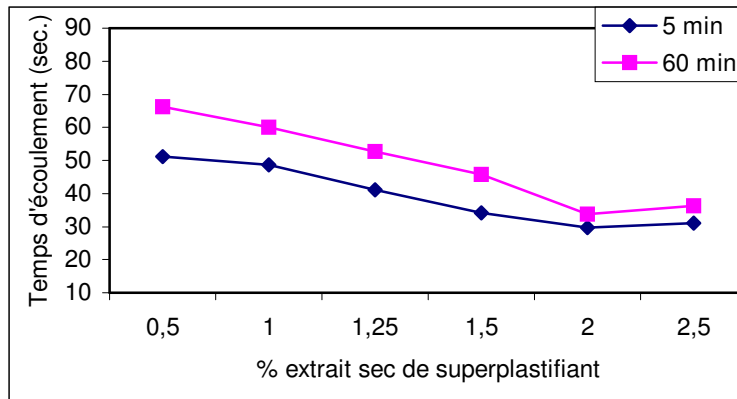


Figure 4-5 : Couple ciment CPJ CEMII-42.5 M'sila /SP40

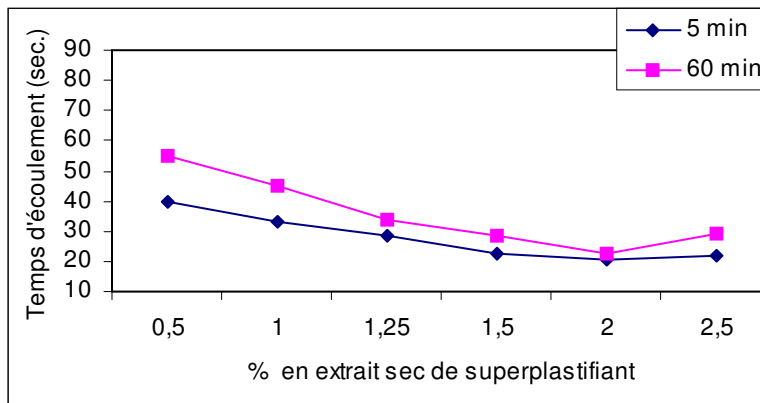


Figure 4-6 : Couple ciment CPJ CEMII-42.5 Ain Touta /SP40

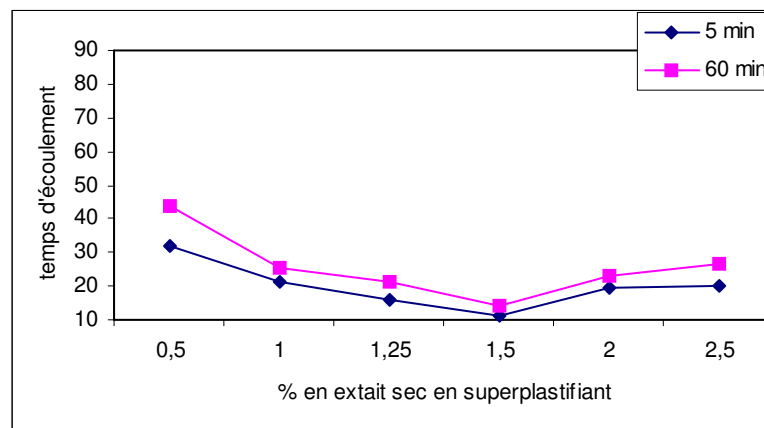


Figure 4-7 : Couple ciment CPJ CEMII-42.5 Chlef/SP40

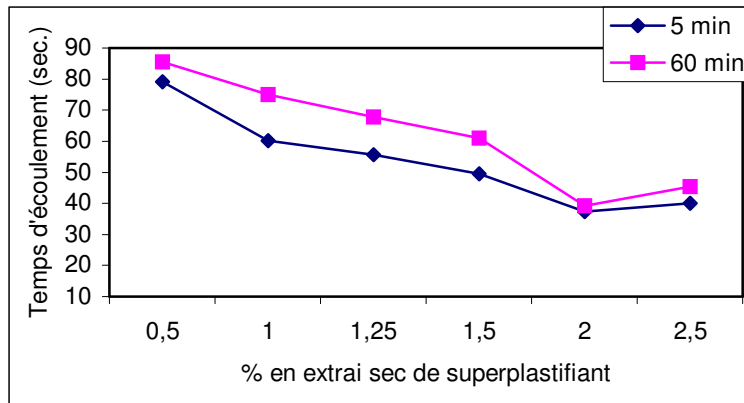


Figure 4-8 : Couple ciment CPJ CEMII-42.5 M'sila /Sika Fluid 200R

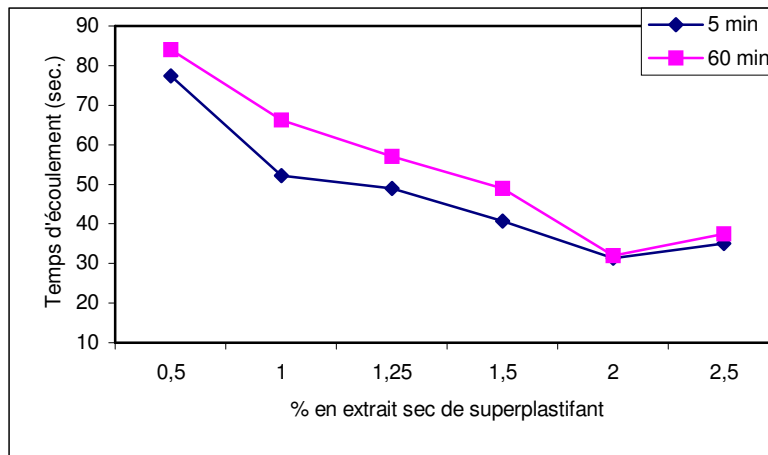


Figure 4-9 : Couple ciment CPJ CEMII-42.5 Ain Touta /Sika Fluid 200R

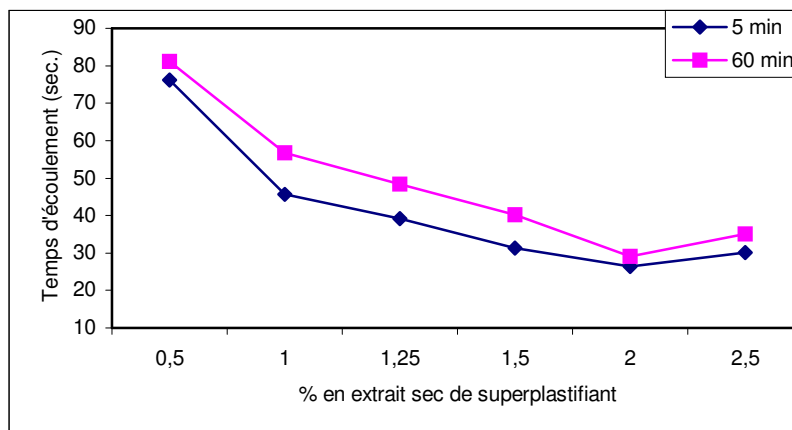


Figure 4-10 : Couple ciment CPJ CEMII-42.5 Chlef /Sika Fluid 200R



### 4-2-3 Commentaire:

- La première constatation faite c'est qu'avec un faible dosage de l'ordre de 0,25 à 0,5% de coulis, tous les types des ciments perdait sa fluidité après 60 min .C'est pour cette raison que ces valeurs n'ont pas été représentées.
- Un constat a été fait : plus la teneur en  $C_3A$  est faible plus le contrôle de la rhéologie est facile, lorsqu'on cherche un ciment facile à utiliser pour fabriquer un BHP, il est bon de commencer par choisir un ciment qui contient aussi peu de  $C_3A$  que possible
- Les dosages de saturation pour SP 40 et Sika fluid 200R sont assez élevés, ils sont de l'ordre de 1,75 à 2%.Par contre pour MEDAFLOW30, il est de l'ordre de 1% à 1,5%

**Couples compatible :** sur les figures 4-2 ou 4-3 (ex. les couples C04 et C10-MEDAFLOW30)

La constatation que faite concernant ces couples c'est que, pour un dosage en superplastifiant supérieur à 1,25%, nous enregistrons très peu de différence au niveau de la fluidité entre 5 et 60 minutes.

**Couples incompatibles :**

Sur les figures 4-9 ou 4-10 (couple C46 et C52- Sika fluid 200R), nous présentons un cas d'incompatibilité où la fluidité est faible. Le dosage correspondant au point de saturation est élevé, est entre (2% à 2,5%). La distance entre les courbes d'écoulement à 5 et 60 minutes est assez importante dans l'intervalle (1,25 à 1,5%) donc le comportement rhéologique est détérioré après une heure.

**Couples intermédiaires**

Le cas du couple (C28-MEDA PLAST40), figure 4-6 présente un coulis de ciment possédant un mauvais comportement rhéologique, mais qui ne se dégrade pas au bout de 60 min, avec une saturation atteinte un dosage entre (1,25% -1,5%).

A travers tout ça, il apparaît clairement que le MEDAFLOW30 (dosage à 1,5%) et de ciment CPJ CEMII-42.5 (M'sila) sont les meilleurs.

## 4-3 ETUDE EXPÉRIMENTALE DE LA COMPOSITION DES BÉTONS

### 4-3-1 Formulation d'un béton (témoin)

Les méthodes de composition ne conduisent pas toutes au même résultat, car chacune d'elles doit simplifier et s'appuyer sur quelques hypothèses qui ne sont pas toujours les mêmes. Signalons néanmoins qu'aucune d'entre elles n'aboutit à coup sûr une composition exacte. Ceci est dû aux paramètres influant sur le béton qui sont très nombreux et difficilement appréciables.

Pour la formulation du béton de référence (témoin), il a été retenu d'utiliser la méthode de BARON-LESAGE, mais il faut que nous sachions le dosage en granulats de sorte que le squelette minéral soit optimal. Par conséquent d'après BARON-LESAGE deux hypothèses doivent être respectées:

- Pour un dosage en eau et en ciment fixe au départ, le béton le plus maniable et le plus compact c'est que son squelette sera optimal.
- Le dosage optimal en granulats ne dépend pas des teneurs en eau ni en ciment.

Pour la composition optimale d'un béton, plusieurs paramètres peuvent être étudiés: le dosage en ciment, le dosage en eau et le dosage en granulats ( $S/G = \text{sable/gravier}$ ). Afin de simplifier l'étude et satisfaire les principes de la méthode, seul le rapport  $s/g$  est variable. Le dosage en ciment ainsi que le rapport eau/ciment ( $E/C$ ) sont fixés au départ

D'après Gorisse, le rapport  $S/G$  optimal est compris entre 0,5 et 0,83. Sept valeurs du rapport ont été choisies et expérimentées avec un pas de 0,05, ce qui veut dire sept compositions différentes. Pour chaque composition, on mesure l'affaissement au cône d'Abrams correspondant.

$$S/G = 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8.$$

On fixe le dosage en ciment ( $450 \text{ kg/m}^3$  dans notre cas), et on varie les quantités des différents granulats jusqu'à obtenir le rapport qui conduit à l'ouvrabilité maximale pour un  $E/C$  donné et un pris égal à 0,5. Le béton contient trois granulats ( $S$  désignant le volume de sable,  $G_1$ : gravier 3/8 et  $G_2$ : gravier 8/15).

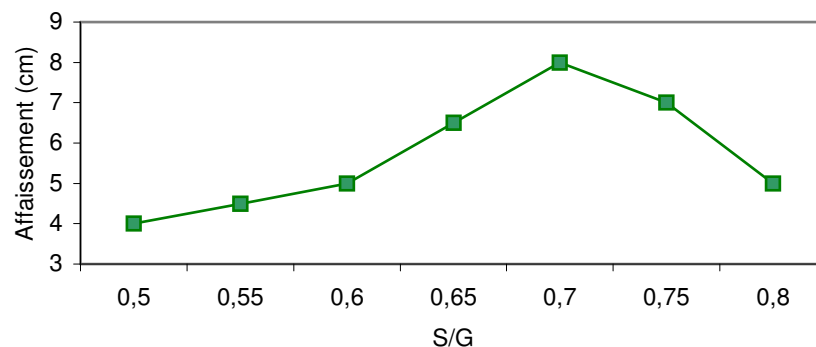
Pour le faire, la valeur  $G_2$  est maintenue comme une valeur constante, et à chaque fois on fixe une valeur de  $S$  et on calcule la valeur de  $G$  correspondante. Les valeurs de  $S$  choisies sont comprises dans la gamme 580 - 940, ces valeurs ont été choisies avec un pas de 60. Les différentes compositions de béton obtenues ont permis d'établir des mesures d'affaissement. Le tableau (4-3) récapitule les différentes valeurs d'affaissement obtenues pour les différents rapports  $S/G$  considérés comme étant les variables de l'optimisation.

L'établissement de la courbe d'affaissement =  $f(S/G)$ , figure (4-11) nous a permis d'obtenir le rapport  $S/G$  optimal qui donne la meilleure ouvrabilité. Comme on peut le remarquer, l'ouvrabilité maximale est atteinte pour un rapport  $S/G$  égal à 0,7.

**Tableau 4-3 :** Essais effectués pour la détermination de la composition du béton témoin

Compositions	S/G	Sable (Kg/m <sup>3</sup> )	E/C	Affaissement (cm)
1	0,50	580	0,5	4
2	0,55	640	0,5	4,5
3	0,60	700	0,5	5
4	0,65	760	0,5	6,5
5	0,7	820	0,5	8
6	0,75	880	0,5	7
7	0,80	940	0,5	5

Après de multiples essais de convenance, la composition adoptée pour le béton de référence est représentée sur le tableau suivant.



**Figure 4-11 :** Variation de l'ouvrabilité en fonction du rapport  $S/G$

**Tableau 4-4** : Composition optimale du béton témoin.

Ciment (Kg)	Granulats (kg)			Eau (kg)	E/C
	8/15	3/8	0/5		
450	905	200	760	225	0,5

#### 4-3-2 Formulation des bétons fluidifiés

Pour le reste des bétons dans notre présente étude, on gardera le même squelette granulaire (optimisé par la méthode Baron- Lesage) "voir composition du béton témoin".

A la précision des expériences près, on peut considérer que le rapport G/S est le même pour les deux cas (ici  $G/S \approx 1,45$ ). Donc le squelette optimal du béton ordinaire convenait parfaitement aux bétons fluidifiés, le même dosage en ciment que le béton ordinaire est gardé, alors que le rapport E/C sera varié dans le sens d'une réduction de la quantité d'eau de gâchage par l'introduction de super plastifiant. Le tableau 4-5, donne la composition des bétons fluidifiés utilisés.

**Tableau 4-5** : Composition des bétons fluidifiés :

Compositions	Dosage en ciment	Dosage d'adjuvant/poids du ciment	E/C	Aff (cm)
B1	450	-	0.50	8.5
B2	450	1%	0.45	19
B3	450	1,25%	0.43	11
B4	450	1,25%	0.40	7
B5	450	1,25%	0.36	4
B6	450	1,25%	0.35	6.5

#### 4-3-3 Optimisation des ajouts

Après avoir trouvé la formulation des bétons fluidifiés, dans le ciment sera incorporée avec différentes teneurs d'ajouts (5%, 10%, 15% et 20%) à condition qu'on fixe la quantité du ciment qui est égale à  $450\text{Kg/m}^3$ , et la quantité d'eau sera réduite.

**Tableau 4-6** : Composition des bétons fluidifiés avec des ajouts:

Type des bétons	Compositions	C	SD (%)	C (%)	DPC (%)	Adj (%)	E/L	Aff (cm)
<b>Béton SD</b>	B7	450	5	-	-	1.5	0.30	6.5
	B8	450	10	-	-	1.5	0.28	7.2
	B9	450	15	-	-	1.5	0.26	7.7
	B10	450	20	-	-	1.5	0.26	5.0
<b>Béton C</b>	B11	450	-	5	-	1.5	0.26	6.9
	B12	450	-	10	-	1.5	0.26	7.3
	B13	450	-	15	-	1.5	0.26	8.5
	B14	450	-	20	-	1.5	0.26	5.7
<b>Béton DPC</b>	B15	450	-	-	5	1.5	0.26	8
	B16	450	-	-	10	1.5	0.26	8.5
	B17	450	-	-	15	1.5	0.26	9
	B18	450	-	-	20	1.5	0.26	4

**4-3-3 Essais sur bétons frais**

Les principaux essais effectués sur les bétons frais sont les suivants: le pourcentage d'air occlus dans le béton et la masse volumique. Les résultats de ces essais sont mentionnés sur le tableau (4-7).

**Tableau 4-7** : L'air occlus et la masse volumique des bétons frais.

Compositions	d'aire occlus (%)	MV frais kg/m3
B1	2.4	2410
B2	2.35	2445
B3	2.1	2447
B4	1.9	2460
B5	2	2495
B6	1.9	2546
B7	1.9	2546
B8	1.8	2565
B9	1.65	2592
B10	1.6	2610
B11	1.8	2522
B12	1.6	2535
B13	1.5	2549
B14	1.45	2570
B15	1.7	2522
B16	1.55	2530
B17	1.3	2560
B18	1.4	2575

#### 4-3-4 Commentaire :

- la composition optimale du béton fluidifié conduisant à une ouvrabilité acceptable avec un faible rapport E/C, correspond au béton B6 caractérisé par  $E/C=0,35$ ,  $Aff=6,5$  cm.

- Pour, B9, B10.....B18, avec un rapport  $E/C= 0, 26$ , donnent une maniabilité acceptable, ceci traduit l'effet lubrifiant des fines de l'ajout en raison de leur finesse supérieure à celle du ciment et ces fillers provoquent une fluidification supplémentaires. Cependant lorsque les pourcentages des fillers augmentent, la maniabilité diminue largement, ce qui signifie qu'on ne peut pas augmenter les pourcentages des ajouts au delà de pourcentage trouvé, puisque le ciment (CPJ-CEMII/A 42.5) contient déjà des grains inertes.

- Grâce à l'ajout des ultrafines et l'utilisation de superplastifiant, nous avons obtenu des bétons de bonne ouvrabilité.

- Le taux d'air occlus des bétons frais avec ajouts cimentaires, comparé à celui du béton de référence, est plus faible. À titre d'exemple, ce taux est de 2,4% pour le béton témoin et 1,6% pour le béton de calcaire .L'effet de l'introduction des ajouts cimentaires, conjugué à celui du superplastifiant, limite l'air emprisonné dans des pores et le remplissage par les ultrafines est meilleur. En revanche une amélioration de la masse volumique du béton frais.

#### 4- 4 CONCLUSION :

La pratique des super plastifiants a tendance à se développer de plus en plus. En Algérie, l'utilisation de ces produits est peu répandue dans le secteur du BTP contrairement ce qui se passe dans beaucoup de pays ou l'on ne fait plus de bétons sans super plastifiants.

Ces produits ont la capacité de transformer un béton de consistance humide en une suspension fluide, qui s'étale et remplit un récipient sous son propre poids. On peut aussi les utiliser pour diminuer la quantité d'eau de gâchage tout en gardant au mélange une maniabilité permettant sa mise en oeuvre par les méthodes usuelles [15,47].

.Donc dans ce chapitre la conclusion est :

- La composition chimique joue un rôle important dans l'élaboration d'un BHP ; on conclue que les ciments riches en silice et qui contient un taux d'aluminate

tricalcique faibles sont les meilleures, comme le ciment CPJ-CEMII/A 42.5 (M'sila). Il faut choisir un ciment qui contient peu de  $C_3A$ .

- Meda Flow (30) est un meilleur superplastifiant car il a une bonne efficacité rhéologique.
  
- Lorsqu'on désire fabriquer un béton à hautes performances, il est très important, de sélectionner avec soin les différents ingrédients que l'on utilisera. Lorsqu'on cherche à optimiser la composition d'un béton à hautes performances en un lieu donné, il s'agit donc de trouver le ciment ayant la plus faible réactivité rhéologique, c'est à dire celui qui fixera le moins d'eau de gâchage dans les instants qui suivent le malaxage, et de l'utiliser avec un superplastifiant qui entrera le moins en compétition avec les cristaux d'ettringite qui se forment dès que le ciment entre en contact avec l'eau.

## **CHAPITRE 5**

# **ETUDE DES COMPORTEMENTS PHYSICO -MÉCANIQUES DES BÉTONS**

### **5-1 INTRODUCTION**

L'étude du comportement mécanique du béton durci à l'échelle macroscopique est faite à partir des essais monotones statiques en compression, et en flexion sur des éprouvettes normalisées.

Après avoir les différentes formulations des bétons, premièrement une vérification expérimentale concernant la mesure de la résistance à la compression de chaque composition, de B1,B2,B3.....à B18, et après avoir finir l'étape de la vérification, les formulations optimales qui donne la résistance maximale de chaque type d'ajout sera sélectionné, avec une ouvrabilité acceptable et deuxièmement les essais nécessaire concernant ces matériaux

Remarque : les résultats de l'effort de rupture représentent une moyenne de 03 éprouvettes.

### **5-2 DESCRIPTION DES PROCESSUS EXPÉRIMENTAUX**

Les essais mécaniques ont été réalisés conformément aux normes AFNOR et les normes Algérienne.

#### **5-2-1 Les dimensions des éprouvettes et la rectification de surfaçage**

L'utilisation des éprouvettes normalisées de compression de forme cylindrique de (150 × 300) mm<sup>2</sup> ou de forme cubique de (150 × 150 × 150) mm<sup>3</sup> pour un béton de haute performance peut se poser un problème au niveau de la capacité de la presse puisque on ne peut pas dépasser 80% de sa puissance, donc de préférence on utilise des petites éprouvettes



cylindrique de  $(100 \times 200) \text{ mm}^2$  ou de forme cubique de  $(100 \times 100 \times 100) \text{ mm}^3$ , et encore la dimension maximale des granulats est généralement inférieur à 12 mm dans un BHP.

