

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département de Génie civil et d'Hydraulique  
Réf : .....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة المدنية والري  
المرجع : .....

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

## **Magister en : Génie Civil**

**Option : Modélisation des Matériaux et des structures**

**Thème**

**Effets des additions minérales et adjuvants fluidifiants sur le comportement rhéologique des mortiers et bétons frais et durcis à base de sables des carrières**

Présenté par :

**BARKAT Mohamed**

Soutenu publiquement le : 09/12/2012

**Devant le jury composé de :**

Pr. MELLAS Mekki	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. MEZGHICHE Bouzidi	Maître de Conférences	Rapporteur	Université de Biskra
Pr. CHEBILI Rachid	Professeur	Examineur	Université de Biskra
Dr. ZATAR Abdallah	Maître de Conférences	Examineur	Université de Biskra

## Chapitre 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

### 1.1. Introduction

Le béton est un matériau de construction composite moderne, simple d'emploi et extrêmement répandu. Il se compose d'une matrice cimentaire (pâte de ciment hydraté) qui amalgame les inclusions rigides (graviers et sable). Un béton contient environ (en volume) :

eau : entre 14 et 22 % ; ciment : entre 7 et 14 % ; granulats (dont sable) : entre 60 et 78 %.

Pour différents bétons ayant un même dosage en ciment mais avec un rapport eau/ciment différent, on remarque que ses propriétés s'en retrouvent affectées. En effet, selon la combinaison des trois composants majeurs du béton, le matériau obtenu aura différentes propriétés (rhéologie, propriétés mécaniques, perméabilité...). L'ajout d'additions et d'adjuvants (cendres volantes, fumées de silice, superplastifiants...) permet de modifier les propriétés souhaitées

Le sable est l'élément inerte essentiel entrant dans la composition du béton. Son utilisation permet d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton. Les sables utilisés dans le béton, sont soit du sable naturel de rivière ou fabriqué issu des pierres concassées. En général, des études ont révélé que les sables concassés présentent des taux très élevés de fillers sous forme de limon, argile, ou poussière de calcaire. Il est évident que ces matériaux, s'ils existent en quantités excessives, peuvent avoir des effets défavorables sur les propriétés du béton frais et durci. À l'état frais, à cause de leur importante surface spécifique, ces matériaux demandent beaucoup d'eau pour produire un béton avec la consistance désirée. Cette demande élevée en eau aura un impact direct sur la résistance et le retrait de dessiccation du béton à l'état durci. En outre, la couche d'argile sur la surface d'agrégat va gêner l'adhérence entre la pâte du ciment et l'agrégat, ce qui dégrade la résistance et la durabilité du béton.

La demande sans cesse croissante sur les granulats a provoqué un épuisement rapide des sablières et une exploitation anarchique des sables de mer causant ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages en ayant des répercussions directes sur les ressources naturelles, l'érosion des berges d'oued et l'avancée de mer. Les carrières génèrent des millions de tonnes de sable comme un sous-produit. Ce sable est rarement utilisé dans la confection des mortiers et bétons en raison de leurs taux élevés en fines qui varie de 8 à 30 % et provoquant ainsi un problème de stockage au niveau des carrières. Plusieurs pays dans le monde tels que la France, l'Espagne, l'Angleterre, l'Argentine et le Maroc ont le même problème dans certaines régions, et par conséquent des programmes de recherches ont été menés pour les

utilisations des sables de carrières dans la confection des mortiers et bétons. Ces études ont conduit ces pays à réviser leurs normes en particulier le taux de fines admissibles.

Dans ce chapitre, on tentera de faire une synthèse bibliographique sur les constituants du béton hydraulique, en particulier le sable de concassage, en présentant certains résultats de recherches, en Algérie et à l'étranger, relatifs à la valorisation de ce sable comme substitution au sable alluvionnaire dans la fabrication du béton.

## 1.2. LES BETONS

### 1.2..1. Pâte de ciment

D'après la norme NF P 15-301 de 1994, « le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau ».