Après le démoulage des éprouvettes, les surfaces libres sont rarement planes (ou lisse), entrant un phénomène de concentration de contraintes lors de l'essai de la compression et par suite une rupture de l'éprouvette par fatigue. Techniquement, l'opération de surfaçage peut suffire pour palier le problème de concentration de contrainte.

Des recherches réalisées par (De Larrard et al.1992) [38], montrent que le surfaçage au soufre n'est pas adapté pour des bétons à hautes performances, à cet effet, une boîte à sable est confectionnée. Le seul inconvénient de ce type de surfaçage c'est la longue durée d'exécution de l'opération.

Généralement pour les éprouvettes cubiques aucun moyen de surfaçage n'est utilisé et pour ces raisons nous allons choisir des éprouvettes cubiques à dimensions  $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$ .

### 5-2-2 Mise en œuvre

Le béton à haute performance a été fabriqué dans les mêmes conditions et avec le même appareillage que le béton classique. Les mélanges ont été fabriqués dans un malaxeur à un axe vertical tournant. Pour réaliser les étapes du mélange il faut :

- placer le sable, le liant (ciment + ajout) et les granulats puis malaxer à sec pendant une minute ;
- introduire le  $\frac{2}{3}$  d'eau avec  $\frac{1}{3}$  du superplastifiant, puis malaxer pendant 2min ;
- ajouter la quantité  $\frac{1}{3}$  eau +  $\frac{2}{3}$  superplastifiant et malaxer dans 1 min ;
- remuer le béton à l'aide d'une truelle pour éviter le phénomène de ségrégation.

Le malaxage étant terminé, on procède aux essais sur béton frais, puis on remplit les moules à raison de trois couches avec un compactage sur table vibrante. La durée de vibration doit être suffisante pour assurer le serrage du béton, mais elle ne doit pas être prolongée au delà du temps nécessaire, sinon il se peut provoquer un début de ségrégation

- Araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle.

Finalement les éprouvettes sont ensuite maintenues dans le laboratoire pendant 24 heures à l'air libre, puis conservées dans l'eau à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  ou bien à l'air libre selon le type d'essai jusqu'à la date du test.

### 5-2-3 Dispositif expérimental

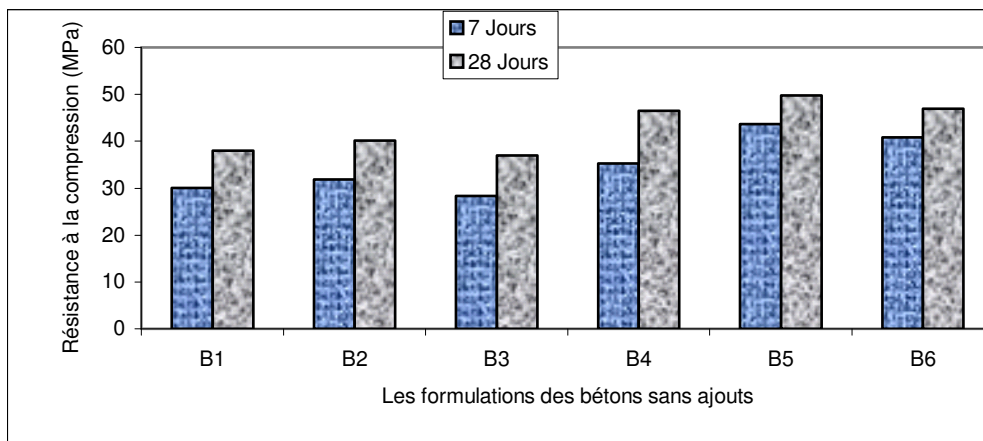
Conformément aux normes NFP 406, l'essai de compression simple s'effectue sur des éprouvettes cubiques de 10 cm de côté. La presse utilisée est une machine de type « Contrôles » à double quadrant, ayant une capacité maximale 3000 KN. Sa mise en marche s'effectue avec une vitesse de chargement constante de 0,5 MPa par seconde.

Par contre l'essai de résistance à la flexion, est réalisé sur des éprouvettes prismatiques de 10×10×40cm .L'essai est effectué sur 4 points avec une vitesse de 0.14 KN/s.

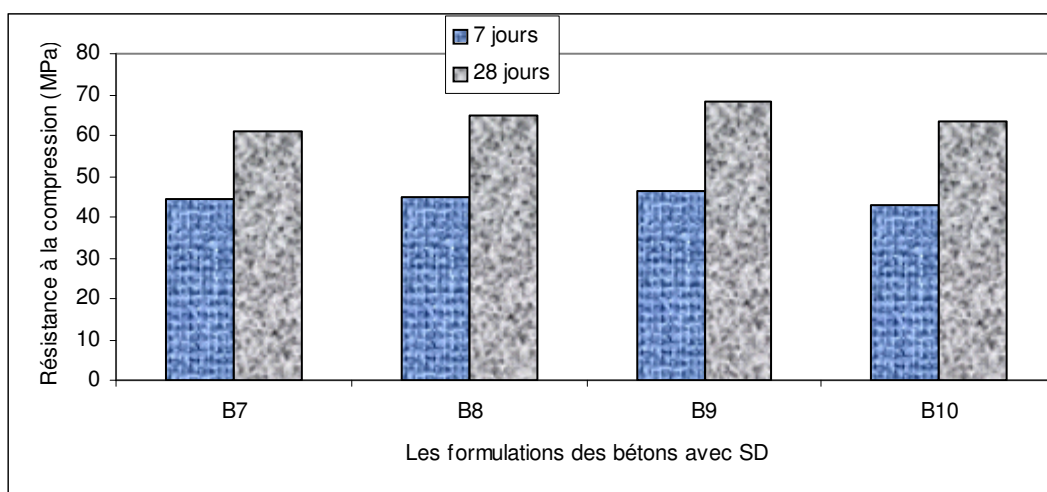
On note bien que les vitesses de chargement sont normalisées.

### 5-3 OPTIMISATION DES FORMULATIONS

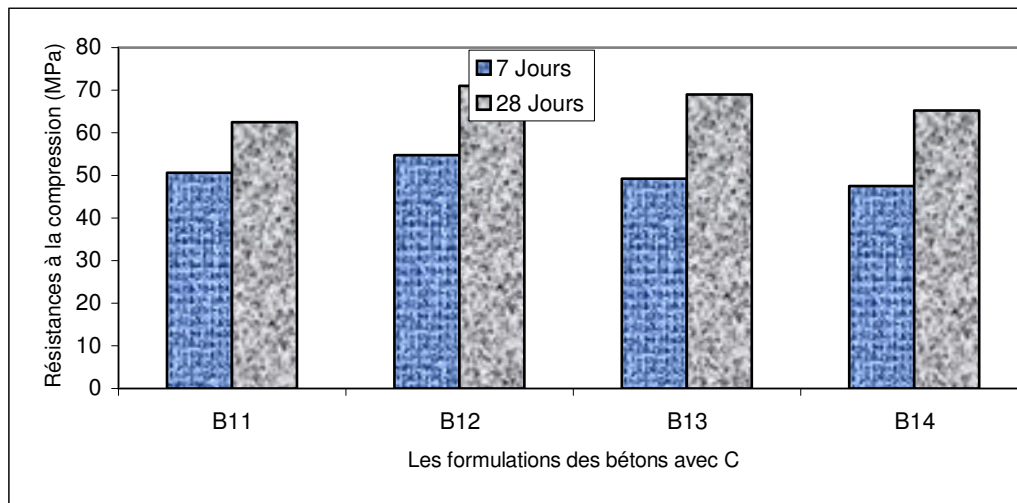
Les résultats des différentes formulations des bétons soumis à la compression sont représentés sur les figures suivantes



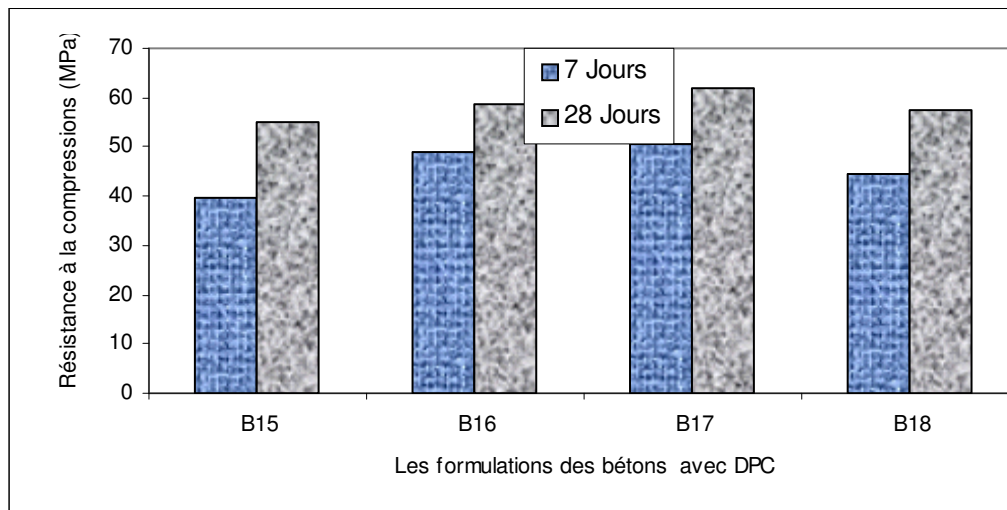
**Figure 5-1 :** La résistance à la compression d'un béton sans ajouts



**Figure 5-2 :** La résistance à la compression d'un BSD



**Figure 5-3 :** La résistance à la compression de BC



**Figure 5-4 :** La résistance à la compression d'un BDPC

A partir de ces figures ci-dessus, on constate que :

- Il y a une possibilité de fabrication d'un béton hautement résistant, de résistance à la compression environs de 70 MPa dans 28 jours, c'est grâce à l'efficacité du superplastifiant qui permette de réduire le rapport E/L au-dessous de 0.30. et l'utilisation des ajouts finement broyé tel que le calcaire, sable de dune et déchet de polissage de carrelage, aidera sans doute, à densifier la pâte de ciment et à réduire d'avantage la quantité d'eau, et grâce aussi a un bon choix d'un granulat concassé, propre et résistant, et à l'aide encore d'un ciment dont son teneur en  $CA_3$  est extrêmement faible .

- On peut obtenir facilement une bonne maniabilité, malgré le rapport E/L est faible = 0,26, pour cela on a utilisé ce bon superplastifiant (Meda Flow 30) qui a une forte efficacité rhéologique et mécanique.

-Le calcaire a donné un optimum de 10 % en son teneur et 11000 cm<sup>2</sup>/g de finesse et selon cette composition et avec un rapport (Eau/liant)=0.26, nous avons obtenu une meilleure résistance mécanique de 71 MPa en compression (à 28 jours), voir figure (5-3), c'est-à-dire un taux d'augmentation de 46,3%, sa veut dire que si la valeur de la résistance est grande, la valeur de la finesse sera grande. Ce qui montre que l'influence de la finesse sur l'amélioration de taux d'hydratation de l'ajout qui provoque une croissance de la résistance, d'autre part, le rôle physique de remplissage est lié directement à sa finesse, par conséquent, plus l'ajout est fin, mieux il pénètre dans les pores ce qui nous donne un béton plus compact et plus résistant. Mais lorsque les teneurs du calcaire sont plus élevées, les ajouts provoquent une chute des résistances, en raison de la forte teneur en produit inerte qui reforme initialement le ciment utilisé.

- On ce qui concerne le béton avec le sable de dune, figure (5-2), la résistance à la compression diminue en fonction du pourcentage du sable de dune par rapport au béton ordinaire figure (5-1); ceci est dû au fait que la réaction pouzzolanique n'a pas eu lieu aux jeunes âges, donc l'ajout du sable de dune a engendré une augmentation de la partie inerte. En effet au jeune âge les ciments ordinaires s'hydratent en premier lieu en donnant les hydrates CSH et un excès de chaux qui active l'hydratation des ajouts. La nécessité de la présence de la chaux pour l'hydratation, fait que ces derniers ne réagissent que tardivement (c'est remarquable à partir de l'âge de 07 jours), mais à long terme et pour un rapport E/C =0.26 la résistance à la compression (elle devient supérieure à celle du béton témoin avec un dosage de 15% du sable de dune) peut atteindre les 67,1 MPa dans à 28 jours avec une finesse de 8230 cm<sup>2</sup>/g; ceci est dû à la fixation de la chaux sous forme de CSH qui améliorent la résistance; par contre lorsque le dosage est supérieure à 15 % elle diminue, en raison de la forte teneur en produits inertes.

- La teneur optimale en déchet de polissage de carrelage est de 15 %, avec une plus grande finesse (9000 cm<sup>2</sup>/g). A un rapport Eau/Liant = 0.26, cette composition a présenté une résistance de 62 MPa en compression (à 28 jours), soit une augmentation de 38% par rapport au béton ordinaire.

Donc la formulation optimale qui a donnée la résistance maximale avec une maniabilité acceptable est mentionnée au tableau suivant :

**Tableau 5-1** : La formulation finale

Types du béton	La résistance de compression à 28 jours (MPa)
Béton ordinaire (référence)	38
Béton calcaire (10%)	70,9
Béton sable de dune (15%)	67,1
Béton déchet de polissage de carrelage (15%)	62

**Les abréviations utilisées :**

**BHP** : Béton à haute performance

**BO**: Béton référence (témoin)

**BC**: Béton avec calcaire broyé.

**BDPC**: Béton avec déchet de polissage de carrelage broyé.

**BSD**: Béton avec sable de dune broyé.

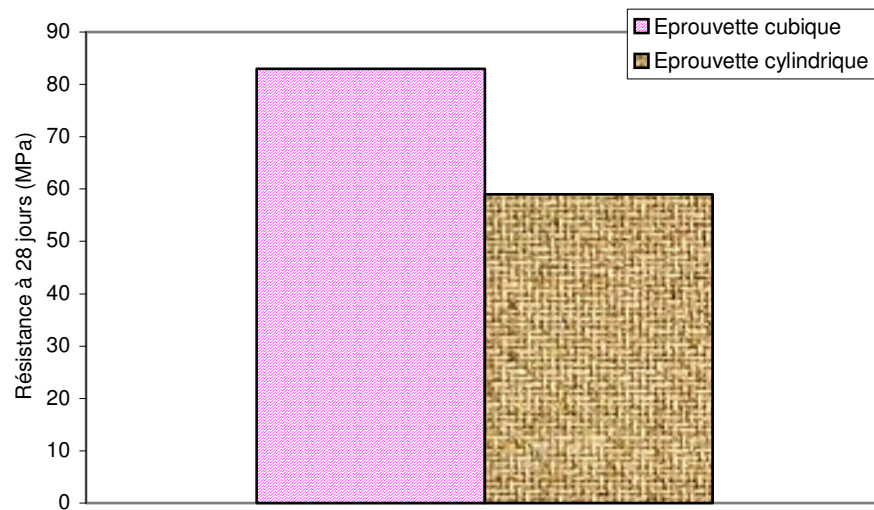
**5-4 L'influence de la géométrie des éprouvettes à partir de l'essai de compression**

Un coefficient sera recherché qui relie entre des éprouvettes cubique (10×10×10) cm<sup>3</sup> et d'autres cylindrique (16×32) cm soumises à la compression, on prend un seul exemple sur un béton calcaire qui a donné le meilleur résultat

La figure (5-5) montre le mode de rupture de deux types d'éprouvettes cubique et cylindrique soumises à la compression.



**Figure 5-5**: Mode de rupture d'éprouvettes cubique et cylindrique soumises à la compression.



**Figure 5-6:** Histogramme de la résistance des éprouvettes cubique et cylindrique soumises à la compression

La figure ci-dessus représente, la résistance en compression déterminée à partir des essais sur des éprouvettes cylindriques est inférieure à celle des éprouvettes cubiques. L'écart entre les résultats des mesures des éprouvettes est égal à  $R_{cyl}/R_{coub} = 0.71$ . Cependant cette valeur est proche au béton ordinaire qui est égale à 0,67 [58].

Cette influence de la géométrie des éprouvettes tient au plus grand effet du frottement exercé par les plateaux de la presse sur l'éprouvette cubique dont l'élancement est insuffisant. Le mode de rupture est alors conditionné par les forces de frottement qui se développent entre les plateaux de la presse et les faces des éprouvettes. Ces forces de frottement sont dirigées vers l'intérieur de l'éprouvette et freinent l'évolution des déformations transversales du béton ce qui augmente alors la résistance mesurée sur cube, donc les forces de frottement diminuent avec la hauteur de l'éprouvette et c'est pour cette raison qu'après destruction le cube reçoit la forme de deux pyramides tronquées opposées par le sommet contrairement à l'éprouvette cylindrique, qui se caractérise par une rupture de compression.

## 5-5 LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION À LONG TERME

La figure (5-7) indique les résultats obtenus à température ambiante à des âges respectifs : 28j, 90j, 270j et 2 ans. La lecture est, d'un rapport E/C égale à 0.26 les bétons fabriqués avec un ciment CPJ-CEMII/A 42.5 avec un ajout de 10% du fine de calcaire, 15% du déchet de polissage de carrelage et 15% du sable de dune, ils présentent les meilleurs

résultats mécaniques à la compression.

La résistance des bétons avec ajouts présente une valeur double que celle du béton ordinaire. Cette augmentation de résistance était prévisible et concorde parfaitement avec l'auteur (Djaknoun et al., 2005) [43].

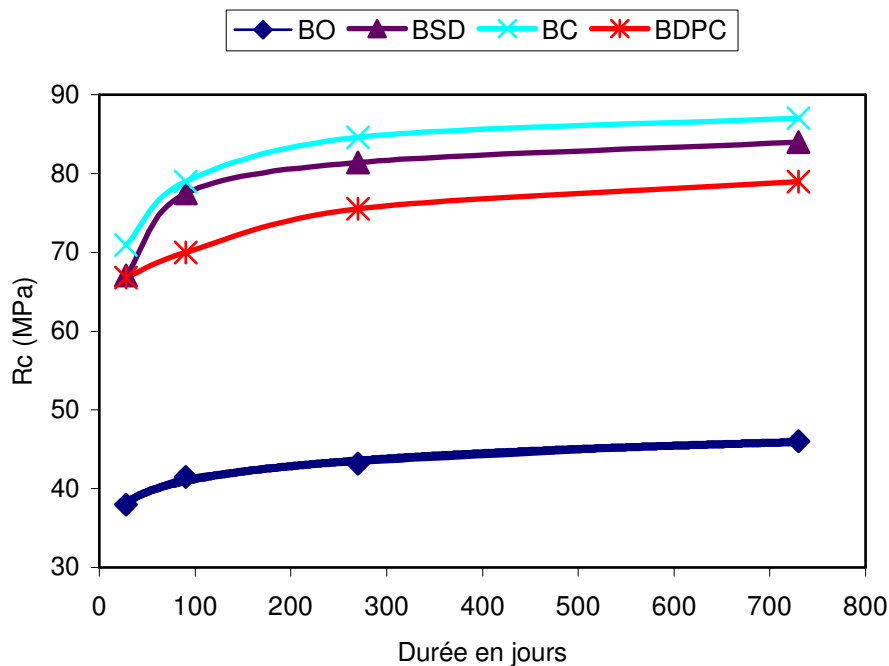


Figure 5-7 : Résistance à la compression des bétons.

Les facteurs les plus responsables de cette augmentation seraient bien sûr le choix des types de l'adjuvant, la grande finesse des ajouts utilisés et un autre facteur très important c'est la diminution du rapport E/C, ce paramètre est favorisé à la formation des produits d'hydratation internes qui sont caractérisés par une texture très fine et qui ressemble beaucoup plus à une phase compacte ayant une apparence amorphe. Cette augmentation de résistance semble être presque linéaire, c'est à dire entre 28j, 90j, 270j et 2 ans le processus d'hydratation a continué d'une manière presque aussi intense que les premiers jours. Ceci pourrait être une conséquence de la cure appliquée aux bétons.

Les fillers faiblement actifs (comme dans notre étude) se changent à des fillers fortement actifs avec le temps ce qui explique qu'il y a une croissance dans la résistance jusqu'à une période de 2 ans.

Selon (Aitcin et al.2001) [4], lorsqu'on veut évaluer la résistance à long terme d'un BHP avec un essai normalisé sur des éprouvettes de BHP mûries à l'eau au-delà de 90 jours,

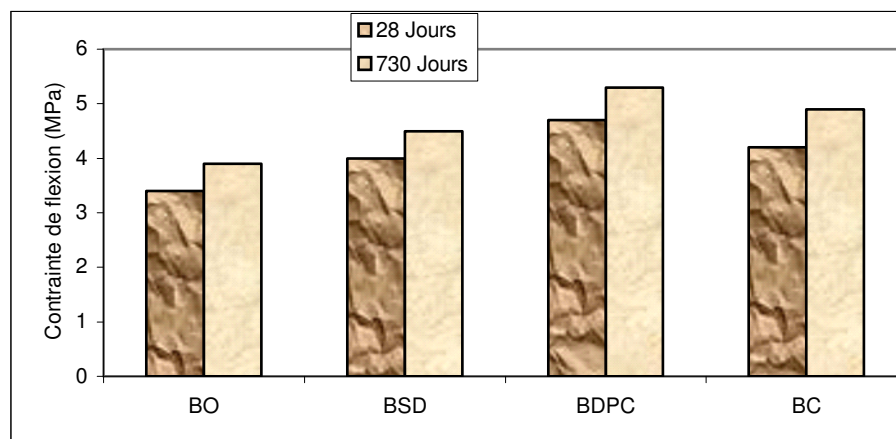


il faut bien comprendre qu'une certaine quantité d'eau extérieure pénètre dans des éprouvettes si bien qu'un anneau extérieur superficiel plus ou moins important continue à s'hydrater. En général, cette hydratation additionnelle entraîne une augmentation de la résistance à la compression de l'éprouvette par contre, dans les éléments structural l'hydratation du béton s'arrête généralement assez rapidement par manque d'eau ou par suite d'une trop faible humidité relative à l'intérieur du système de pores, tout au moins dans la partie superficielle du béton. Il est donc tout a fait normal que la résistance dans 91 jours ou dans 1 an l'éprouvette de BHP mûries sous l'eau na pas une relation directe avec celle du béton que l'on retrouve dans la structure. La mesure à long terme de résistance à la compression d'un BHP peut entraîner une vision un peu optimiste de résistance réelle du béton de la structure. Il n'est donc pas surprenant de trouver que la résistance à la compression dans 1 an de carottes n'est en général pas tellement différente de la résistance à la compression mesurée dans 28 jours sur des éprouvettes normalisées.