La pâte de ciment, est donc le « liant » entre les différents constituants du matériau béton, son étude est donc importante pour comprendre certaines propriétés du matériau final. Elle est constituée d'anhydres, d'hydrates (produits de l'hydratation du ciment entre le ciment et l'eau) et de pores (partiellement saturés en eau). Donc le ciment est un liant minéral obtenu par décarbonation d'un calcaire et décomposition d'une argile à une température avoisinant les 1450 °C. Le clinker, issu de ce procédé, peut avoir des compositions variables mais les oxydes principaux sont toujours les mêmes : la chaux (CaO), la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et la ferrite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Le clinker est un matériau de base auquel on peut trouver nombre d'ajouts pour la préparation des ciments, qui sont disponibles sur le marché. On peut ainsi ajouter, des cendres volantes, des laitiers de hauts fourneaux, ou encore des fumées de silice. On modifie ainsi la composition du ciment et par voie de conséquence ses propriétés. Le clinker, broyé sous forme d'une poudre fine souvent d'une couleur grise, en contact avec l'eau li s'hydrate et forme des minéraux hydratés très stables. Les principaux composés du ciment portland sont :

Les silicates tricalciques (alite) : 3CaO.SiO <sub>2</sub>	[C <sub>3</sub> S]
Les silicates bicalciques (bélite) : 2CaO.SiO <sub>2</sub>	[C <sub>2</sub> S]
Les aluminates tricalciques : 3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	[C <sub>3</sub> A]
Les aluminoferrites tétracalciques : 4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	[C <sub>4</sub> AF]
Autres : (sulfates, alcalins, impuretés,...)	

Les silicates de calcium C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S à peu près 75 % de la masse du ciment. Les caractéristiques granulaires du ciment sont exprimées par sa granulométrie et sa finesse de mouture. Cette finesse de mouture appelée aussi surface spécifique de Blaine peut atteindre 4000 cm<sup>2</sup>/g et plus pour les ciment à forte résistance au jeune âge. [1,15, 3]

### 1.2.2. L'hydratation du ciment Portland

Un ciment est constitué de phases anhydres qui vont s'hydrater en présence d'eau. C'est l'ensemble de ces réactions que l'on définit comme l'hydratation du ciment. Le clinker, constitutif de l'essentiel de ce que l'on nomme un ciment Portland, peut être pris en exemple pour décrire le processus d'hydratation. Dans le cas de ciments dits « mélangés », les réactions sont identiques, seules vont changer les proportions ou certaines stœchiométries des hydrates formés.

Au contact de l'eau, les phases anhydres du clinker, notamment les silicates tricalciques ( $C_3S$ ) et bicalciques ( $C_2S$ ), se dispersent en solution aqueuse pour donner différents ions tels que  $Ca^{2+}$ ,  $OH^-$ ,  $SiO_4H_2^{2+}$ ,  $SiO_4H_3^-$ ,  $SiO_7H_4^{2+}$ . Une fois que leur seuil de solubilité est atteint, ces anhydres se combinent en molécules hydratées par précipitation puis nucléation. Ce sont des réactions exothermiques car elles mettent en jeu beaucoup d'énergie. La pâte fraîche obtenue se présente comme un système dispersé de grains de silicates [6, 7]. Les équations (1) et (2) représentent les réactions chimiques produites durant l'hydratation et donnant les composés hydratés du matériau, selon [8] :



Les hydrates principalement formés du ciment Portland sont les silicates de calcium hydratés de la forme  $C_3S_2H_3$ , notés « C-S-H » ou appelé gel de C-S-H dû à son faible degré de cristallisation. Ces C-S-H sont à l'origine du pouvoir adhérent de la pâte de ciment et améliorent sa résistance. En effet, Les C-S-H présentent une grande surface spécifique et une porosité d'environ 28 % [9],[7].

Les surfaces des C-S-H sont de plus très attractives. Elles adhèrent entre elles et avec les autres éléments constitutifs du béton (sable, granulats, portlandite...), ce qui explique le rôle de « colle » du ciment. En plus de ce gel, la pâte de ciment contient des cristaux grossiers comme la Portlandite  $Ca(OH)_2$  symbolisée « CH » ayant peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique et diminuant la durabilité du béton par sa solubilité dans l'eau. On cherche donc à limiter cette Portlandite (en ajoutant par exemple de la fumée de silice).

On trouve également les aluminates (ou sulfo-aluminates de calcium hydratés) qui cristallise en plaquettes hexagonales empilées entre les grains de ciment hydratés. La séquence de formation des sulfo-aluminates comprend l'apparition du trisulfo-aluminate de calcium ou étringite.

La proportion de ces hydrates dans la pâte de ciment hydratée est fortement dépendante de la composition du ciment (teneur en  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ).

De plus, la quantité d'eau apportée durant la fabrication du matériau est généralement supérieure à la quantité utile à l'hydratation complète du ciment, pour favoriser la maniabilité à l'état frais. Cependant, avec l'avancée de l'hydratation, le cheminement de l'eau jusqu'aux phases anhydres est gêné par les hydrates déjà formés. Ainsi, même si elle ralentit considérablement, l'hydratation se poursuit dans la microstructure du matériau par diffusion de l'eau. La quantité d'eau est généralement rapportée à la quantité de ciment et cela est noté rapport Eau sur Ciment (E/C). Plus le matériau présente un E/C faible, plus sa matrice cimentaire est dense. De ce fait, le rapport E/C est un paramètre qui influence la microstructure se formant durant l'hydratation [6,5].

### **1.2.3. Propriétés des bétons**

#### **1.2.3.1. Propriétés physiques**

##### **1.2.3.1.1 Ouvrabilité**

C'est l'aptitude d'un béton à une bonne adéquation à la méthode de sa mise en œuvre dans un ouvrage donné compte tenu de ses caractéristiques. Elle est influencée par la granulométrie et la forme des granulats, par le dosage en ciment et en eau, par l'emploi éventuel d'adjuvants. Les essais de mesure de consistance du béton les plus courants sont l'essai d'affaissement au être d'Abrams (norme NF P 18-451) et l'essai d'étalement à la table à secousses ; mais les essais Vébé et indice de serrage ne s'appliquent qu'à des bétons très fermes [10].

##### **1.2.3.1.2. Le retrait**

C'est une diminution dimensionnelle du béton en absence de chargement, dûe à l'élimination d'une partie de l'eau de gâchage et aux réactions d'hydratation des grains de ciment. Le siège du retrait se situe dans la pâte du ciment, selon les circonstances, peuvent se développer dans un béton cinq types de retrait : le retrait plastique, le retrait de séchage, le retrait endogène, le retrait thermique et le retrait de carbonatation.

Ces retraits provoquent des contraintes internes qui se matérialisent par l'apparition de fissures micro et macroscopiques à la surface de béton ou dans l'ensemble de sa masse, ces fissures détériorent l'esthétique et endommagent l'élément, tels l'accélération de la corrosion du béton et des armatures en laissant pénétrer des agents agressifs. On distingue les retraits suivants :

##### **1.2.3.1.2.1. Retrait plastique**

C'est le premier retrait de dessiccation qui se développe à la surface d'un béton encore à l'état plastique, c-à-d l'eau de gâchage n'est pas encore liée aux constituants du ciment, elle n'est retenue que physiquement et mécaniquement donc elle peut s'évaporer comme elle peut être absorbée par un coffrage en bois trop sec ou par des granulats poreux non humidifiés. Il dépend de la vitesse de dessiccation qui dépend à son tour de la température de l'air et du béton, de

l'humidité relative et de la vitesse du vent. Ce retrait est moins important pour le béton par rapport à la pâte de ciment et au mortier, car le squelette de granulats s'oppose aux contraintes. L'amplitude du retrait plastique est 5 à 10 fois plus élevée que celle du retrait observé après prise, et il est irréversible, conduit à des fissures peu profondes limitées à la surface supérieure du béton. Ce type de retrait peut être limité par l'utilisation des coffrages étanches non absorbant ou en fournissant au béton à partir de ses surfaces libres de l'eau, ou en scellant ces surfaces pour empêcher toute évaporation [11, 12].

#### **1.2.3.1.2.2. Retrait endogène**

Endogène parce qu'inhérent aux matériaux avec absence de tout échange d'eau avec l'extérieur. L'évolution de ce retrait est directement liée à la cinétique d'hydratation des grains de ciment. Le retrait endogène peut avoir deux origines :

1. Une origine chimique due à l'hydratation de la pâte de ciment qui s'accompagne d'une diminution de volume absolu, ceci vient du fait que le volume des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes initiaux de l'eau et du ciment, c'est le phénomène de la contraction Le Chatelier [6,12,11].
2. Une origine physique, la porosité très fine créée par l'hydratation du ciment draine de l'eau des capillaires les plus grossiers ce qui assèche, le réseau des pores capillaires. Par suite, même en absence d'un squelette rigide, la dessiccation des capillaires va provoquer un raccourcissement progressif du matériau, appelé retrait hydrique endogène (retrait d'auto-dessiccation ou retrait d'hydratation). Mais si le béton est mûri à l'eau, les gros capillaires drainent à leur tour l'eau de la source extérieure, par conséquent, il n'y a plus de phénomène de dessiccation, il se trouve même que le béton gonfle (Le Chatelier, 1904) [6,12,11].