## 5-6 RÉSISTANCE À LA FLEXION

La résistance à la flexion a été déterminée par la méthode dite (traction par flexion), les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes (10×10×40) cm<sup>3</sup>, elles sont conservées dans l'eau à une température ambiante du laboratoire (20+2C°) jusqu'à l'âge de l'essai.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure suivante



**Figure 5-8** : Résistance à la flexion des bétons

Une remarque a été faite, ce n'est pas facile d'atteindre le seuil de 5,3 MPa dans 28 jours, même avec la présence d'un superplastifiant. La meilleure résistance à la traction à cet âge, a été obtenue avec le béton au calcaire (BC+ 10%), et qui est de l'ordre de 5,3 MPa, soit une

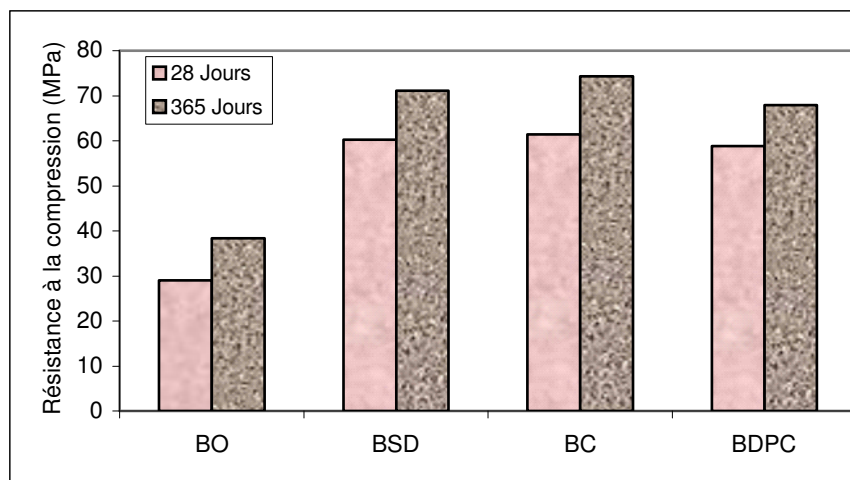


amélioration de 27% (BO/0,5), pour le béton SD, l'augmentation enregistrée est de 15% et de l'ordre 19% pour le béton DPC.

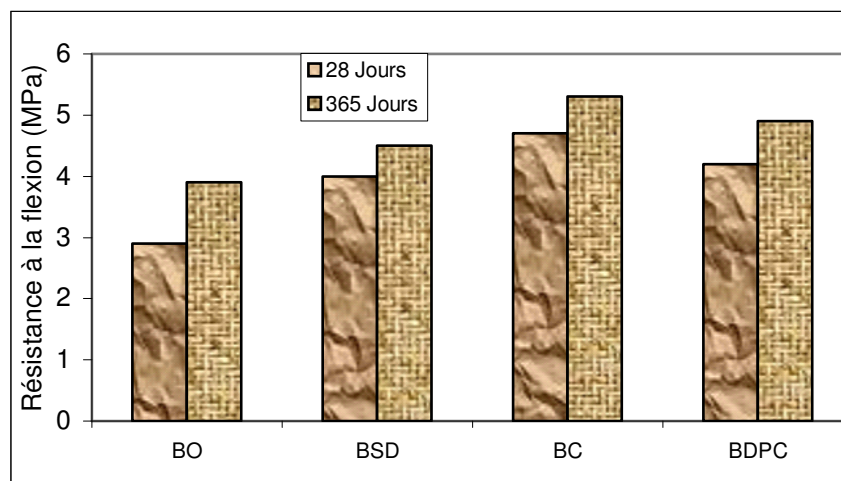
La variation de la résistance à la flexion a la même tendance que celle à la compression. Pendant (2ans), la résistance des bétons avec ajouts est plus élevée que celle du béton témoin

### 5-7 CONSERVATION À L'AIR LIBRE

Les résultats des différents bétons conservés à l'air libre sont représentés sur les figures suivantes



**Figure 5-9 :** Résistance à la compression à l'air libre



**Figure 5-10 :** Résistance à la flexion à l'air libre

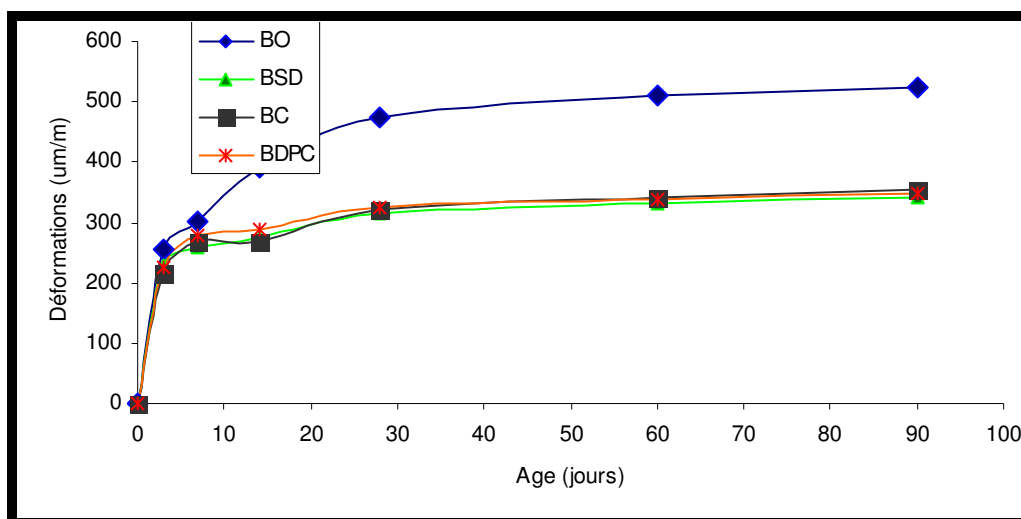
D'après les figures illustrées ci dessus, on remarque que :

Les résistances des bétons conservés à l'air libre augmentent d'une façon continue jusqu'à l'âge de 365 jours, mais il y a un écart entre les deux modes de conservation, donc on trouve comme il été indiqué précédemment, que la résistance d'un béton conservé à l'eau augmente en fonction du temps, et atteinte des valeurs très élevées. Ce phénomène est dû essentiellement par le fait que le béton est bénéficié et d'être conservé à l'eau pendant la période d'hydratation c'est à dire il n'y a plus de départ d'eau, qui empêche l'hydratation du ciment, par contre, le béton conservé à l'air, perd son eau pendant la période de l'hydratation ce qui empêche l'hydratation de se continuer, ceci peut être expliqué par le fait que la quantité des hydrates formées est très faible ce qui influe sur la structure interne du béton.

Il apparait donc, que le mode de conservation a une influence particulière sur les propriétés du béton, quand ce dernier n'était pas protégé, il perdait son eau par évaporation et sa résistance était considérablement réduite, donc, l'humidité interne d'un béton varie dans le même sens que celle du milieu ambiant. Cependant, pour obtenir un béton relativement imperméable, il faudrait une conservation totale à l'eau. C'est à dire un degré d'humidité de 100%.

## 5-8 LE RETRAIT

Les essais de retrait, ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques (7×7 ×28 cm) conservées à l'air libre et à une température ambiante du laboratoire (20 ±2C). Les résultats obtenus à l'âge de 90 jours, sont sur la figure (5-11) qui donne l'évolution du retrait en fonction de l'âge jusqu'au 90<sup>ème</sup> jours



**Figure 5-11 :** Influence de la nature des ajouts sur le retrait des bétons en fonction du temps

- Le phénomène de retrait est très complexe. Il est influencé par plusieurs paramètres non quantifiables, tels que la finesse, la composition chimique du liant utilisé, la température, l'humidité ambiante, la chaleur d'hydratation du liant, le rapport E/C, et même la forme des éprouvettes a un effet sur le retrait.

- Pour les bétons, la première remarque que nous pouvons poser, concernant l'effet du rapport E/L, c'est que la valeur de la déformation est petite parce que la valeur utilisé de E/L est petite. Le béton ordinaire (E/C=0.5), a engendré un retrait de 525µm/m à 90 jours, tandis que le retrait du béton avec ajout (E/C=0,26) est de 387µm/m .On remarque aussi que le retrait a diminué de 138 µm/m pour une baisse de E/C de 0.5 à 0.26. Donc les bétons avec ajouts ont un retrait plus faible que celui de béton ordinaire à différents âges, car lors de l'hydratation de ces bétons, il se forme des composés (CSH) de structure plus dense. Ces derniers remplissent les pores capillaires et réduisent leurs volumes libres. Ce qui évite la migration de l'eau et le séchage.

- Si on examine les retraits aux jeunes âges (les 7 premiers jours), on remarque que les bétons aux ajouts développent du retrait similaire à celle du béton témoin. Ce qui peut être interprété par le fait que les ajouts agissent par leurs propriétés lentes en engendrant un apport d'eau qui s'évapore aux premiers âges en provoquant des retraits considérables.

### 5-9 LA DÉFORMABILITÉ DU BÉTON.

Le béton est un matériau en évolution, ses propriétés se modifient constamment au cours de son existences, l'hydrations du ciment se poursuit pendant longtemps, augmentant ainsi les résistances mécaniques et les modules de déformation. Le béton soumis à l'action d'une charge assez faible subit une déformation pratiquement instantanée élastique, réversible. Il suit la loi de Hooke bien connue :

$$\sigma_c = \varepsilon_c \times E_c$$

$\sigma_c$  : Contrainte appliquée

$\varepsilon_c$  : Déformation

$E_c$ : est appelé module d'élasticité.

Soit  $P_c$  la charge de rupture du béton étudié. Il s'agit d'appliquer des contraintes croissantes à une éprouvette de ce béton et de mesurer les déformations correspondantes jusqu'à une valeur de  $\sigma_c = 0,3 P_c$ .

Il est alors possible de tracer la courbe  $\sigma = P_c (\varepsilon_c)$  en variant la charge de 0 à 0,3  $P_c$

Dans cette partie, on a déterminé :

- L'évolution des déformations relatives instantanées, avec l'augmentation de la contrainte relative.
- L'évolution des déformations relatives totales.
- Le module d'élasticité initial des bétons, et la variation du module de déformation avec l'augmentation de la contrainte relative.

Les éprouvettes utilisées sont sous formes prismatiques de  $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$  pour les différents mélanges de béton, chaque série comporte 3 échantillons.

Les essais en compression sont effectués après 1 an de durcissement naturel (ces éprouvettes étant conservées dans l'eau), à l'aide d'une presse, suivant la méthode exposée par (Mezghiche, 1996) [61].

La déformation a été mesurée au moyen d'indicateurs à cadran ayant la valeur d'une division de 0.01 mm qui sont installés à l'aide de cadres appropriés sur une surface de 200 mm dans le sens longitudinal et de 100 mm dans le sens transversal, comportant des plots de mesure (distants de 20 cm). (Photos 5-14 et 5-15).

Selon les résultats des essais des prismes, on a tracé les courbes suivantes :

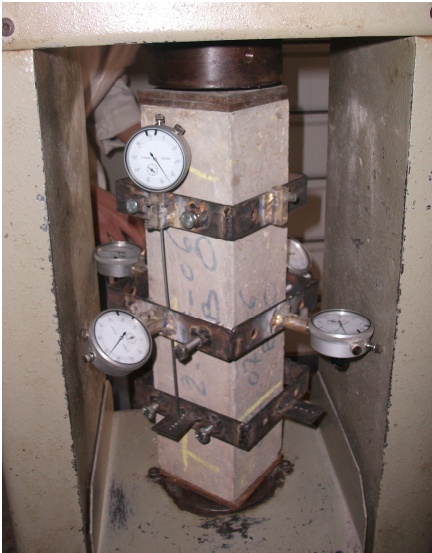
- Déformations élasto-instantanées longitudinales et transversales du béton
- Déformations totales longitudinales et transversales du béton
- Détermination du module de déformabilité et du module d'élasticité du béton



**Figure 5-12 :** L'emplacement d'éprouvette soumis à la compression



**Figure:5-13 :** Epreuve brisée par la compression



**Figure 5-14 :** L'emplacement des cadres et les indicateurs sur l'éprouvette

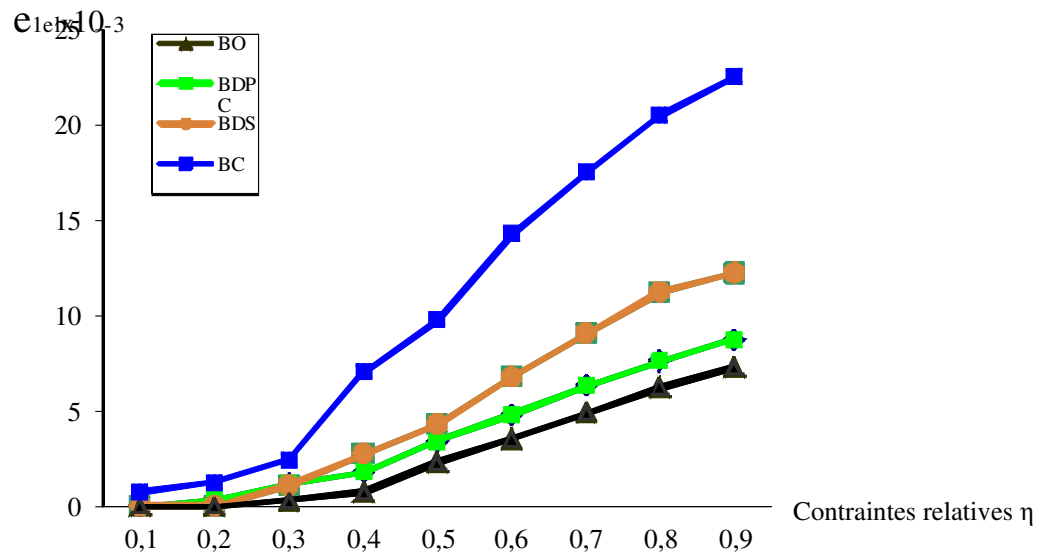


**Figure 5-15 :** Les déformations mesurées Sur l'éprouvette pendant la compression

### 5-9-1 Courbe : contrainte- déformation longitudinales

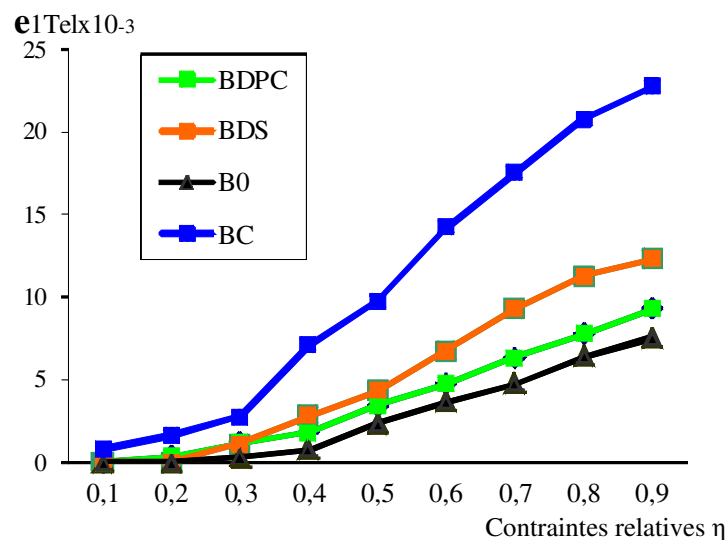
Les déformations élasto- instantanées longitudinales des différents types de bétons ( $\epsilon_{1el}$ ) en fonction des contraintes relatives pour les séries de prismes : BO, BDS, BDC et BDPC qui sont représentées sur les figures (5-16, 5-17)

Déformation élasto- instantanées longitudinales



**Figure 5-16:** Déformation élasto- instantanées longitudinales du béton  $\epsilon_{1el}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes : BO, BDS, BDC et BDPC

Déformation élasto- instantanées longitudinales totales



**Figure 5-17:** Déformation élasto- instantanées totales longitudinales du béton  $\epsilon_{1elt}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes : BO, BDS, BDC et BDPC

Sur les figures ci-dessus, on remarque que la courbe contrainte –déformations longitudinales des bétons ayant une résistance à la compression qui dépasse 70 MPa est très linéaire, et la déformation des BHP à la rupture est plus grande que celle du béton ordinaire.

Le comportement du béton en post-rupture n'est pas étudié (presse travaillant à charge contrôlée), ce qui nous a empêché de calculer la ductilité du béton à haute résistance.

Concernant le comportement en compression la courbe contrainte- déformation se divise en deux parties :

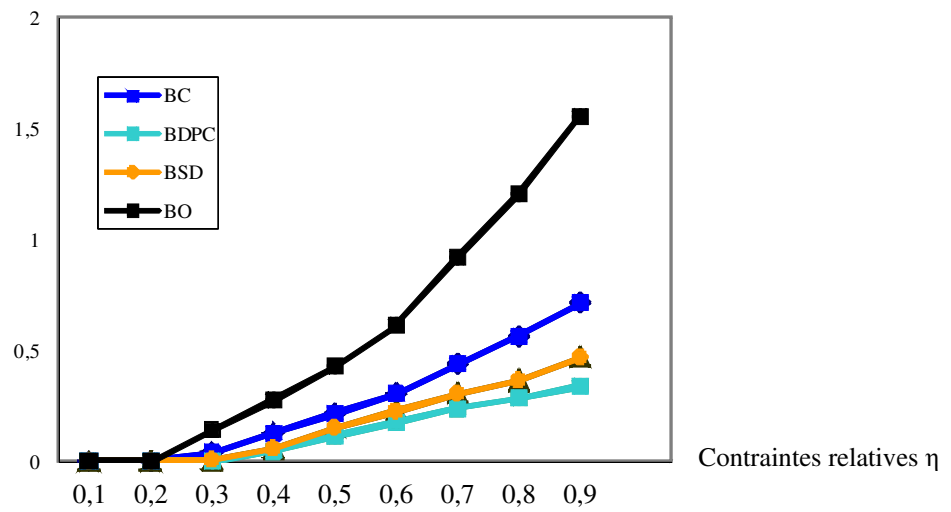
**Partie 1 : (0,1-0,3)**, à signaler que la valeur de la déformation longitudinale en compression est petite c.-à-d. le béton se comporte élastiquement .Lorsque l'effort est supprimé il revient à son état d'origine, soient les microfissures préexistantes ne se propagent pas, soient les nouvelles microfissures formées se renferment après relâchement.

**Partie 2 : (0,3-0,9)**, à constater que la valeur de la déformation est grande et surtout le béton calcaire, donc le béton étant microfissuré surtout à l'interface mortier- granulats, Après cette phase la rupture se produit plutôt brutalement sans avertissement par fissuration préalable ou par déformation importante, traduisant un comportement très fragile. Selon Rossi « Le BHP serait plus fragile que le BO, l'allongement au max de contraintes est un peu plus important que pour un béton ordinaire et les déformations transversales sont qualitativement du même type que celles du témoin, avec une plus faible augmentation de volume » [62]

### 5-9-2 Courbe : Contrainte- Déformation transversales

Les déformations élasto- instantanées transversales des différents types de bétons ( $\epsilon_{2el}$ ) en fonction des contraintes relatives pour les séries de prismes : BO, BDS, BDC et BDPC sont représentées sur les figures (5-18, 5-19).

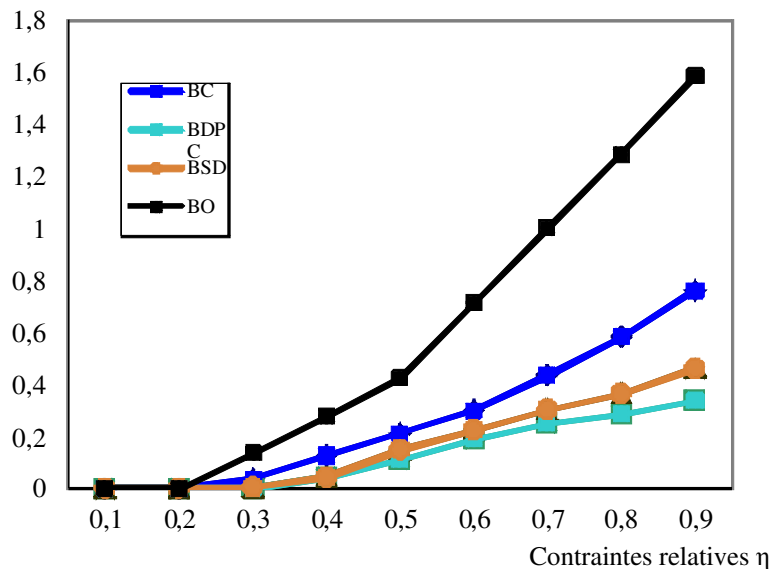
Déformation élasto- instantanées transversales  $\epsilon_{2el} \times 10^{-3}$



**Figure 5-18 :** Déformation élasto- instantanées transversales du béton  $\epsilon_{2el}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes : BO, BDS, BDC et BDPC

Déformation élasto- instantanées transversales totales

$\epsilon_{2elt} \times 10^{-3}$



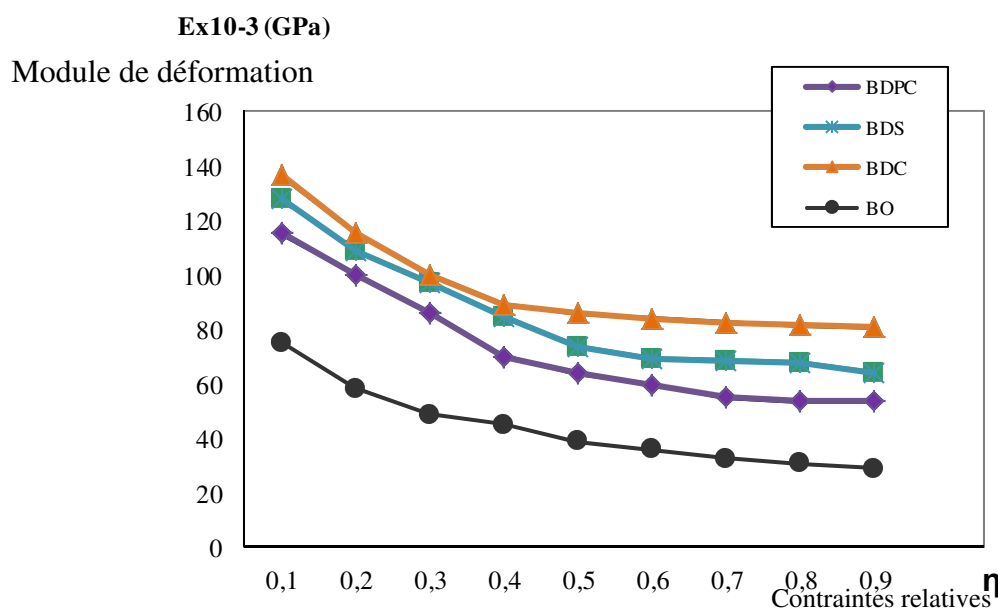
**Figure 5-19 :** Déformation élasto- instantanées totales transversales du béton  $\epsilon_{2elt}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes : BO, BDS, BDC et BDPC



A partir des deux figures ci-dessus, on remarque que le béton ordinaire a des déformations transversales ( $\varepsilon_{2el}$ ) et ( $\varepsilon_{2tel}$ ) plus élevées que celles des autres types de béton contrairement aux déformations longitudinales ( $\varepsilon_{1el}$ ) et ( $\varepsilon_{1tel}$ ), où ils sont représentés par des basses déformations.

### 5-9-3 Module de déformation :

L'évolution du module de déformation en fonction des contraintes relatives, relatives  $\eta$  pour les séries de prismes : BO, BDS, BDC et BDPC, est représenté sur la figure (5-20)



**Figure 5-20:** Module de déformabilité du béton en fonction des contraintes relatives pour les séries de prismes : BO, BDS, BDC et BDPC

A partir de la figure ci-dessus, le module de déformation diminue avec une augmentation de la contrainte relative

Le module de déformation des bétons avec ajouts présente un module de déformation plus élevé que le béton témoin, est probablement lié à leur grande compacité.

Dans l'intervalle des contraintes relatives (0,1-0,4), le module de déformation présente une diminution remarquable pour tous les types de bétons, dans l'intervalle (0,4-0,9), le module de déformation représente un état stable du béton durci, même dans le cas des augmentations considérables de la contrainte

### 5-9-4 Module d'élasticité :

Le module d'élasticité initial à la compression des différents bétons se détermine à partir de la formule suivante :

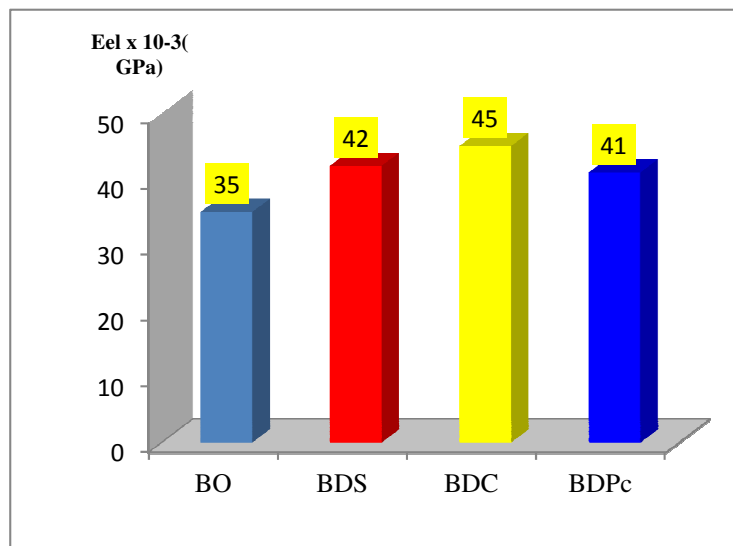
$$E = \Delta\sigma / \Sigma \Delta\varepsilon$$

$\Delta\sigma$  : Somme d'accroissement de la contrainte à chaque degré de 0,05 à 0,3P

$\Delta\varepsilon$  : Somme d'accroissement de la déformation élasto- instantanée longitudinale du béton relative à chaque degré de la même gamme.

La figure (5-21) présente le module d'élasticité des différents bétons (BO, BSD, BC et BDPC)

Module élasticité



**Figure 5-21:** Module élasticité des bétons BO, BSD, BC et BDPC

D'après les résultats ci-dessus, on remarque que le module d'élasticité varie presque de la même manière que les résistances mécaniques, il apparaît que le module d'élasticité dépend du rapport E/C, le type de liants utilisés, le type de granulats, la finesse, les types de béton (ordinaire ou avec ajouts), et de l'âge du béton. Cependant, ces paramètres n'ont pas le même effet sur le module d'élasticité, car c'est surtout le rapport E/C associé à l'ajout d'un superplastifiant qui a un grand effet, et avec un âge avancé (2 ans) le béton ordinaire atteint un niveau de module d'élasticité d'une valeur est proche à celle des autres bétons, ces résultats sont confirmés avec les résultats obtenus par (Chaid et al.2010) [63].

Les bétons avec ajouts ont une rigidification beaucoup plus précoce que le béton ordinaire. En effet, toutes les relations de corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression, ont donné des expressions du module en fonction de la racine carrée ou cubique de la résistance, telle que la formule établie par le règlement BAEL 91

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{R_{cj}} \quad (\text{MPa})$$

$E_{ij}$  : le module d'élasticité à l'âge (j) en (MPa)

$R_{cj}$  : la résistance à la compression à l'âge (j) en (MPa)

Et d'autre part, (Aitcin, 1987), a abouti à la formulation de corrélation suivante :

$$E_{ij} = 3320 \sqrt{R_{cj}} + 6900 \quad (\text{MPa})$$

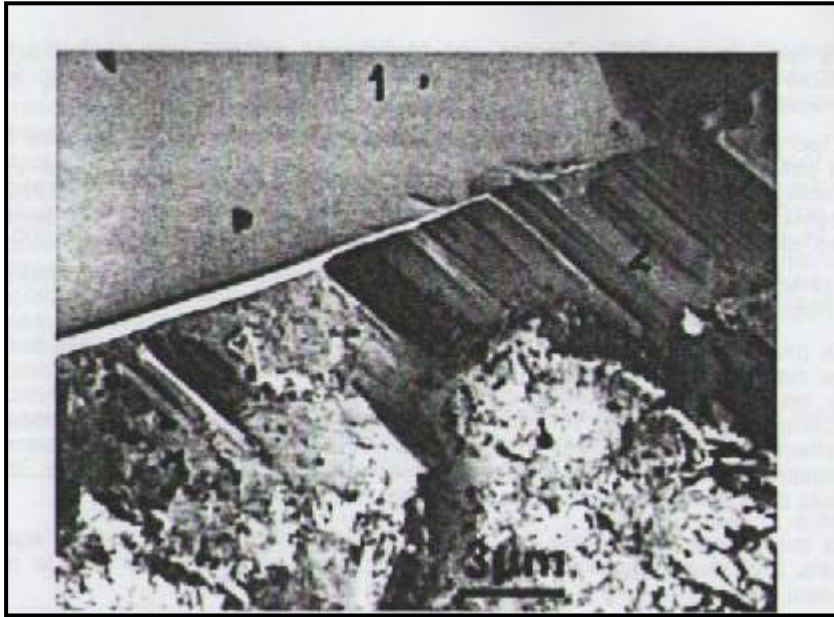
Cette dernière formule paraît être plus convenable pour nos résultats expérimentaux.

## 5- 10 MICROFISSURATION DES BHP

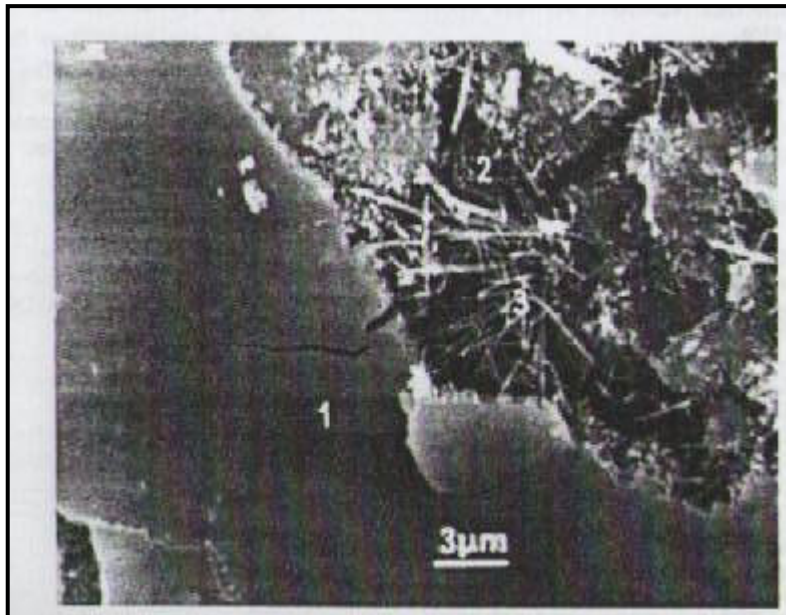
L'interface pâte de ciment- granulats dans un béton, appelée « auréole de transition », a été trouvée mieux cristallisée, plus poreuse et moins résistante que la matrice, en raison d'un excès d'eau. Dans la dernière décennie, des nombreuses études ont été réalisées sous l'angle de la microstructure et de la mécanique [64].

Les caractéristiques de la liaison pâte de ciment- granulats comprennent la surface de fracture, la fissuration, la composition et la texture des hydrates, à titre d'exemple, les fissures contournent les granulats siliceux puis progressent dans la matrice figure (5-22). Des cristaux de  $\text{Ca(OH)}_2$  s'orientent sur les granulats. Un film de  $\text{Ca(OH)}_2$  amorphe peut aussi voir figure (5-23), il n'est que faiblement lié au granulats et s'en détache facilement, au contraire, avec des granulats calcaires qui peuvent être considérés comme réactifs, les fissures progressent dans la pâte de ciment au-delà d'une zone de réaction figure (5-22).

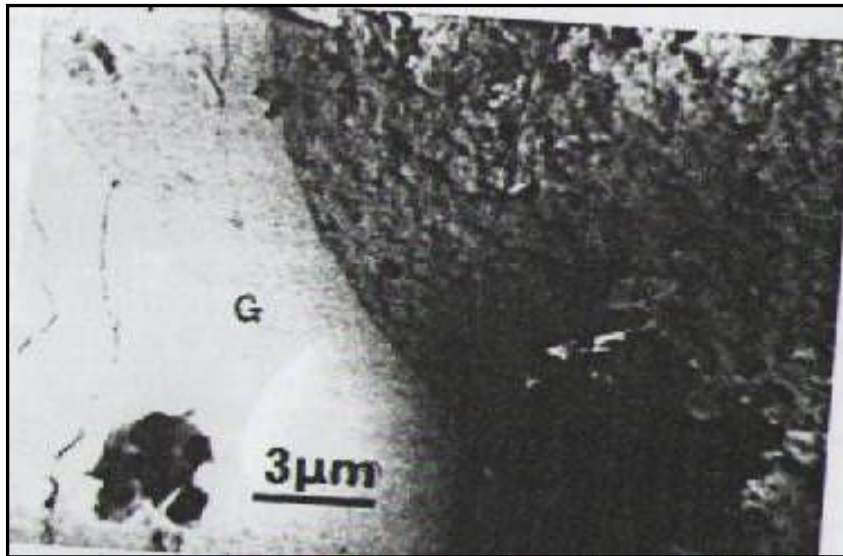
La liaison pâte de ciment -granulats a été trouvée meilleure avec des granulats concassés qu'avec des granulats roulés, les résistances en compression sont respectivement de 94 et 77 MPa [65].



**Figure 5-22:** Béton de ciment portland interface matrice -granulats siliceux :[1] fissure le long du granulats et [ 2] l'orientation des cristaux de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [40].



**Figure 5-23:**Béton de ciment portland. Film d'amorphe sur un grain de quartz,CSH et ettringite dan la matrice[40].



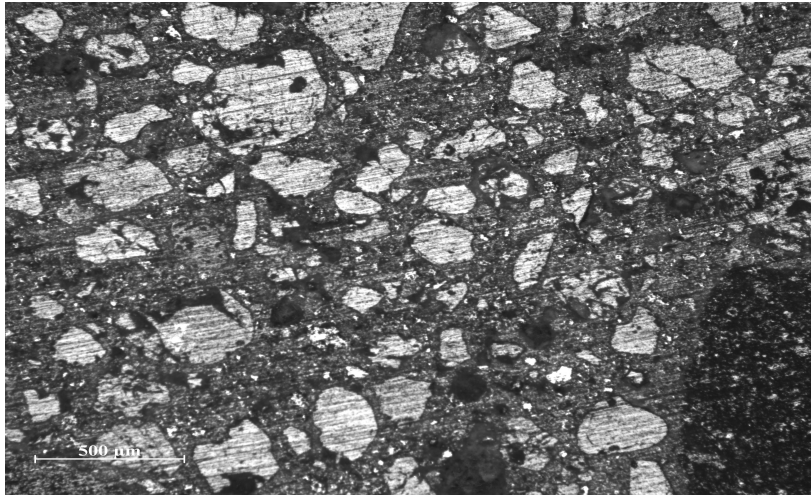
**Figure 5-24** : Béton de ciment portland interface matrice -granulats calcaire [2] fissuration dans la matrice au déla de la zone de réaction calcit- ciment [1] [40].

La microfissuration des bétons est liée à :

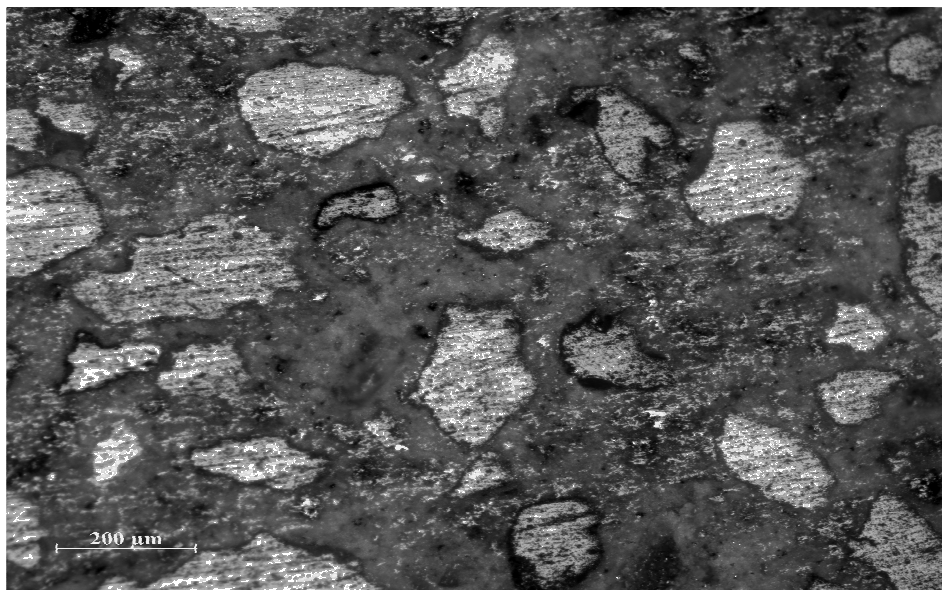
- des différents phénomènes physico-chimiques internes, chaleur d'hydratation, auto dessiccation .....etc.
- des contraintes externes d'origine mécanique.
- des fissures se développent à partir des discontinuités préexistantes, aux interfaces matrice- granulats et qui dans la pâte de ciment.

Un agrandissement sur deux échantillons a été fait à l'aide d'un microscope électronique, dans le but de voire l'interface mortier- granulat.

Les photos obtenues sont les suivants :



**Figure 5- 25:**Etat de l'interface matrice- granulats d'un béton ordinaire à l'échelle 500 μm.



**Figure 5-26 :** Etat de l'interface matrice- granulats d'un béton à l'échelle 200 μm.

La meilleure adhérence mortier-granulat c'est le béton calcaire, c'est grâce à l'utilisation du superplastifiant et les ajouts finement broyé qui conduit à une augmentation de la résistance de la pâte, de la résistance de l'interface pâte-agrégat et de la liaison inter-particulaire

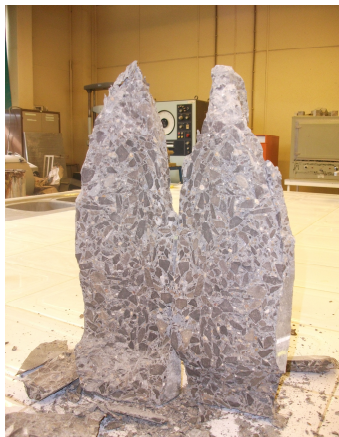


## 5-11 MODE DE RUPTURE

On sait que la résistance à la compression ne soit pas la seule propriété qui rend l'utilisation des BHP avantageuse, elle n'en demeure pas moins très importante. La résistance à la compression est reliée très étroitement aux détails de la microstructure du béton qui ce, gouvernent d'autres propriétés, telles que les propriétés élastiques et la perméabilité.....etc.

Un examen a été fait à l'œil nu la surface de rupture d'une éprouvette de béton soumise à un effort de compression uniaxiale, on a constaté que la rupture d'un béton se développe toujours dans la partie la plus faible des trois régions suivantes : le mortier, les granulats faibles, la zone de transition. On a remarqué que la plupart des échantillons d'un béton ordinaire se provoquent dans la partie de transition, puisque cette zone constitue le point faible d'un béton ordinaire figure (5-27). Par contre la rupture de la plupart des éprouvettes d'un béton avec ajouts se propage dans le mortier figure (5-28), mais les plans de rupture de quelque éprouvettes se propage à travers ces granulas faibles figure (5-29).

Selon (Aitcin et al,1990) [65], la pâte de ciment hydraté est très poreuse qui contient de nombreux cristaux de portlandite, d'ettringite et de monosulfoaluminate parfaitement bien développés .Par conséquent, si l'on veut augmenter la résistance à la compression d'un béton, il suffit de prendre beaucoup de soin à renforcer chacune de ces trois parties .



**Figure 5-27:** Ruine de l'éprouvette dans la partie de transition



**Figure 5-28:** Ruine de l'éprouvette dans la partie de mortier



**Figure 5-29:** Ruine de l'éprouvette dans la partie du granulat

## 5-12 CONCLUSION :

Dans ce travail la conclusion est :

- La confection d'un BHP à base de matériaux locale a permis d'aboutir à un béton de 70 MPa en 28 jours.
- Pour obtenir un niveau de résistance élevée, il faut :
  - abaisser le rapport eau/ liant aux alentours de 0,25 à 0,30,
  - utiliser un superplastifiant de haute qualité.
  - tous les ingrédients du béton doivent être de très bonne qualité.
- Les essais effectués sur les granulats ont confirmé la bonne qualité de ces derniers et leur conformité à l'élaboration d'un béton de qualité
- L'étude des résistances mécaniques des bétons avec ajouts, comparées à celles du béton de référence (à 730 jours), permet de formuler les conclusions suivantes :
  - Le béton avec ajout de calcaire (teneur = 10% et finesse =  $11000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ), a une résistance en compression de 87 MPa et en traction par flexion de 5,3 MPa, soit une augmentation respective de 53% et 21% par rapport à celles du béton de référence.
  - Le béton avec ajout de sable dune (teneur = 15% et finesse =  $8320 \text{ cm}^2/\text{g}$ ), a une résistance en compression de 85 MPa et en traction par flexion de 4,80 MPa, soit une augmentation respective de 49% et 15% par rapport à celles du béton de référence (témoin).
  - Le béton avec ajout de déchet de polissage de carrelage (teneur = 15% et finesse =  $9000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ), a une résistance en compression de 80 MPa et en traction par flexion de 5,5 MPa, soit une augmentation respective de 45% et 25% par rapport à celles du béton de référence (témoin).
- Il n'y a pas de béton à hautes performances sans superplastifiants. En effet, c'est grâce aux superplastifiants qu'on arrive à fabriquer des bétons à hautes performances qui peuvent finalement contenir moins d'eau de malaxage qu'il n'en faut pour hydrater complètement les grains de ciment.
- L'étude de l'influence des ajouts cimentaires sur les propriétés des BHP a montré que ces dernières varient en fonction de la nature de l'ajout. Malgré le caractère variable



du béton, et même si la liste n'est pas achevée, cette distinction fondamentale est due à la diversité des paramètres (dont la plupart est liée aux propriétés physico-chimiques des ultrafines) tels que :

- la forme et l'état de surface des grains.
  - la finesse.
  - l'activité pouzzolanique.
  - le niveau de défloculation
- L'effet des ajouts minéraux sur l'évolution du module élasticité est significatif. Par conséquent, on remarque que le béton avec ajout, présent toujours un module supérieur à celui du béton témoin, ce qui est lié à leur grande compacité.
- Nous avons remarqué un comportement mécanique sensiblement identique pour les différents bétons avec ajouts cimentaires, un comportement élastique peu fragile allant de pair avec l'augmentation des résistances. La ductilité des bétons avec ajouts est améliorée ce qui a engendré des déformations longitudinales plus grandes comparées à celles du béton de référence. Cette amélioration des déformations pourrait être interprétée par l'effet filler des ajouts qui contribuent à l'élasticité du béton durci.