#### **1.2.3.1.2.3. Retrait de séchage**

C'est un retrait de dessiccation qui se développe à partir de la surface de l'élément de béton durci exposé à l'air ambiant, son intensité dépend de la réserve d'eau disponible dans le matériau après les réactions d'hydratation, et donc directement du rapport E/C et de l'hygrométrie ambiante. Il existe trois principales théories qui expliquent les mécanismes du retrait de dessiccation : la dépression capillaire, la variation de la tension superficielle et la variation de la pression de disjonction [12].

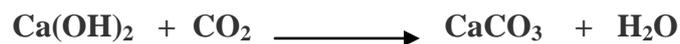
#### **1.2.3.1.2.4. Retrait thermique**

Résulte de la baisse de la température du béton tout juste après sa prise, température occasionnée, soit par la chaleur d'hydratation du ciment qui est une réaction exothermique, soit par la variation thermique du milieu de conservation. Le retrait thermique dépend de plusieurs facteurs comme la composition, la finesse de mouture et la quantité du ciment, la forme et les

dimensions de l'élément, de la température initiale du béton et la température ambiante... etc [11].

#### 1.2.3.1.2.5. Retrait de carbonatation

Est un exemple de couplage entre vieillissement et dessiccation, se développe principalement dans les premiers centimètres du béton, le gaz carbonique de l'atmosphère réagit avec la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$  ( le  $\text{CO}_2$  réagit presque avec tous les composants de l'hydrate sauf sulfate de calcium) pour former un carbonate de calcium, cette réaction libère l'eau :



Le retrait est occasionné par l'évaporation de cette eau libérée. Le retrait de carbonatation se traduit par des fissures peu profondes et principalement limitées aux surfaces exposées du béton [11].

#### 1.2.3.1.3. La compacité et la porosité

Sont des caractéristiques physiques essentielles du béton, conditionnent plusieurs propriétés de ce dernier telle sa perméabilité, ses résistances mécaniques, son module d'élasticité et surtout sa durabilité. On distingue les pores contenus dans les granulats leur taille et leur volume n'évoluent pas, par contre ceux se trouvant dans la pâte de ciment leur dimension diminue avec la progression d'hydratation on distingue [11,1] :

- Les pores capillaires ( $0.01 \mu\text{m} \leq \varnothing \leq 0.5 \mu\text{m}$ ) occupent les espaces entre les grains de ciment en suspension dans l'eau, leur taille et leur volume dépendent du rapport E/C. La perméabilité du matériau est essentiellement dépendante des ces pores.
- Les pores relatifs aux hydrates ou pores des gels ( $\varnothing < 40$  angströms) sont présents dans le gel de C-S-H. Le volume de ces pores n'est pas affecté par le rapport E/C. Ces pores sont divisés en pores inter-cristallites qui se situent entre les gels et les pores intra-cristallites présents à l'intérieur du gel lui-même.
- Les bulles d'air occlus ( $\varnothing > 1 \text{ mm}$ ) piégées non intentionnellement à l'intérieur du béton lors du malaxage du béton frais[1].

#### 1.2.3.1.4. Perméabilité et diffusivité :

La perméabilité est l'aptitude d'un matériau à se laisser pénétrer et traverser par un fluide (eau, air ou un autre gaz ...) sous l'effet d'une pression motrice. Elle est directement liée aux caractéristiques du réseau poreux (forme, dimension, distribution, sinuosité,... etc), la perméabilité des matériaux cimentaires varie avec la progression de l'hydratation [1].

La diffusion est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration, elle ne dépend pas de la taille des pores mais de leur

interconnexion [12], les mécanismes et les lois qui régissent la perméabilité et la diffusivité sont différents mais les moyens d'action les limitants sont les mêmes c-à-d limiter le volume occupé par l'eau et la connectivité du réseau capillaire, car le béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs extérieurs.

### 1.2.3.1.5. DEFORMABILITE

#### 1.2.3.1.5.1. Définition de la rhéologie

La rhéologie représente l'étude de la déformation et de l'écoulement de la matière sous l'effet d'une contrainte appliquée. La déformation et l'écoulement sont en fait les conséquences de mouvements relatifs des particules d'un corps les unes par rapport aux autres. La rhéologie est capable d'intégrer l'étude de l'ensemble des substances, qu'elles soient liquides ou solides. Dans le cadre des matériaux fluides, on s'intéresse plus particulièrement à leur écoulement.