## CHAPITRE 6

### LA DURABILITÉ DU BHP

#### 6-1 INTRODUCTION

La conception de structures en béton relève de la responsabilité des ingénieurs de structures qui, se basent en général, surtout sur sa résistance à la compression à 28 jours. La connaissance de cette résistance est, bien sur, fondamentale pour faire les calculs qui permettent de construire des structures sécuritaires, mais il faut s'assurer que le béton choisi gardera sa résistance mécanique durant toute la durée de vie de la structure. Malheureusement, trop de bétons qui avaient une bonne résistance à la compression à 28 jours ont perdu presque toute leur fonctionnalité parce qu'ils ont dû affronter un environnement pour lequel ils n'avaient pas été conçus.

L'expression *durabilité* est généralement utilisée pour caractériser de façon générale la résistance d'un béton face à l'attaque d'un agent agressif physique ou chimique. La nature, l'intensité et les mécanismes concernés dans chacun des cas et les différents impacts peuvent se varier considérablement. L'expression durabilité du béton est donc parfois a un sens beaucoup trop vague. D'ailleurs, aucune méthode normalisée ne permet de mesurer la durabilité d'un béton ; il n'y a pas d'unité pour évaluer la durabilité du béton comme il en existe lorsqu'on veut mesurer la résistance à la compression [40].

Dans ce chapitre des divers aspects de la durabilité du BHP sera traité comme:

- 1- Les cycles eau/ air
- 2- La perméabilité d'eau
- 3- La capacité d'absorption d'eau
- 4- L'action des hautes températures
- 5- L'attaque chimique par différents milieux agressifs.

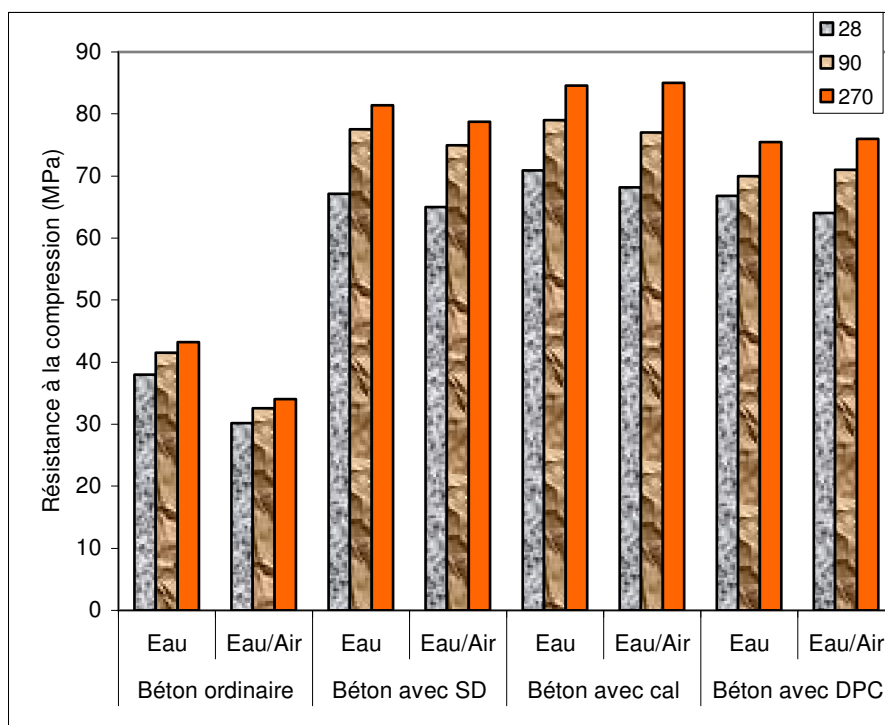
## 6-2 DURABILITÉ DES BHP SOUMIS AUX CYCLES EAU/AIR

### 6-2-1 La résistance à la compression

Les différentes éprouvettes de bétons préparées, sont conservées dans une salle sous une température ambiante pendant 24h. Elles sont en suite soumises aux cycles immersion /Séchage. La durée de l'essai a été fixée à 28, à 90 et à 270 Jours

L'essai de mouillage - séchage à l'air se définit comme une suite alternative d'une période de mouillage à 20C° pendant 24 heures et d'une période de séchage à l'air pendant 42 heures selon la norme ASTM D 559-57.

L'évolution des résistances mécaniques des éprouvettes de béton conservées dans l'eau potable et les autres qui ont subi les cycles d'immersion dans l'eau et séchage à air jusqu'à 9 mois, les résultats obtenus sont représentés sur la figure (6-1)



**Figure 6-1.** L'évolution des résistances mécaniques à la compression en fonction des cycles (Mouillage- Séchage à l'air).

A partir de la figure ci-dessus, les résistances des échantillons des bétons avec ajouts exposés à l'eau et séchage à l'air augmentent de la même façon que celles immergés dans l'eau. L'accroissement de la résistance peut être expliqué par les améliorations des conditions de la cristallisation des produits, et en plus, la diminution les contraintes thermiques qui

provoquent la diminution de l'apparition des microfissures (dans notre cas il y a une absence des fissures) .Contrairement au béton ordinaire, qui a subit une diminution de 22%, cette décroissement est bien liée à la modification de la structure du béton.

Le carbonate de calcium, est un sel qui a deux propriétés; il est basique par  $\text{CO}_3$  et il donne un sel mixte peu soluble avec l'aluminate [66,67].

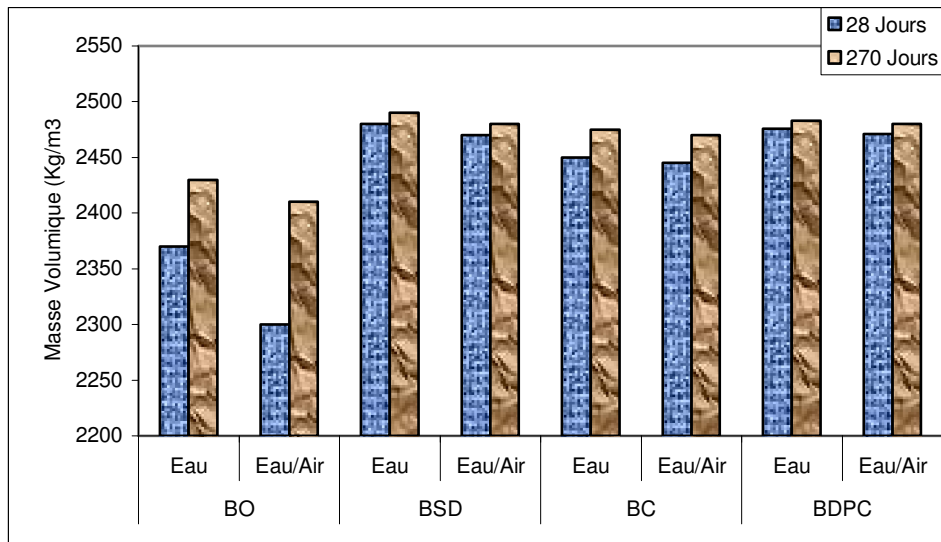
Selon (Ollivier, 1975) [68], il existe des forces de type chimique qui s'ajoutent à celles de Van der Waals pour assurer la cohésion entre la pâte de ciment et les granulats calcaires. Ce qui explique l'augmentation de la résistance mécanique du béton au filler calcaire et Déchet de plissage de carrelage en fonction du temps de conservation, elle dépasse au béton de référence (sans ajout). Cette observation montre l'intérêt et l'efficacité ces fillers sur le comportement mécanique.

L'incorporation d'ajout du sable de dune finement broyé qui conduisent à la formation d'hydrosilicates supplémentaires issues de la fixation de la portlandite par les ultrafines particules de silice, ce dernier va remplir les pores, en effet ce processus a une influence directe sur le squelette de la pâte du ciment et du béton et permet au béton de diminuer les possibilités de pénétration des agents agressifs externes, on obtient ainsi des bétons plus durables [21].

### **6-2-2 Masses volumiques**

Concernant la variation de la masse volumique des différents bétons conservés dans l'eau courante et ceux ayant subit les cycles Eau/Air, elle à la même tendance que celle des résistances mécaniques figure (6-1). Plus le matériau est dense plus sa résistance mécanique est supérieure.

Une faible augmentation des masses volumiques des bétons avec ajouts est notée, qui ont atteint rapidement une limite de saturation. Leur forte compacité par rapport au béton ordinaire explique ce résultat. En revanche, le béton ordinaire continue à capter de l'eau pendant (09mois).



**Figure 6-2 :** Évolution des masses volumiques des bétons en fonction du temps.

Cependant, La mouture élevée des fines, conjuguée à l'action du superplastifiant (Le Meda Flow 30), favorisent l'accroissement de la compacité des bétons durcis. Ce qui explique l'augmentation de leurs masses volumiques par rapport au béton de référence, comme il a été mis en évidence par plusieurs chercheurs (Chaid et al, 2005)

### 6-3 LA PERMEABILITÉ A L'EAU DU BÉTON :

Les transferts de matière au sein d'un milieu poreux peuvent se réaliser suivant deux mécanismes distincts, dans un béton durci ces transferts s'établissent par l'intermédiaire du réseau poreux, mais également par le réseau de fissures qui résulte du fonctionnement normal des structures en béton armé ou d'éventuelles causes accidentelles.

(Melbouci, et al.2006) [69], ont montré que la fissuration peut avoir une grande influence sur la perméabilité des bétons.

La perméabilité quantifié l'aptitude d'un matériau poreux elle se laisse traverser par un fluide. Elle caractérise un écoulement visqueux sous gradient de pression, cet écoulement peut se produire dans un béton de barrage par exemple, ou encore dans un béton de fondation par ascension capillaire due à une variation du niveau de nappe. Ce processus est décrit par la loi phénoménologique de Darcy.

La perméabilité d'un matériau dépend bien sûr de sa porosité, c'est à dire du volume des pores par unité de volume, mais aussi de la taille des pores et de la distribution de leur taille ou de la répartition porosimétrique. La perméabilité est également un bon indicateur de l'endommagement des ouvrages.

Donc il faut avoir une connaissance sur la perméabilité de l'eau du béton, ainsi que certains facteurs qui la contrôlent à une meilleure durabilité des ces bétons.

### 6-3-1 Description générale du l'appareil utilisé :

Le dispositif de mesure disponible au niveau du laboratoire de l'université de Biskra est représenté sur la figure ci-dessous figure (6-3), il se compose de :

1/- Trois cellules graduées de capacité 1000 ml, pour la mise en place de l'eau. Elles sont liées par deux conduites, une pour le remplissage d'eau et l'autre pour l'air.

2/- Trois emplacements, pour le maintien des éprouvettes cylindriques 16 cm x 16 cm munis d'un joint, pour assurer l'étanchéité.

3/- Une conduite d'eau et d'air en pression.

4/- Un régulateur de pression.

5/- Un compresseur à air de capacité de 10 bars.

La durée de l'essai estimé c'est 8 heures, dont la pression est augmentée d'une unité (1bars) par heure, à la fin de l'essai la pression atteindra 10 bars.



Figure 6-3 : Le dispositif de perméabilimètre

La durabilité sera étudiée de la perméabilité des 04 formulations optimales des (BO, BC, BSD, BDPC), après 01 an de durcissement en milieu humide et en milieu sec.

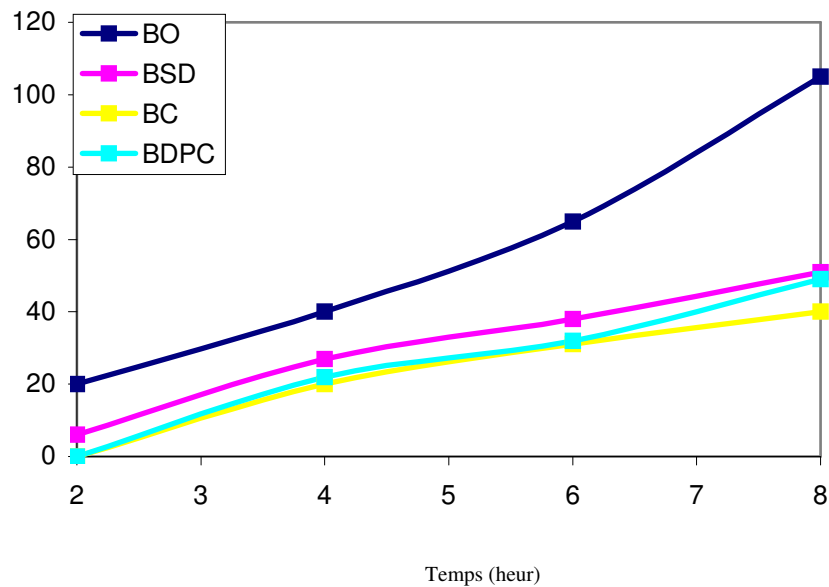
### 6-3-2 Influence du mode de conservation :

Le mode de conservation est un facteur très important, parce qu'il influe directement sur la vitesse de durcissement des bétons et aussi sur leur structuration.

L'influence sera vue du mode de conservation sur les caractéristiques des bétons.

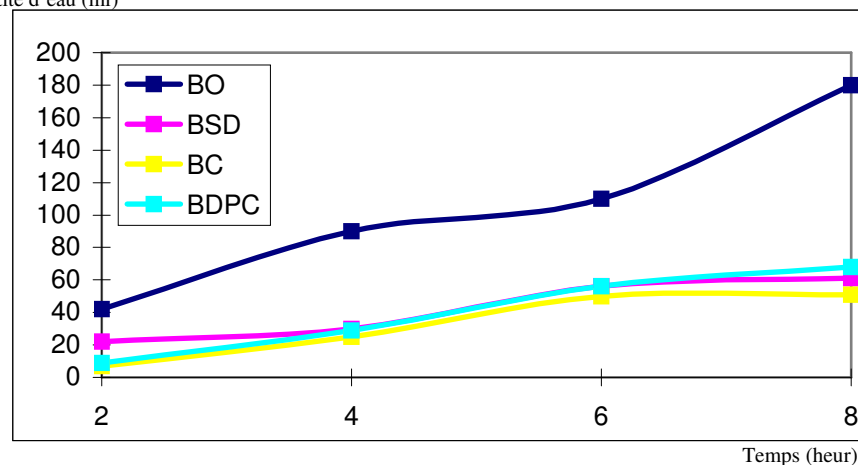
Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (6-4) et la figure (6-5).

Quantité d'eau (ml)



**Figure 6-4 :** La variation de la quantité d'eau en fonction du temps (conservation humide)

Quantité d'eau (ml)



**Figure 6-5 :** La variation de la quantité d'eau en fonction du temps (conservation à l'air)

D'après les figures ci-dessus, on remarque que :

- Il y a une différence entre la perméabilité de bétons conservé à l'eau, et de bétons conservé à l'air, on trouve la perméabilité de ce dernier plus grande que le béton conservé à l'eau, les écarts sont respectivement BC= 13,6 %, BSD=16,4%, BDPC=18,4% et BC=41,6, cette différence peut être expliquée par le fait que, le béton conservé à l'air perd une grande quantité de son eau, ce qui empêche l'hydratation du ciment, ce phénomène traduit par une forte valeur de perméabilité. Par contre, pour un béton conservé à l'eau, il n'y a plus de départ d'eau, et l'hydratation de ciment peut se poursuivre pour former les hydrates.
- Le mode de conservation a une influence particulière sur les propriétés du béton, quand ce dernier n'était pas protégé, il perdait son eau par évaporation et sa résistance était considérablement réduite. Cependant, pour obtenir un béton relativement imperméable, il faudrait une conservation totale à l'eau, c'est à dire le degré d'humidité est 100%.
- Une variation remarquable entre le béton témoin et les bétons avec ajouts pour les deux milieux de conservation. La perméabilité mesurée sur les bétons avec ajouts moins que celle mesurée sur le béton témoin, cette différence remarquable entre les quantités d'eau infiltrée peut être expliquée par l'effet des ajouts qui nous donne sur une création d'une structure plus dense à cause de la diminution de la porosité.
- Les bétons avec ajouts, ont une forte imperméabilité parce qu'ils possèdent un degré de saturation plus faible que celui du béton témoin, par conséquent, l'eau aura le temps de se déplacer à l'intérieur des pores du béton.
- La relation est très claire entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression. La perméabilité à l'eau diminue rapidement avec l'augmentation de la résistance, cependant pour des résistances très élevées, la perméabilité évoluera très peu et atteint un niveau très faible.
- En pratique la perméabilité à l'eau présente l'avantage d'être plus représentative du matériau en service. Cependant, le principal inconvénient de la perméabilité à l'eau réside dans le fait que l'eau n'est pas totalement inerte vis à vis de la pâte de ciment



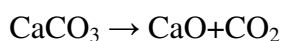
[70,71]. Les composés hydratés de la pâte de ciment forment un milieu basique prononcé. La plus grande partie des milieux fluides présentent ainsi un comportement acide vis à vis du béton. Les milieux acides agressifs pour le béton débutent par les eaux pures, s'étendent aux eaux douces peu ou beaucoup chargées en dioxyde de carbone, puis aux pluies acides, pour s'achever aux acides minéraux et organiques, les interactions entre l'eau et la matrice cimentaire se traduisent entre autre par un phénomène de dissolution de la portlandite et par un phénomène de précipitation de carbonate de calcium, très peu soluble, qui accroît momentanément la compacité du béton en diminuant la section des pores .

#### 6-4 L'ACTION DE FORTE TEMPÉRATURE SUR LE BHP

L'un des grands risques que pose le béton à hautes performances (BHP) est l'effritement sous l'effet du feu, lequel est dû à son faible rapport eau/ciment (Kodur, 2000). L'effritement se produit au début de l'incendie et peut donc poser un risque au niveau de l'évacuation des occupants. L'éclatement du béton provoquant la désintégration rapide des couches superficielles.

Le comportement aux fortes températures varie avec la nature des granulats, leur coefficient de dilatation, leur porosité et leur teneur en eau (dans le cas des granulats poreux).

Les granulats calcaires commencent à se décomposer à 600C°, la réaction bien connue c'est la suivante :



Les granulats siliceux qui contiennent du quartz se transforment en augmentant le volume.

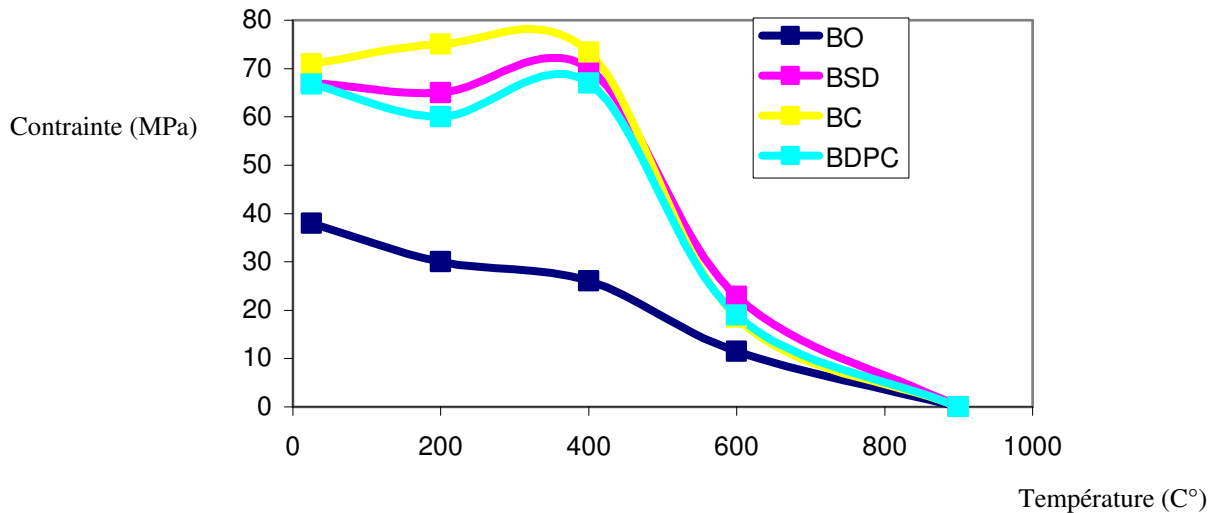
En effet vers 575C°, le quartz change de structure cristalline en passant de la forme  $\alpha$  à la forme  $\beta$ .

Certains granulats des roches ignées (basalte, pouzzolane) résistent bien à des températures modérées jusqu'à 300C° et par fois 900C°.

Dans cette partie la durabilité du béton à hautes performances doit être soumise à des hautes températures, chauffés à 900C°, les bétons avec des ajouts minéraux élaborés des matériaux locaux.