#### 1.2.3.1.5.2. Module d'élasticité

Par définition, ce paramètre traduit l'aptitude à la déformation sous contrainte d'un béton. Il correspond au rapport de la contrainte à la compression  $\sigma_c$  à la déformation longitudinale relative  $\varepsilon$ . Son expression est donnée par la relation suivante :

$$E = \frac{\sigma_c}{\varepsilon}$$

$\varepsilon$  est sans dimension. Son expression est donnée par :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

où  $L$  est la longueur de la base de mesure,  $\Delta L$  le raccourcissement mesuré sur cette base.

Certaines relations expérimentales relient le module élastique du béton à sa résistance à la compression  $f_c$ . Ces relations sont généralement des lois de puissance. Par exemple, celle proposée dans le règlement français du béton armé BAEL est donnée par la relation suivante :

$$E_{ij} = 1100 (f_{c,j})^{1/3}$$

Le module d'élasticité se mesure généralement par un essai d'extensométrie en compression. Selon la norme ISO 6784, après surfaçage soigné et disposition de l'extensomètre dans la zone centrale de l'éprouvette, on applique sous la presse trois cycles de « chargement-déchargement » jusqu'au tiers de la charge de rupture (déterminée auparavant par un essai de compression sur une éprouvette du même mélange). La mesure de la déformation s'effectue lors du troisième chargement. [49]

### 1.2.3.1.5.3. Modèle trispère du module d'élasticité

De Larrard, fait intervenir les propriétés d'élasticité des constituants (module du granulat, module de la pâte de ciment, etc.) et propose dans ses travaux un modèle plus élaboré qui repose sur un calcul d'homogénéisation (modèle trispère) [49].

Le module du béton est déduit de celui des deux phases présentes dans le composite et de la structure granulaire du mélange, décrite par les compacités  $g$  et  $g^*$ . La relation s'écrit :

$$E = \left( 1 + 2g \frac{E_g^2 - E_m^2}{(g^* - g)E_g^2 + 2(2 - g^*)E_g E_m + (g^* + g)E_m^2} \right) E_m$$

où  $E_g$  et  $E_m$  sont respectivement les modules du granulat et de la matrice.  $E_m$  est déduit de la résistance à la compression du composite, selon la relation suivante :

$$E_m = 226 f_c$$

Rappelons que  $g$  est la compacité réelle du squelette granulaire et  $g^*$  sa compacité maximale. Pour calculer  $E$ , il faut connaître au préalable le module  $E_g$  du granulat. Si celui-ci n'est pas mesuré directement sur la roche mère, on peut alors l'estimer avec une bonne précision en réalisant des bétons dont on mesure  $E$  et  $f_c$ . Les relations précédentes permettent alors de trouver  $E_g$ . C'est cette approche qui a été adoptée pour la suite. Elle a permis de comparer  $E_g$  à la résistance des roches mères. Par ailleurs, d'après la relation ci-dessus, on peut vérifier que c'est bien les granulats les plus rigides qui donne les bétons les plus rigides, si tous les paramètres de la formule restent équivalents par ailleurs ( $E_m$ ,  $g$ , et  $g^*$ ).

### 1.2.3.1.5.4. Effet des granulats sur le module d'élasticité

Le module d'élasticité des agrégats constitue un des facteurs déterminant de la résistance du béton. Généralement la résistance du béton augmente avec l'augmentation du module d'élasticité des agrégats. Cette relation peut être expliquée par l'effet de la rigidité des agrégats sur la distribution des contraintes dans le béton sous charges.

A déformation égale la part des charges supportées par les agrégats augmente avec la rigidité (c'est à dire le module d'élasticité); et par conséquent la part supportée par la pâte de ciment diminue.

Pour cette raison, pour formuler un bon béton, il est préférable d'utiliser un gros granulat dont le module d'élasticité est aussi voisin que possible de celui du mortier qui l'enrobe de façon à minimiser les déformations différentielles au niveau de l'interface mortier – gros granulat qui pourraient nuire à l'adhérence du mortier ou de la pâte de ciment hydraté sur le gros granulat.

### 1.2.3.2. Propriétés mécaniques

#### 1.2.3.2.1. Résistance mécanique

La résistance mécanique est l'une des caractéristiques essentielles du béton. Le béton est employé, en général, comme matériau porteur et le taux de travail d'un ouvrage en béton dépend de sa résistance mécanique qui évolue avec le durcissement du béton. La résistance mécanique d'un béton dépend de plusieurs paramètres à savoir :

- la nature et la qualité des constituants (ciment, granulats, eau, adjuvant)
- les conditions de mise en œuvre de ces constituants
- les conditions thermo hygrométriques ambiantes de conservation.