Les éprouvettes des bétons des dimensions (10×10×10) cm<sup>3</sup> sont soumises à la

compression simple, les quatre types des échantillons sont chauffées à différentes températures, 200, 400, 600 et 900 C° par palier de 100 C° tous les 20 min à une vitesse de chauffage de 5 C°/min, l'écrasement intervient après leur refroidissement à l'air libre à l'âge de 28 jours. Le résultat est représenté sur la figure (6-6).



**Figure 6-6 :** Évolution de la résistance à la compression des bétons chauffés à l'âge de 28j.

A travers les résultats obtenus, il apparaît clairement, que la résistance à la compression des bétons dépendant du type de béton (témoin ou avec ajouts). on constate que dans une température ambiante (20C°) la résistance de béton avec ajouts est supérieure à celle du béton témoin

Concernant les bétons chauffés, la résistance varie suivant une même tendance, en effet pour les différents types des bétons (témoin ou avec ajouts), la courbe légèrement diminue puis augmente pour atteindre le maximum de la contrainte aux environs de 400 C° pour tous les bétons, cette augmentation de la résistance serait le fruit de l'effet des produits d'hydrations additionnels. Ce gain de résistance a été observé par [43,72].

Par contre à 600 C° une perte de la résistance est remarquée, est elle attribuée en générale aux endommagements (fissuration interne) causés par: les déshydrations, la pression de vapeur et la destruction des produits d'hydrations surtout au niveau des interfaces

granulats/pâte de ciment, et à 900 C° sont déjà très endommagés, comme l'indique les photos suivantes, figures (6-7 et 6-8)



**Figure 6-7** : Avant l'endommagement



**Figure 6-8** : Endommagement total à 900C°

En comparant l'état des béton étudiés chauffés au béton à base d'un liant à la fumée de silice étudiée par (Djaknoum et al,2005) [43], qui est représenté sur la figure (6-9), on remarque que l'effet est néfaste des hautes températures sur ces types de bétons à haute performance.



**Figure 6-9**: Epreuve 16x32 d'un béton avec de fumée de silice chauffé à 900C° [43].

### 6-5 LA CAPACITÉ D'ABSORPTION MASSIQUE :

La mesure de la capacité d'absorption massique permet de mesurer la porosité ouverte du béton. Cet essai consiste à mesurer l'évolution de la masse des éprouvettes de béton, après immersion dans l'eau, en fonction du temps.

L'absorption se mesure habituellement en faisant sécher une éprouvette de béton à masse constante, en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de masse exprimée en pourcentage de la masse sèche.

Pour les quatre types de béton, l'absorption est mesurée sur des éprouvettes cubiques de 10×10×10cm.

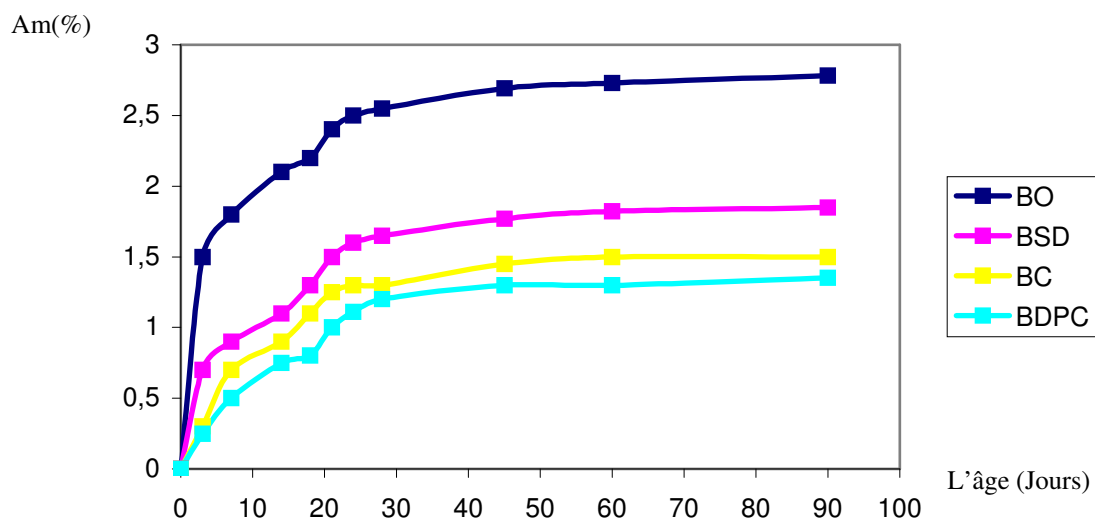
La capacité d'absorption massique  $A_m$  est donnée par l'expression suivante :

$$A_m = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100$$

**M1** : la masse du matériau saturé

**M2** : la masse du matériau à l'état sec

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure suivante :

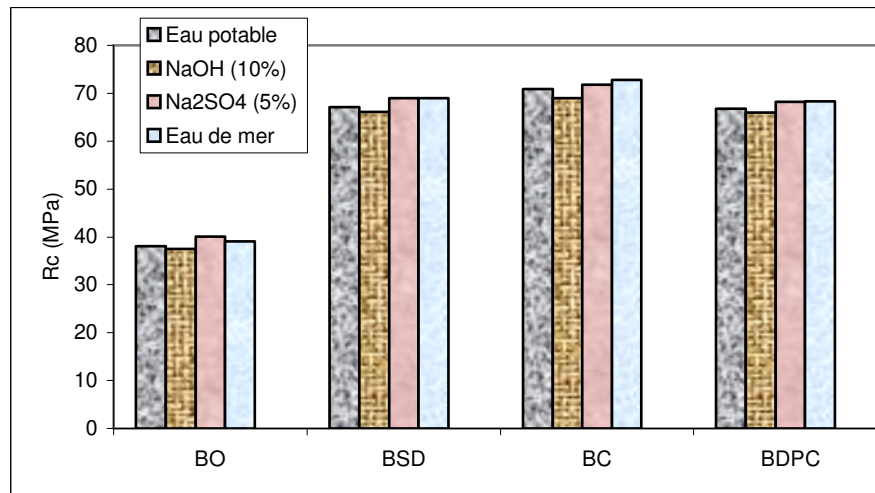


**Figure 6-10:** L'évolution de l'absorption massique en fonction du temps

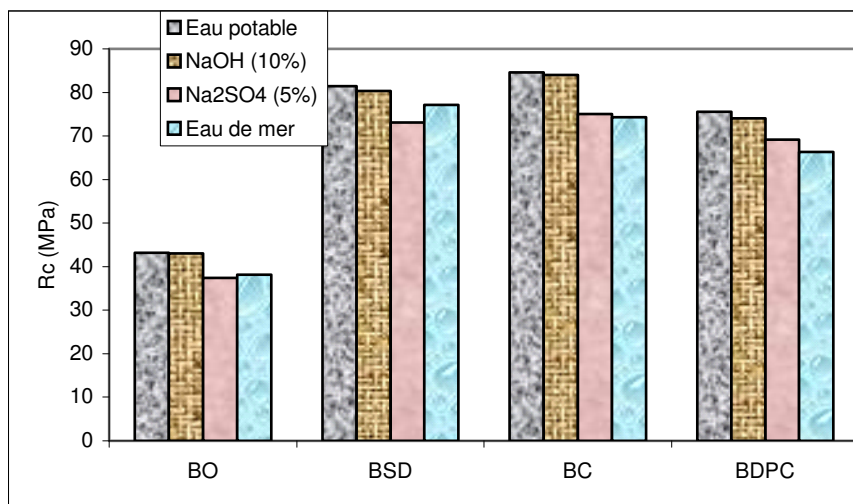
La figure (6-10), montre que l'absorption massique évolue très rapidement aux jeunes âges puis elle tend à se stabiliser, ces résultats confirment bien, en accord avec d'autres chercheurs [73], que la diminution de la quantité d'eau de gâchage, conduit à la diminution de la porosité.



Pour évaluer la durabilité des bétons vis-à-vis l'attaque chimique, nous avons déterminé, la résistance à la compression en fonction de la durée d'immersion. Les figures (6-11 et 6-12) représentent la variation de la résistance à la compression des différents types de bétons après 90 et 270 jours.



**Figure 6-11.** Évolution de la résistance à la compression à l'âge de 90j.



**Figure 6-12:** Évolution de la résistance à la compression à l'âge de 270j.

Les résultats indiqués par les figures (6-11 et 6-12) montrent que :

- Les éprouvettes sont immergées dans la solution du sulfate de sodium Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et l'eau de mer, il y a un gain de résistance pour tous les bétons pendant 90 jours. Au delà de cette période, on a observé une légère réduction de la résistance figure (6-12). L'augmentation de la résistance jusqu'à 90 jours semble être dûe à l'hydratation continue des produits anhydres de ciment et à la réaction de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> avec Ca(OH)<sub>2</sub> pour former le gypse primaire et

l'ettringite primaire, qui complètent les micropores menant à une structure plus dense, ce qui influe positivement sur la résistance mécanique.

Cependant une diminution légère de la résistance à l'âge de 270 jours, indique l'effet d'expansion causé par l'attaque de sulfate et le chlore qui existe dans l'eau de mer, la formation d'un hydrate sulfaté gonflant conduit à la création des microfissures signent d'une déstructuration ultérieure du matériau. Ils sont conformes aux résultats obtenus par des autres chercheurs.

Par contre les échantillons mis en solution basique d'hydroxyde de sodium NaOH, ne sont pas dégradés, le changement de la résistance n'a pas dépassé 1%.

Les couleurs des faces extérieures de ces éprouvettes sont devenue claires (presque blanchâtres) par rapport aux faces intérieures, ce qui traduit la continuité des réactions, d'hydratation, voir les figures (6-13, 6-14 et 6-15).



**Figure 6-13:** Etat des éprouvettes après immersion de 270 jours dans 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$



**Figure 6-14:** Etat des éprouvettes après immersion de 270 jours dans 10% NaOH



**Figure 6-15:** Etat des éprouvettes après immersion de 270 jours dans l'eau de mer

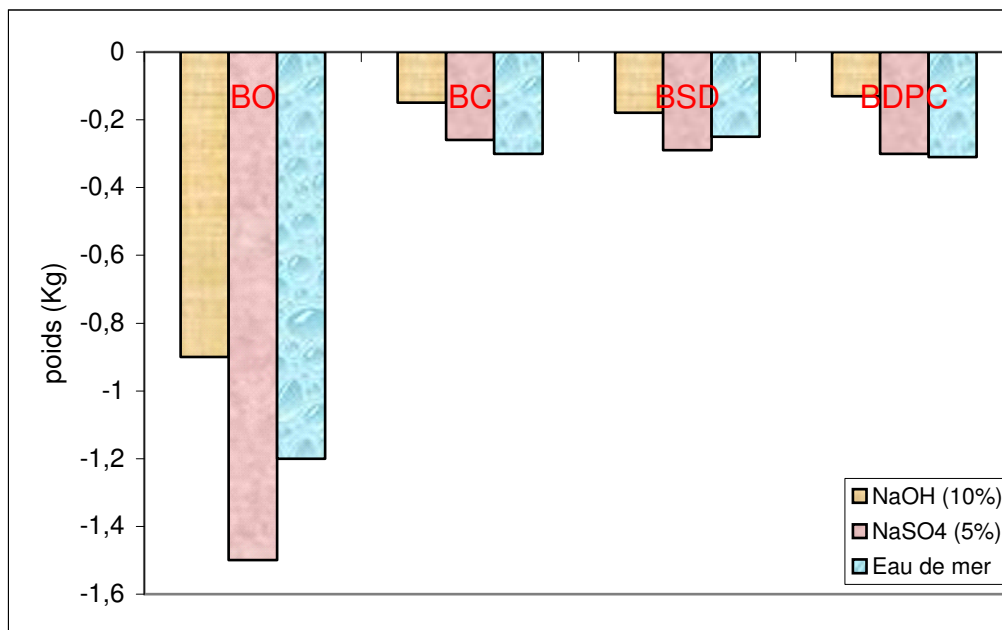
6-6-2

L'influence

## des milieux agressifs sur la masse du BHP

Les éprouvettes sont nettoyées avec de l'eau potable pour éliminer le mortier altéré et puis on les laisse sécher pendant ½ heure, ensuite, on procède à la pesée de ces dernières.

La figure (6-16), représente la variation de la masse des différents types de bétons immergés dans milieux agressifs, après 270 jours.



**Figure 6-16 :** Variation de la masse des bétons immersion dans milieux agressifs

Un constat sera fait, même après 270 jours de conservation dans un milieu agressif, les caractéristiques de ces bétons à haute performance ne sont que légèrement affectées par les dégradations, comparativement au béton de référence, probablement à cause de la compacité très élevée qui est un frein à la pénétration des agents agressifs. Cependant les milieux basiques ne constituent aucun danger pour ces bétons.

### 6-6-3 Analyse aux rayons X :

Les analyses ont été faites au laboratoire de physique à l'université de LAGHOUAT. L'appareil utilisé est un Diffractométrie X'PERT couplé à un système informatique permettant l'exploitation et le tracé des résultats acquis figure (6-23). La diffraction aux rayons X est effectuée sur les fines particules des bétons broyés ( $\varnothing \leq 80\mu\text{m}$ ).



Deux échantillons sont choisis BC et BSD qui donne des meilleurs résultats avec deux milieux agressif ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et avec de l'eau de mer

Une analyse aux rayons X a permis de mettre en évidence l'apparition de phases cristallines au niveau de la surface des échantillons exposés aux milieux agressifs.

Pour distinguer les différents modes de conservation nous allons les classer par ordre.

- **Mode 1** : conservation dans des bacs d'eau sous une température d'environ  $20^\circ\text{C}$ , les éprouvettes sont immergées totalement jusqu'au jour de l'essai.

- **Mode 2** : conservation dans une solution de 5% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  les éprouvettes sont immergées totalement dans des bacs jusqu'au jour de l'essai sous une température ambiante du laboratoire.

- **Mode 3**: conservation dans une solution de l'eau de mer, les éprouvettes sont immergées totalement dans des bacs jusqu'au jour de l'essai sous une température ambiante du laboratoire.

### Béton calcaire :

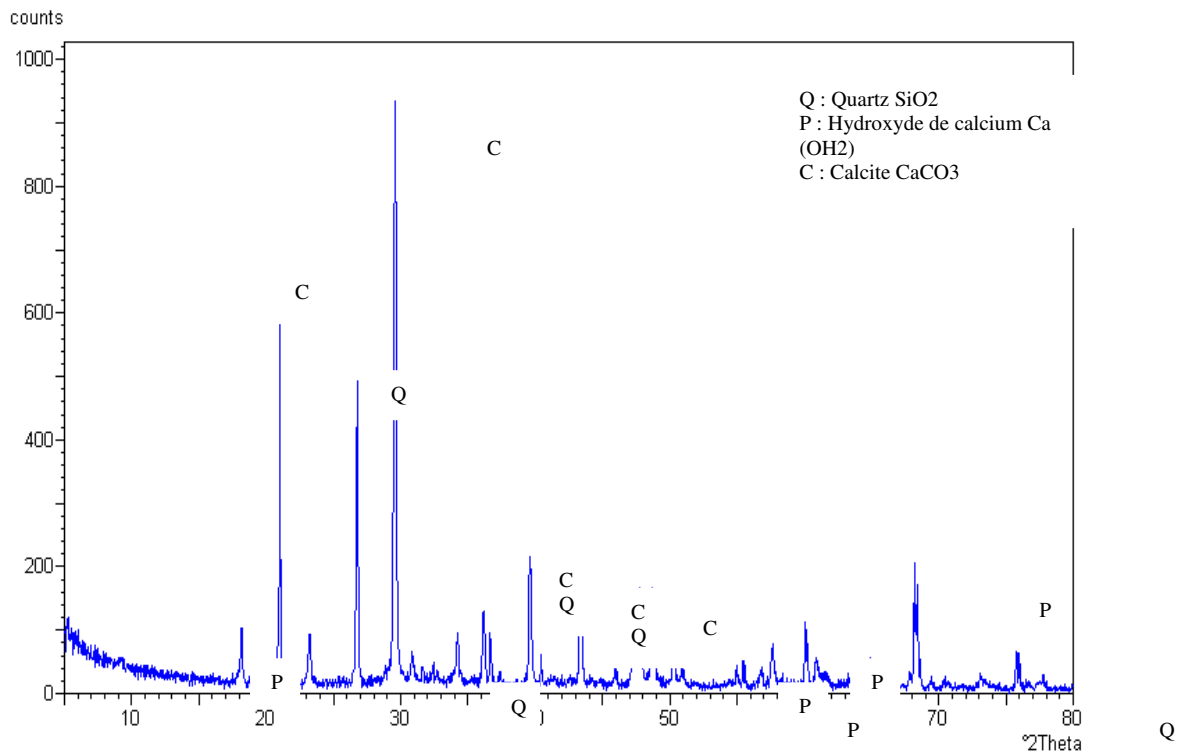


Figure 6-17 : Diffractogramme du Béton calcaire en (Mode 1)

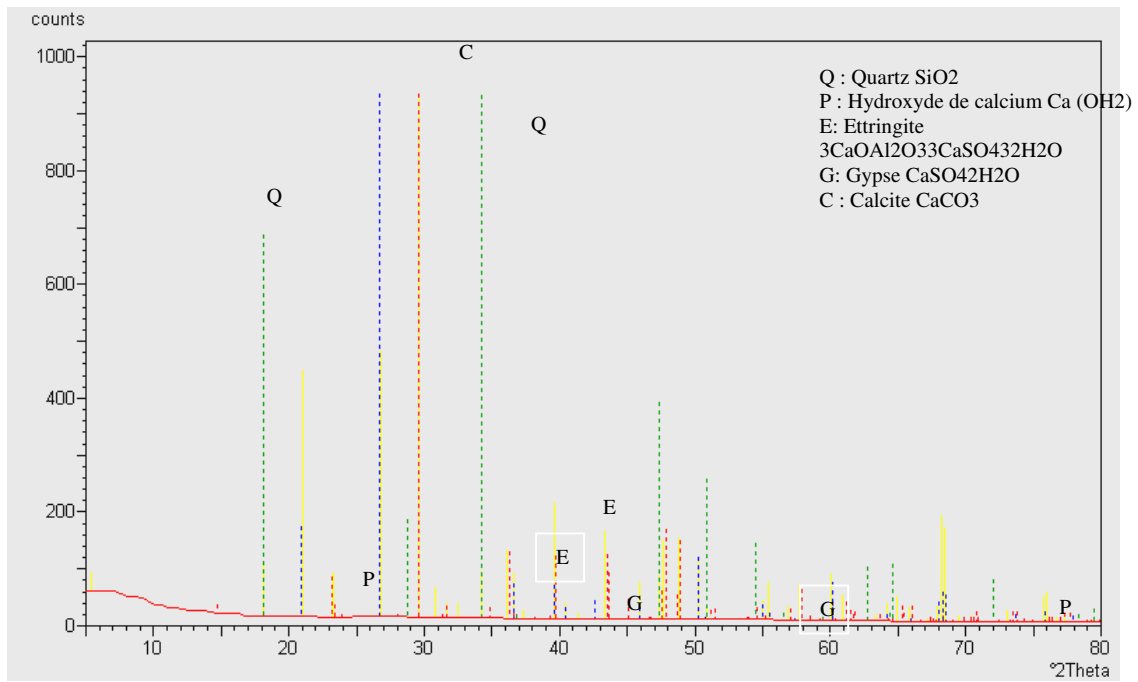


Figure 6-18: Diffractogramme du béton calcaire en (mode 2)

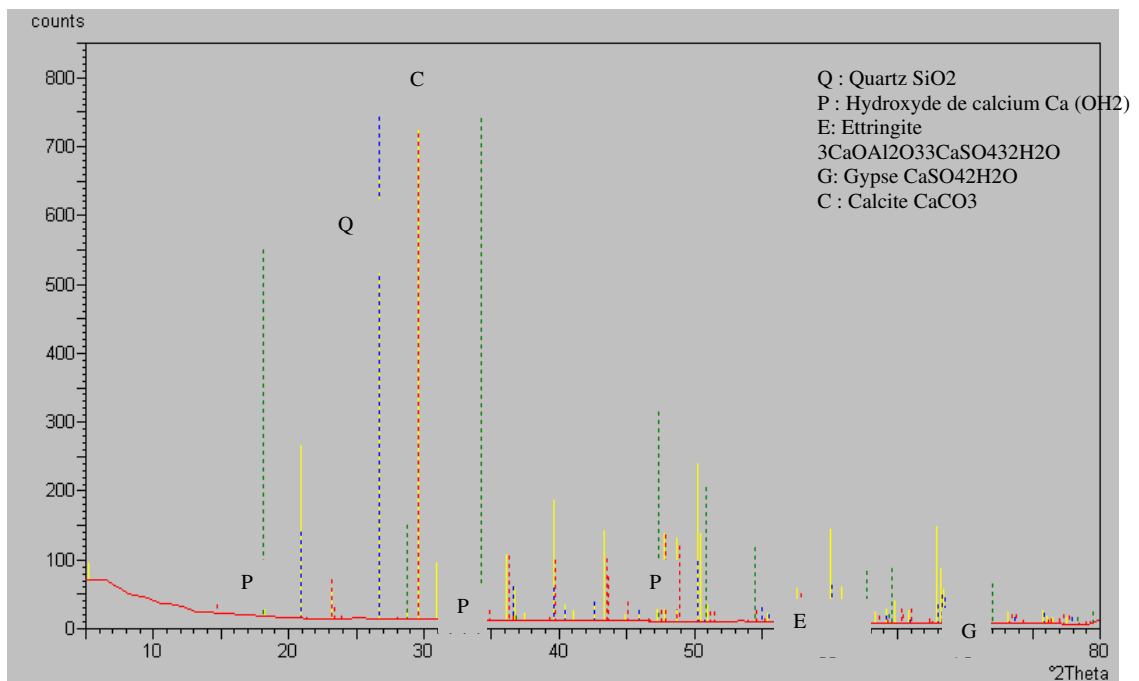
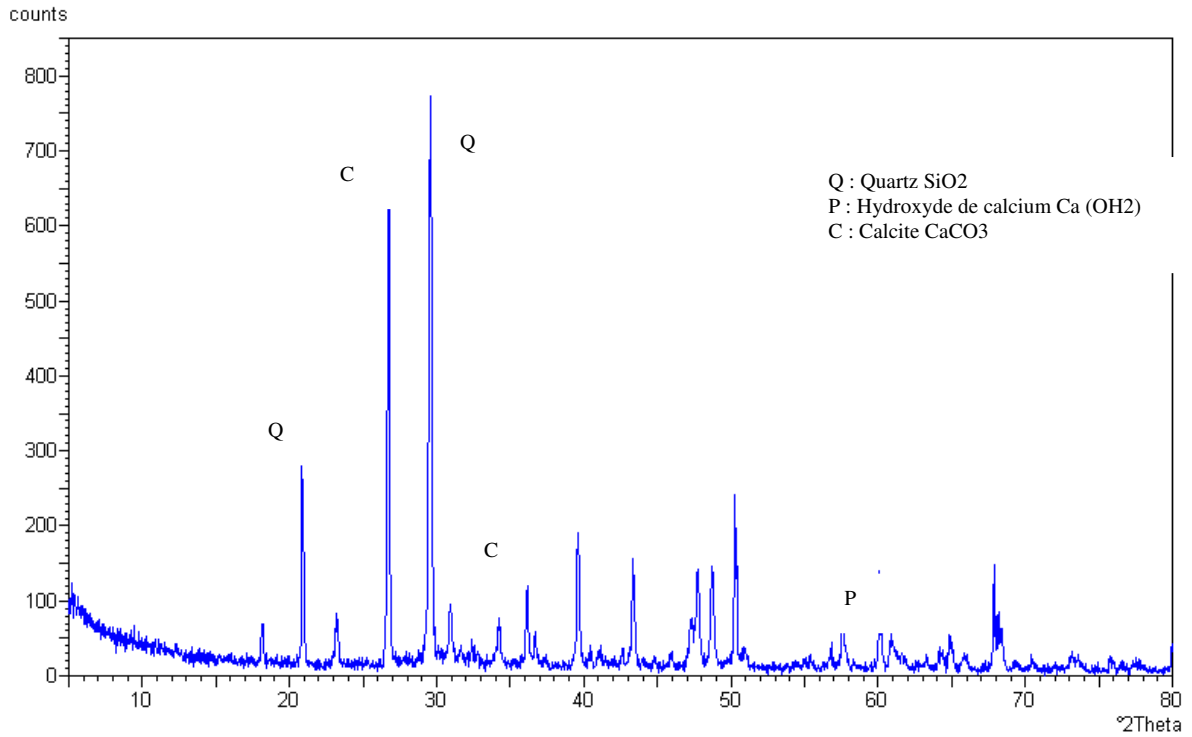
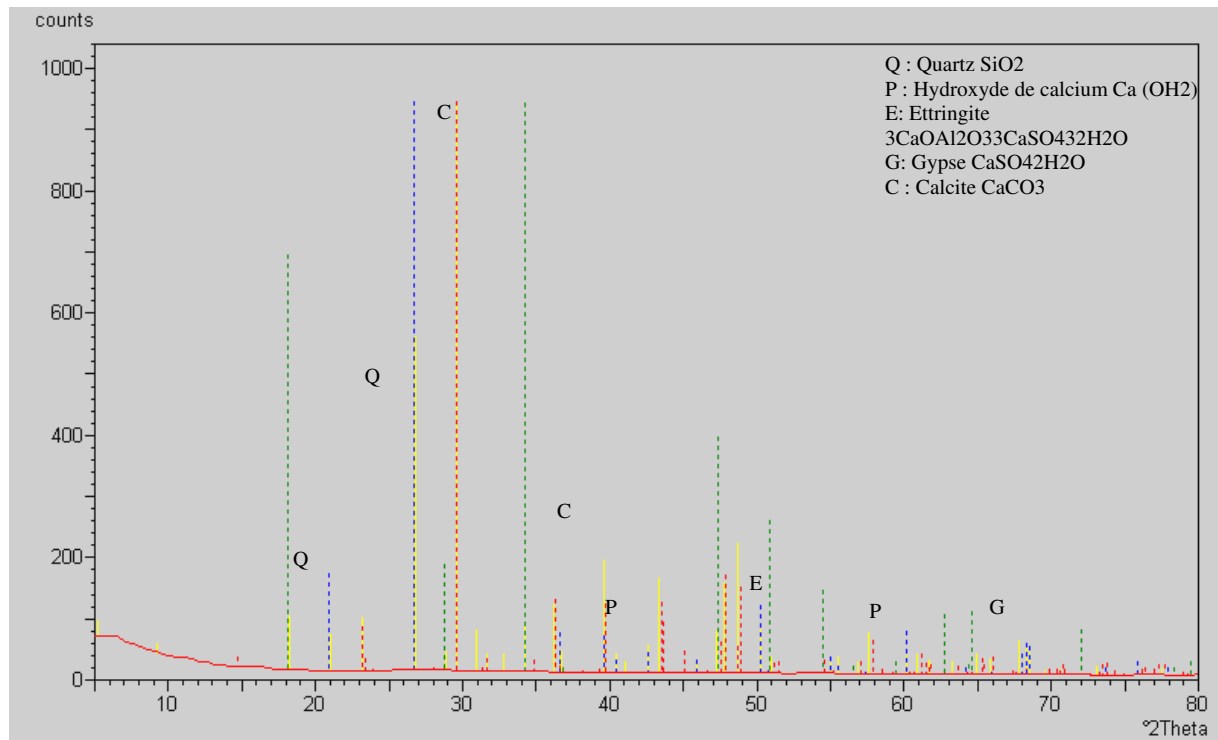


Figure 6-19: Diffractogramme du béton calcaire en (mode 3)

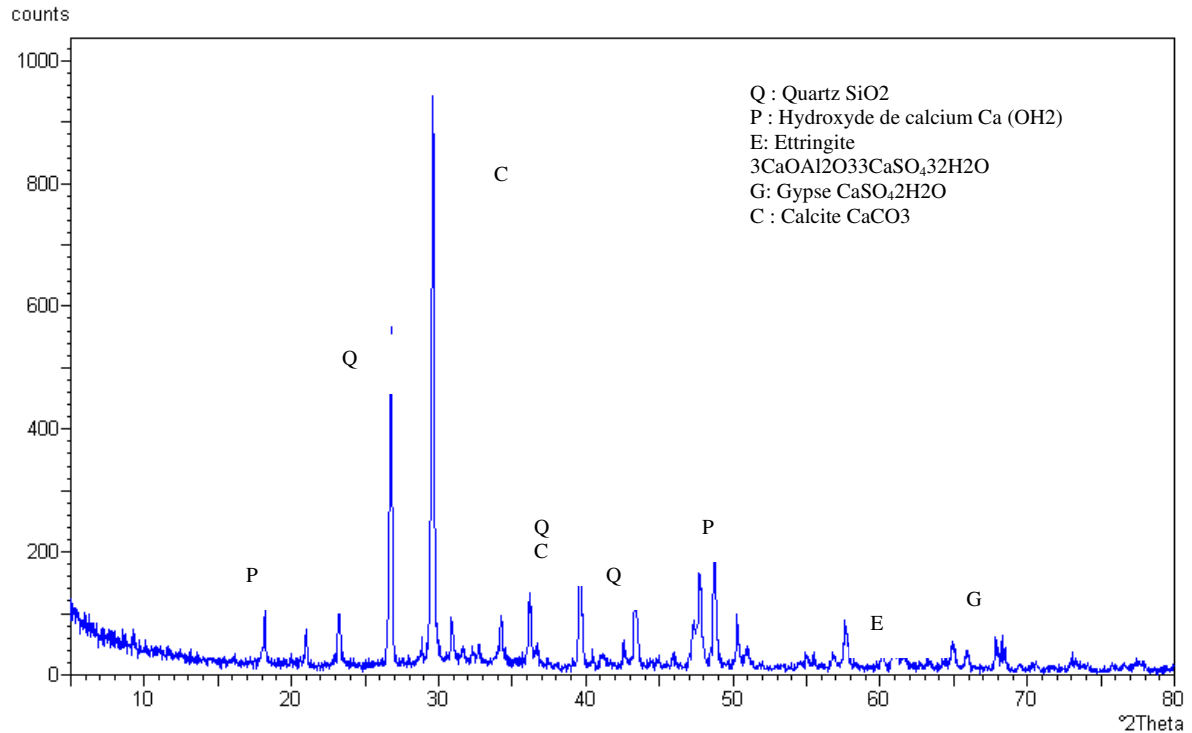
**Béton de sable**



**Figure 6-20:** Diffractogramme du Béton sable de dune en (mode1)



**Figure 6-21:** Diffractogramme du Béton sable de dune en (mode 2)



**Figure 6-22:** Diffractogramme du Béton sable de dune en (mode 3)

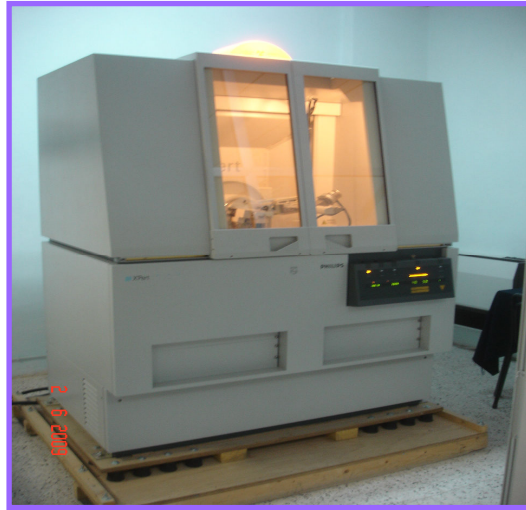
On remarque sur les figures ci-dessus:

Un changement des phases cristallines par rapport aux résultats de bétons calcaire et béton sable de dune pour le mode (1). Ce changement a touché l'état de surface des éprouvettes qui a subi une cristallisation au niveau des pores, ce qui influe négativement sur la durabilité des bétons. Sur les figures ci dessus, on présente quelques modèles de diffractogrammes vu qu'ils sont tous identiques pour tous les types de bétons.

Ils indiquent en plus des phases qui présentent les bétons en mode (1) telles que : le quartz ( $\text{SiO}_2$ ), la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) et la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), et aussi il y a une apparition des nouvelles phases peu importantes ,cristallisées sur la couche de surface de l'éprouvettes ce sont:

- l'ettringite secondaire  $3\text{CaO},\text{Al}_2\text{O}_3,3\text{CaSO}_4,32\text{H}_2\text{O}$ .
- le gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Ces deux nouveaux composés cristallisés, sont les résultats de la réaction des constituants de ciments avec les sulfates. Ils se sont formés à partir de germes de cristallisation dans des conditions de sursaturation de la solution environnante ces résultats sont conforme avec les résultats obtenu par (Damane et al, 2005) [22] .



**Figure 6-23:** Diffractomètre

## 6-7 CONCLUSION

Toutes les observations effectuées dans ce présent chapitre, permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les bétons de résistance mécanique sont obtenus en compression à 28 jours supérieure à 70 MPa, c'est grâce à des ajouts ultrafins, à l'utilisation d'un superplastifiant (Meda Flow30), et à la composition qui est ajustée correctement.
- Le super plastifiant qui a été utilisé dans la confection des bétons joue un rôle primordial dans l'augmentation de la résistance mécanique car il fait réduire la porosité du béton.
- La masse volumique des différents bétons avec ajouts cimentaires, déterminée à l'âge de 270 jours, est sensiblement élevée par rapport à celle du béton de référence, suite à la densification de la matrice, obtenue par l'ajout de particules très fines. On note, une augmentation de 41 kg pour le béton de calcaire et 34 kg pour celui avec ajout de sable de dune, alors que pour le béton de déchet de polissage de carrelage cette augmentation n'est que de 29 kg.
- Le béton calcaire a donné une bonne propriété mécanique à cause de la compacité très élevée.
- A une température ambiante, les ajouts ont fait augmenter la résistance à la compression du béton par rapport au béton témoin.
- Lorsque la température augmente, la résistance du béton diminue par contre la porosité augmente, d'une façon presque linéaire en fonction de la température, à

400°C la résistance des bétons avec ajouts atteint une résistance mécanique maximale (un pic).

- Après 270 jours de conservation dans les milieux plus ou moins agressifs, les caractéristiques des bétons avec ajouts cimentaires, ne sont pas affectées par les dégradations, probablement à cause de la porosité très faible qui est un frein à la pénétration des agents agressifs et aussi à la sortie des cations.
- Les milieux basiques ne constituent aucun danger pour ces bétons.
- Les milieux (sulfate de sodium  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et l'eau de mer), ont un gain de résistance pendant 90 jours. Au delà de cette période, il y a une légère diminution de la résistance
- La diffractogramme aux rayons X effectuée sur des éprouvettes immergées dans les solutions de ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et l'eau de mer) à l'âge de 9 mois montrent l'apparition des phases cristallines comme le gypse et l'ettringite secondaire qui sont deux produits un peu néfastes aux bétons
- Étant donné la très grande résistance chimique qu'offrent les BHP, il est d'ores et déjà logique de penser que, dans un avenir très proche, les concepteurs retiendront, dans nombre de cas, l'utilisation d'un BHP, non pas pour sa résistance à la compression, mais plutôt pour sa très grande imperméabilité aux agents agressifs. La résistance supplémentaire apportée par les BHP pourra être alors considérée comme une « prime structurale».

A toutes fins utiles, la réduction du rapport E/C et l'incorporation d'une partie de ciment par l'ajout cimentaire, ont conduit à la protection des béton élaborés, contre les agressions chimiques, en réduisant leur porosité, et par voie de conséquence, la circulation des éléments agressifs.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le béton moderne est en train d'évoluer, un matériau ordinaire destiné au marché de consommation habituel vers un matériau de pointe destiné à des marchés niches. Cela ne veut pas dire que les bétons de 15 à 20 MPa sont condamnés à disparaître, car il existe de nombreuses applications où les concepteurs n'ont pas besoin de béton ayant une résistance à la compression plus élevées. Cependant, de plus en plus des bétons de pointe commencent à être utilisés dans des marchés niches ou leur utilisation conduite à une diminution significative des coûts initiaux et d'entretien. Il est aussi facile de démontrer que tels bétons sont beaucoup plus avantageux, non seulement du point de vue socioéconomique mais aussi environnemental [60].

L'objectif de ce travail est de fabriquer un BHP performant et économique à base de matériaux locaux. Un BHP ayant des propriétés (mécanique, physique, élastique, durabilité et de mise en oeuvre) très élevé.

D'après les résultats de recherche, toutes les observations effectuées dans ce présent travail, permettent de tirer des conclusions, on peut les classer sur 3 types :

### TYPE 1 :L'OUVRABILITÉ

- Les différents paramètres qui conditionnent la rhéologie des bétons, en présence d'un superplastifiant peuvent être:
  - les teneurs en  $C_3A$ ;
  - la finesse du liant;
  - les dosages en superplastifiant et le mode de leur incorporation.
  
- du point de vue  $C_3A$ , plus le ciment contient du  $C_3A$ , moins le superplastifiant est efficace.
  
- Le mode d'introduction du superplastifiant, influencé sur l'augmentation de l'affaissement. La procédure de l'addition immédiate (1/3 dans l'eau de gâchage et 2/3

avant la mise en oeuvre) produit un béton moins fluide que dans le cas d'une incorporation différée (2'30" après l'introduction de l'eau de gâchage), ce moment correspond au début de la période dormante.

- Dans le béton des ajouts minéraux faiblement actifs sont incorporé pour un rapport E/L inférieur à 0.30. Au début de la réaction d'hydratation ces ajouts remplissent les interstices entre les grains de ciment et ils ont un rôle essentiel c'est que ces ajouts se changent à des ajouts fortement actifs à long terme qui sont contribués par leur pouvoir hydraulique et pouzzolanique, qui donne une structure plus dense.
- L'ouvrabilité des bétons avec des ajouts augmente sensiblement par rapport au béton témoin, par contre le taux de l'air occlus diminue. Cela est dû par les ajouts utilisés qui sont finement broyés donc, ils remplissent les pores et libèrent l'eau emprisonnée.
- La masse volumique, est relativement élevée pour les bétons avec ajouts par rapport au béton de témoin, ce qui explique le rôle de remplissage de ces ajouts. En effet, ces derniers ayant des finesses plus grandes que celles du ciment utilisé,
- Les trois types du ciment utilisé (CPJ-CEMII/A42,5 Ain Touta, CPJ-CEMII/A42,5 M'sila et CPJ-CEMII/A42,5 Chlef), on a trouvé que le ciment CPJ-CEMII/A42,5 M'sila qui a une bonne compatibilité avec le superplastifiant (Meda Flow30) c.-à-d. une rhéologie adéquate.

## **TYPE 2 : LES COMPORTEMENTS PHYSICO- MECANIKES**

- A partir de cette étude, il y a une possibilité de fabriquer des B.H.P en Algérie, avec des simples moyens, et dont la résistance dépasse les 70 MPa à 28 jours avec une plasticité adéquate.
  - Le broyage poussé des ajouts nous a permis d'atteindre un bon comportement physico- mécanique et durabilité.
  - Pour obtenir un niveau de résistance élevée, il faut abaisser le rapport eau/ ciment aux alentours de 0,25 à 0,30, en utilisant un super plastifiant de haute qualité et tous les
-



ingrédients du béton doivent être aussi de très bonne qualité.

- L'obtention d'un béton à haute performance de bonne adhérence nécessite l'utilisation des granulats cubiques ayant une surface rugueuse, avec un diamètre maximal entre 3/8 et 8/15 mm
  - Pour un rapport E/L égal à 0,26 les bétons fabriqués avec un ciment CPJ 42,5 qui renferme à 10 % de calcaire, 15 % de sable de dune et 15% de déchet de polissage de carrelage présentent des propriétés performantes. En effet avec 10 % de calcaire la résistance à la compression à 28 jours du béton mesurée sur éprouvette cubique est supérieure à 70 MPa avec un affaissement de 8 cm. Les autres caractéristiques de béton sont aussi améliorées .En effet la résistance à la flexions s'améliore avec les ajouts de la même façon que la résistance à la compression. En plus, le retrait au séchage des bétons à hautes résistances est plus faible que celui d'un béton ordinaire.
  - Le mode de conservation a une influence particulière sur les propriétés du béton, quand ce dernier n'était pas protégé, il perdait son eau par évaporation et sa résistance était considérablement réduite. Cependant, pour obtenir un béton relativement imperméable, il faudrait une conservation totale à l'eau, c'est à dire le degré d'humidité est 100%
  - A long terme la résistance à la compression des bétons augmente d'une manière presque linéaire jusqu'a l'âge de 02ans, pour l'ensemble des formulations. Ceci veut dire qu'entre 28jours et 2 ans le processus d'hydratation a continué, ce qui explique que les ajouts faiblement actifs se changera à des ajouts fortement actifs.
  - Le module d'élasticité du béton durci est en fonction de sa résistance mécanique. Cependant, les facteurs agissant sur le module d'élasticité, sont les mêmes que ceux agissant sur la résistance.
  - L'effet des ajouts minéraux sur l'évolution du module élasticité est significatif. Par conséquent, on remarque que le béton renfermant un ajout, présente toujours un module supérieur à celui du béton témoin, ce qui est lié à leur grande compacité.
  - Le superplastifiant a joué, lui aussi, son rôle de densification du squelette béton, ce qui
-

explique l'augmentation sensible du module d'élasticité du béton avec super plastifiant par rapport à celui du béton témoin (BT/0.5).

- Le module d'élasticité continu toujours à augmenter, même à des âges avancés, ce qui confirme la contribution des ajouts minéraux à la densification du béton avec l'âge, ce rôle en plus de son importance par rapport à la résistance, il aura aussi un effet estimable sur la durabilité.
- Le plus grand module d'élasticité c'est celui obtenue avec le BC=45MPa, suivi au BSD et au BDPC nous avons enregistré respectivement les valeurs suivantes 42 MPa, et 41MPa et dernièrement le BO avait un module élasticité de 35MPa. Mais il n'y a pas une grande différence significative entre le module d'élasticité des bétons ajouts et celui d'un béton ordinaire.
- Les déformations élasto- instantanées longitudinales du béton avec ajouts est plus grande que celle obtenu au béton ordinaire tandis que la déformation élasto-instantanées transversales du béton contrairement aux déformations élasto-instantanées

### **TYPE 3 : LA DURABILITÉ**

- L'incorporation des ajouts finement broyés a favorisé l'accroissement de la compacité des bétons, phénomène visualisé par l'augmentation de la masse volumique, conséquence de la densification de la matrice. En favorisant la formation d'un squelette plus compact, ce qui a entraîné en conséquence, une amélioration relative de la résistance mécanique malgré les actions préjudiciables
  - La relation est claire et nette entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression. La perméabilité à l'eau diminue rapidement avec l'augmentation de la résistance, cependant pour des résistances très élevées, la perméabilité évoluera très peu et atteint un niveau très faible.
  - La perte de masse et le retrait des bétons avec ajouts cimentaires aux différentes échéances sont plus faibles que ceux mesurés sur le béton de référence (témoin). Par exemple le retrait des bétons aux ajouts cimentaires se trouve entre 387µm/m, alors que celui du béton de référence est 525 µm/m.
-

- Les granulats calcaires commençaient à se décomposer à 600 C° par une perte de la résistance est attribuée aux endommagements (fissuration interne) causés par:
  - Les déshydrations
  - La pression de vapeur et la destruction des produits d'hydrations surtout au niveau des interfaces granulats/pâte de ciment, et à 900 C° sont déjà très endommagés.
  
- Malgré la longue période de conservation dans des milieux agressifs, les caractéristiques de ces bétons ne sont que légèrement affectées par les dégradations quel que soit le milieu agressif, comparativement au béton témoin, probablement à cause de la compacité très élevée qui est un frein à la pénétration des agents agressifs et aussi un frein à la sortie des cations.
  
- L'analyse aux rayons X effectuée sur des échantillons prélevés des couches superficielles des éprouvettes exposées dans les solutions de (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et l'eau de mer) à l'âge de 9 mois montrent l'apparition des phases cristallines comme le gypse et l'ettringite secondaire qui sont deux produits un peu néfastes.

#### **LES RECOMMANDATIONS :**

A travers cette étude sont proposées ces recommandations suivantes :

- Pour l'élaboration d'un béton à hautes performances sans difficultés il est préférable d'utiliser un ciment sans ajouts tel que un CPA 52,5 (Actuellement ce type de ciment est introuvable en Algérie).
  
  - Les ciments riches en silice et qui contient un taux d'aluminate tricalcique faible sont les meilleurs.
  
  - Pour transporter des BHP dans la centrale a béton aux chantiers, l'utilisation d'un retardateur devient indispensable
  
  - Ces nouveaux bétons ont besoin d'un contrôle rigoureux et continu, parce qu'une variation d'un paramètre peut modifier les caractéristiques de ce béton
  
  - Pour le BHP, il n'y a plus lieu d'utiliser le surfaçage traditionnel, comme le mortier de soufre, de préférence on utilise la boîte à sable qui reste un moyen très efficace
-

pour résoudre le problème de la planéité.

### **LES PERSPECTIVES :**

Cette étude reste toujours insuffisante a cause des nombres de propriétés des BHP mal connues. En perspective nous proposons les axes de recherches suivantes :

- L'élaboration d'un béton à très hautes performances. (Résistance à la compression supérieure à 100 MPa) par l'utilisation des matériaux locaux de très bonne qualité ;
  - L'élaboration d'un béton à hautes performances sur chantier : essais de fabrication in situ et mise au point de procédures et formulations adaptées ;
  - Etudier la ductilité et le fluage des bétons à hautes performances ;
  - L'effet du pourcentage d'armature sur la ductilité des bétons à hautes performances ;
  - L'étude des bétons à hautes performances fibrés ;
  - étudier l'évolution de la chaleur d'hydratation et en fonction des résultats obtenus, recommander la destination de chacun des bétons.
  - Faire une identification microstructurale (interne et en surface) des bétons par une analyse cristallographique.
  - étudier l'effet des ajouts cimentaires sur la fixation de la portlandite (la chaux) par les analyses thermiques différentielle et gravimétrique.
  - mesurer la perméabilité des bétons aux ions chlore.
  - faire une étude technico-économique pour situer l'intérêt de l'utilisation des ajouts cimentaires locaux par rapport à la fumée de silice importée.
  - Dégager des voies d'application de ce nouveau matériau dans notre pays.
-

---

---

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

---

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Chaid R., Jauberthie R. et Boukhaled A.** « Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons » *Lebanese Science Journal*, Vol. 11, No. 1, 2010.
- [2] **Baroghel-B.V** « Les spécificités des bétons à hautes performances -Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles » LCPC ,2004 .
- [3] **Aïtcin P.C.** « Les béton à haute performance » Journée d'information : ciments, bétons, adjuvants,Algers 2004.
- [4] **Aïtcin P.C.** «Bétons haute performance» Edition, Eyrolles, Paris, 2001.
- [5] **Schutter G.** « Le béton à hautes performances » Bulletin FEBELCEM, Fédération de l'industrie cimenterie, P15, Belge 2007.
- [6] **Adam M et Neville** « Propriétés des bétons ». Edition Eyrolles, Paris, 2000.
- [7] **Grandet.J.P** « Durabilité du béton à haute performance, vis-à-vis des attaques chimiques externes » Les bétons à haute performance du matériau à l'ouvrage. pp.223-229, Presse de l'ENPC. Paris 1990.
- [8] **Chaid R.** « Formulation, Caractérisation et Durabilité des BHP au ajouts cimentaires locaux » Thèse doctorat ENP, PP 154, Alger 2006.
- [9] **Chaid R., Jauberthie R., Bali A. et Abadlia M.T.**, «Formulation des bétons de hautes performances avec des ajouts cimentaires locaux», Revue : Algérie Equipement, École Nationale des Travaux Publics, N°38, ISSN 111-5211, pp. 3-7, janvier 2004.
- [10] **Alaejos Gutierrez P. et Fernandez Canovas M.**, « The modulus of elasticity of high performance concrete », *Materials and structures*, vol. 28, N° 184, p. 559-568, 1995.
- [11] **Dutruel F.**, « Les BHP et les BTHP, de quoi s'agit-il ?», Journée nationale d'échange d'informations sur les bétons à très hautes performances, organisée par le CERIB, ,pp.8, 21 juin 1995.
- [12] **Metha P.K. and Aïtcin P-C.**, « Microstructure basic of selection of materials and mix proportions for high strength concrete », In : Second International Symposium on high strength concrete, , p.278-308, Detroit : ACI 1990.
- [13] **Addis B-J. and Alexandre M-G.**, « A method of proportioning trial mixes for high strength concrete », In : Second International Symposium on high strength concrete, , p.310-321, Detroit : ACI 1990 .

[14] **Alaejos Gutierrez P. and Fernandez Canovas M.**, « High performance concrete : requirement for constitutive materials and mix proportioning », ACI Material journal, title n°93-M26, p. 233-241, May-June 1996.

[15] **Dakhmouche Fatima-Zohra** « Carbonatation de bétons adjuvantes a base de ressources locales Algériennes »Thèse Doctorat, Université d'Orléans et de l'Université Mentouri de Constantine, P240, 2009.

[16] **Uchikawa H.**, « Function of organic admixture supporting high performance concrete », In : International Symposium on the role of admixture in high performance concrete, Edited by J-G. Cabrera and R. Rivera-Villareal, Rilem : Monterrey, Mexico, p. 69-96. March 21-26 1999.

[17] **Jolicoeur C., Nkinamubanzi P-C., Simard M-A et al.** « Pozzolans and pozzolanic cements », In : The chemistry of cement and concrete, par F-M. Lea, Great Britain : p.414-453, Edward Arnold, 1970.

[18] **Aitcin P.C.** « High-performance concretet » Edition et FN Spon, London, 591p, 1998.

[19] **De larrard F.** «Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances». Thèse de doctorat de l'ENPC, Rapport de recherche des LPC N°149, France, Mai 1988.

[20] **De Larrard F.:** « Prévion des résistances en compression des bétons à hautes performances aux fumées de silice ou une nouvelle jeunesse pour la loi de Feret ». I.T.B.T.P. N°. 483,1990.

[21] **Guettala S., Mezghiche B. et Chebili R.**, «Interest and effectiveness of the addition of the sand of dune finely crushed to cement, on the properties of the concrete». Sun Light Publishing Canada, World Journal of Engineering 4 (1) 45-53, 2007.

[22] **Damene Z et Azzouz L et Goual MS** « Durabilité de mortiers a base de ciments algériens vis-à-vis du sulfate de magnésium (MgSo4) et effet de sable de dune sur le taux de chute de résistance » Colloque CMEDIMAT 2005, 06 et 07 Décembre 2005. Oran.

[23] **M.Cheikh-Zouaoui, S. Aggoun, N. Chikh, R. DuvaP** « Effects of Calcium Nitrate and Triisopropanolamine on thé Setting and Strength Evolution of Portland Cément Pastes » RILEM2006, Materials and Structures(2008) 41: 31-36 / Accepted 28 Nov.2006/ Published online 23Jan,2007

[24] **Benkaddour, M.; Kazi Aoual, F. et Semcha, A.** « Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et artificielle » Revue Nature et Technologie, n°1 pp 63-73, Juin 2009.

[25] **Turanli, L.; Uzal, B. and Bektas, F.** « Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans » Cement and Concrete Research, (2004), Vol. 34, no12, pp. 2277-2282. 2004.

[26] **Feldman R F, Huang G** « Propries of pertland cement silica fume pastes :porosity and surface propriets » Cement and Concrete Research N°15,pp765-774,1985.

- [27] **Regourd M.**, « La microstructure, dans les bétons à très hautes performances – caractérisation, durabilité, applications », édité par Y. Malier, Presses de l'école nationale des ponts chaussées, 2-85978-187-0, p. 25-44, 1992.
- [28] **Pedeches J-M.**, « Béton à hautes et très hautes performances : propriétés mécaniques et retrait. Aide à la formulation », Annales I.T.B.T.P, n° 525, série bétons 311, p. 1-41, 1994.
- [29] **Sarkar S-L. and XU A.**, « Why use mineral admixture in high performance concrete », In : L'Industria Italiana del cemento, October 1996, p. 715-726.
- [30] **Pera J., Rols S., Chabannet and Ambroise J.**, « Influence of cement the type on the resistance on concrete to an agricultural environment » In : Sidney Diamond Symposium on Materials science concrete, Edited by Menashi Cohen, Sidney Mindess and Jan Skalny, 1998, p. 419-431.
- [31] **Dron R. et Voinovitch I-A.**, « Activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes », Le béton hydraulique, l'ENPC, Paris, 1982, p. 237-246.
- [32] **DUVAL R., KADR E.H I**, « Influence of silica fume on thé workability and thé compressée strength of high-performance concrètes », Cernent and Concrète Research, Vol. 28n°4, April 1998, pp 533-547.
- [33] **Cheng Y, Feldman R.F.**, «Influence of Silica Fume on the Microstructural Development in Cement Mortars». Cement and Concrete Research, 15, 285, 1985.
- [34] **De Larrard F.**, « Préviation des résistances en compression des bétons à hautes performances aux fumées de silice ou une nouvelle jeunesse pour la loi de Féret », Annales I.T.B.T.P, n° 483, mai-1990.
- [35] **Mohammad R, Suliman, M. A.** « Utilization of Silica in Early-High Strength Concrète » Cernent and Concrète Technology in thé 2000 s, Second International Symposium, 6-10 Sept. 2000 Istanbul, Turkey.
- [36] **Boubakir L.** « Elaboration et étude d'un béton à hautes performances » Mémoire de Magister 1999 ENP d'Alger.
- [37] **Hashin** « The moduli of hetergeneous materials »Journal of Appleid Mechanics, 1962
- [38] **De Larrard F., Boulay C.** « Comportement post- rupture du béton à hautes ou très hautes performances soumis en compression ». Bulletin. Liaison, L.P.C, 179,1992.
- [39] **Xie J., Elwi A.E.** « Mechanical properties of three high- strength concrete ,containing silica fume ». ACI materials journals, N° 92, 1995.
- [40] **Malier.Y.**, « Les bétons à hautes performances » Caractérisation, Durabilité, Applications ; Presses Ponts et chaussées, 1992
- [41] **Chan W.J., Wu C.M.L.** « Durability of concrete with high cement replacement » In: Cement and Concrete Research 30 pp: 865-879; 2000.



- [42] **Lévry C** « A propos de la carbonatation accélérée des bétons : comparaison béton ordinaire et béton à haute performance du pont de Joigny », Edition ENPC 1990.
- [43] **Djaknoun S. et Benyahia A.**, «Caractérisation des bétons à hautes performances». Journée d'étude sur l'utilisation de la chaux dans les techniques routières, p46-49, 2005.
- [44] **Phan** « Fire performance of high-strength concrete :a report of the state of the art » NISTIR 5034 ,Maryland,USA,1997
- [45] **Jansen D.C. ,Wang K , et Shan S.P** « Permeability study of cracked concret » Cement and Concrete Research,Vol. 27, N°3, PP381-393,1997.
- [46] **Roncero J. et al.** « Study of the influence of superplasticizers on the hydration of cement paste using nuclear magnetic resonance and X-ray diffraction techniques» In: Cement and Concrete Research 32 pp: 103-108; 2002.
- [47] **Dakhmouche F Z** « Etude de l'effet des superplastifiants sur les propriétés des bétons frais et durcis et leur interaction avec les ciment actuels algériens » Mémoire de Magister Constantine 2000.
- [48] **Perration D., Laplante P., Aitcin P.C.** « Selection of the Superplasticizer Cement Combination for Minimizing Slump Losses When Making Very High Strength Concrete ». Réunion annuelle de l'ACI, Atlanta, 25 p. 1989.
- [49] **Houst L., Flatt R. Bowen J-P. et al.**, « New superplasticizers : from research to application » In : Proceedings of International Conference on modern concrete materials : Binders, Additions and admixtures, Edited by Ravindra K., Dhir and Tomas D. Dyer, Dundee, Scotland, UK 1999, p. 446-456.
- [50] **Alshamsi A.M., Sabouni A.R. et Bushlaibi A.H.**, « Influence of Set-Retarding Superplasticisers and Microsilica on Setting Times of Pastes at Various Temperatures » Cement and Concrete Research, Vol.23, pp.592-598; 1993.
- [51] **Aitcin P.C, Baron J.** « Les adjuvants normalisés pour bétons, in: Les bétons. Bases et données pour leur formulation », Editions .Eyrolles, 1997.
- [52] **Pailhere A. M., Serrano J.J et Grimaldi G.** « Influence du dosage et du mode d'introduction des super plastifiants sur le maintien de la maniabilité optimale des bétons à hautes performances avec et sans fumée de silice ». Bulletin. Liaison. P. et ch. 170. 1990.
- [53] **Older I., Wonneman R.**, « Hydration of C<sub>3</sub>A in Portland Cement in the Presence of different Forms of Calcium Sulfate » Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, vol. IV, pp. 510-513,1990.
- [54] **De Larrard D.** « La nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances ». Bulletin des LPC, 202 ,1996.
- [55] **Djezzar M., Ezziane K., Kadri A.** « Evaluation pratique de la compatibilité ciment - super plastifiant dans les BHP ». Proceedings du 1<sup>er</sup> Colloque Maghrebin en Génie Civil, pp 263-272, 1998.

- [56] **Baron J, Lesage R** « Compacité et maniabilité des bétons hydrauliques » rapport de recherche LCPC N°3 ,1969.
- [57] **Moranville M., Regourd** « Microstructure des bétons à hautes performances ». Les B.H.P. Edition E.N.P.O 1990.
- [58] **Dreux G. et Festa J.**, « Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8<sup>ème</sup> édition, Eyrolles, Paris, 1998.
- [59] **Ghernoiti M.Y. Abadlia M.T. et Chaid M.** « Effets des ajouts cimentaires ultrafins sur la durabilité et les propriétés physico mécaniques des bétons » Séminaire National de Génie Civil, ENSET Oran, PP 31-38, 2003.
- [60] **Aitcin P C** « Les bétons à haute performance », Journée d'information : Nouveaux matériaux, Granitex, Alger 2006.
- [61] **Mezghiche B.** « Résistance et déformabilité des béton basiques » actes du premier Séminaire National en Génie Civil, p86-93, Décembre 1996.
- [62] **Rossi G, Domone P-L. and Soutsos M-N.**, « Proprieties of high strength concrete mixes containing PFA and ggbs », Magazine of concrete research, vol. 47, n° 173, p. 355-367, 1995.
- [63] **Chaid, R., Taha A. Abadlia, M-T et Jauberthie, R** « fluage, retrait et microstructure des BHP de pouzzolane naturelle de Ban-Saf » Revue N47 Algérie équipement ,pp 28-32 ,Mai 2010.
- [64] **Baroghel V.,Rougeau P. et Gawsewitch J.** « Etude de la durabilité des bétons B30 et B80 des ouvrages jumeaux de bourges Microstructure,propriétés de durabilité et retrait » Bulletin des LCPC N° 217,PP61-73 .Paris ,1998.
- [65] **Aitcin.P.C.** « L'emploi des fluidifiants dans les bétons à haute performance » pp.31-50, Presse de l'ENPC. Paris 1990.
- [66] **Chaid, R., Bali, A. Abadlia, M-T et Jauberthie, R** « Influence des cycles immersion-séchage sur la durabilité des BHP de fines calcaires » Revue N42 Algérie équipement, pp 5-10, décembre 2006.
- [67] **Rabah Ch., M., Tahar A, Bali A** «Durabilité des BHP De fines calcaires soumis aux cycles eau / air » Colloque CMEDIMAT 2005, 06 et 07 décembre2005. Oran.
- [68] **Ollivier J.P.**, « Etude de la liaison entre la pâte de ciment et les granulats par observation directe au microscope électronique par transmission » Thèse Doctorat. Ing. ; Toulouse III, 99p, 1975.
- [69] **Melbouci bachir** « Caractérisation de l'angle de frottement interne des matériaux granulaires » Revue N42 Algérie équipement, pp 10-15, décembre 2006.
- [70] **Alarcon L,Ruiz.** « Analyse de l'évolution des propriétés micro structurales des bétons lors d'une élévation de la température » Ph.D. thèse, ENPC, 2003.

[71] **Mahi A, Houaria A et Belhadj M** « Influence de la température sur la perméabilité des bétons » Colloque CMEDIMAT, Décembre. Oran, 2005.

[72] **Kodur V.K.R.**, «Spalling in high strength concrete exposed to fire-concerns, causes, critical parameters and cures». Actes du conger de l'ASCE sur les structures, philadelphie (PA), 2000.

[73] **Arroudj K, Oudjit M.N.** « Influence du sable de dune finement broyé sur les propriétés des bétons » Séminaire National de Génie Civil, ENSET Oran, PP 184-192, 2003.

[74] **Merida A.,Talah A. Kharchi F et Chaid R.** « Durabilité des bétons de pouzzolane » CMEDIMAT ,Décembre Oran,2005.

---

---

## **RÉSUMÉ :**

Les bétons à hautes performances sont des nouveaux types qui répondent, aux exigences des constructions et ouvrages modernes. Ils permettent aux concepteurs de construire des structures plus élancées et plus durables.

Cette recherche concerne la formulation et la caractérisation d'un béton à haute performance (BHP) à partir des ressources disponibles localement et pouvant répondre aux mêmes propriétés que celles des fumées de silice ou des cendres volantes.

Trois ajouts minéraux : le calcaire, le sable de dune et le déchet de polissage de carrelage sont incorporés dans le ciment avec différentes teneurs, car ce sont des ajouts très abondants et sont relativement peu coûteux, dans la perspective de réduire le prix de revient du béton et contribuer à la préservation de la ressource naturelle.

Les résultats expérimentaux montrent que :

- La possibilité de fabriquer des B.H.P dont la résistance à la compression qui dépasse les 70 MPa (à 28 jours), avec une plasticité adéquate.
- Un béton avec (10%) de calcaire ou (15%) de sable de dune ou (15%) de déchet de polissage de carrelage présente des propriétés mécaniques, élastiques et une durabilité plus performante que celle du béton témoin.

### **MOTS CLÉS:**

Béton à haute performance - Formulation- Les ajouts- Superplastifiant- Compatibilité- Rhéologiques- Mécaniques – Durabilité.

---

---

---

---

## SUMMARY:

The concretes with high performances are new types of concrete which answer, *to* the requirements of constructions and modern works. They make it possible to the originators to build slimmer and more durable structures.

This research concerns the formulation and the characterization of a concrete with high performances (HPC) which have the same properties as those of the fume of silica or the fly-ashes.

Three mineral additions: limestone, the sand of dune and the tile's polishing waste are incorporated in cements with various contents because these are additions very abundant, and are relatively inexpensive in order to reduce the cost price of the concrete and to contribute to the safeguarding of the natural resource

The experimental results show that:

- The possibility to produce a to manufacture HPC which a compressive strength which exceeds the 70 MPa (at 28 days), with an adequate plasticity.

- A concrete with (10%) of limestone or (15%) of sand of dune or (15%) of tile's polishing waste has mechanical properties, elastic and a durability more powerful than the witness concrete.

### **Key words:**

High Performance Concrete - Formulation - additions- Superplasticizer- Compatibility  
- Rheological – Mechanical – Durability.

---

---

---

---

## ملخص

الخرسانة عالية الجودة تعتبر من الأنواع الحديثة الظهور التي يتم استعمالها في المشاءات الكبرى كما تسمح للمصممين بتصميم هياكل إنشائية أكثر نحافة وديمومة أكبر .  
هذا البحث يخص دراسة ووصف خرسانة تحتوي على مواد أولية محلية تستجيب لنفس الخصائص التي يوفرها دخان السيليس أو الرماد المتطاير.

ثلاث إضافات معدنية : الكلس ، والكتبان الرملية و بقايا تلميع البلاط أضيفت للاسمنت مع تركيزات مختلفة والغرض من استعمالها كونها متوفرة بكثرة وبتكلفة رمزية.

النتائج الاختبارية أظهرت :

- إمكانية تشكيل خرسانة عالية الجودة مع مقاومة للضغط تزيد على 70 ميجا باسكال عند (28 يوما) مع لدونه كافية.

- الخرسانة التي تحتوي على 10% من الكلس أو 15% الكتبان الرملية أو 15% بقايا تلميع البلاط أعطت نتائج أكثر مقاومة ميكانيكية وديمومة مقارنة بالخرسانة الشاهدة على المدى القصير والطويل.

## المفاتيح

الخرسانة عالية الجودة- تركيبة - إضافات - المحاسينات- التوافق - الميكانيكية - الديمومة.

---

---