Elle est définie par la résistance à la compression et par la résistance à la traction.

- **Résistance à la compression** : est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton armé. Le béton est caractérisé par la résistance à la compression  $R_{c28}$  mesurée sur des éprouvettes écrasées à 28 jours selon la norme NF EN 12390-3.

- **Résistance à la traction** : Elle est moins étudiée que la résistance à la compression car le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression, et son comportement en traction est quasi fragile. Le comportement en traction du béton peut être identifié par l'essai de flexion sur trois points, désignée par  $F_{t28}$ .

#### 1.2.3.2.2. Durabilité

Elle est généralement utilisée pour caractériser de façon très générale la résistance d'un béton face à l'attaque d'un agent agressif physique ou chimique (Moranville, Regourd, 1982), et aussi aux contraintes mécaniques (fluage). La durabilité du béton dépend des facteurs qu'il n'est pas toujours aisé d'isoler : condition de mise en œuvre, composition des différents constituants (ciment, granulats, eau, adjuvant), âge du béton, conditions climatiques et le milieu dans lequel le béton est exploité.

Les facteurs influençant la durabilité peuvent être internes au béton comme la porosité, perméabilité et diffusivité, la fissuration, les ions chlorure (présent dans certains accélérateurs et eau de gâchage), réactions alcalis granulats, les ions sulfates (oxydations des pyrites contenues dans certains granulats calcaires), ou externes les ambiances hivernales (la répétition des cycles de gel dégel, l'action des sels de déverglace, formation des sels gonflants), les ambiances chimiquement agressives notamment le dioxyde de carbone, les eaux de pluies, de neige, les eaux souterraines, l'eau de mer, les acides ainsi que toutes les solutions résultant de la dissolution de sels ou de gaz [13]. Le béton est caractérisé par une basicité accentuée dû à la nature de la pâte durcie qui est composé de :

- de 15 à 20 % de portlandite : base forte
- environ 70 % de C-S-H : considérés comme des sels d'acide faible (silicique) et de base forte  $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- 10 à 15 % d'aluminates et sulfoaluminates de calcium
- une solution interstitielle, dans les pores et capillaires enrichie en alcalins (NaOH et KOH) dont le pH varie entre 12.5 et 13.5.

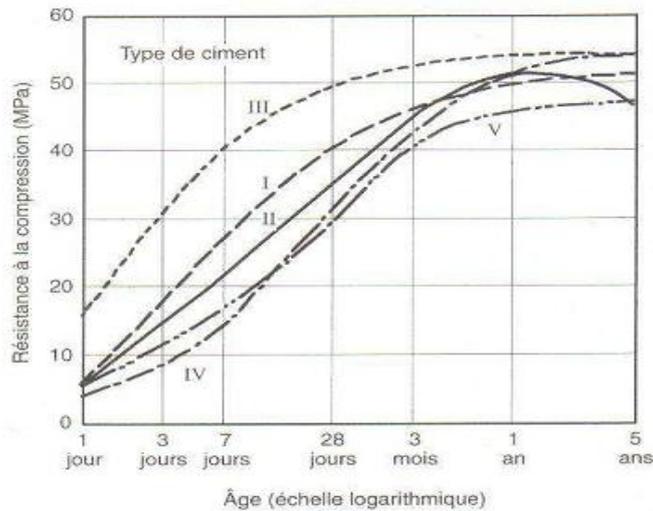
Alors que le pH de l'environnement est en général inférieur à ces valeurs, ce qui donne une réaction entre le milieu extérieur et le béton pour former des sels et de l'eau sous la forme suivante :



Cette réaction peut améliorer la durabilité du béton si le sel formé possède des propriétés liantes, on peut citer l'exemple de la carbonatation superficielle du béton de ciment portland par le  $\text{CO}_2$  de l'air, mais le pH de la solution interstitielle du béton diminue jusqu'à environ une valeur de 9 ce qui entraîne la dépassivation des armatures. Dans le cas où le sel formé est soluble ce qui crée des risques de dégradation par dissolution et lessivage. Par ailleurs les aluminates du ciment (anhydres ou hydratés) réagissent avec les ions sulfates pour former l'étringite secondaire potentiellement expansive ( $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) [14]. Sous certaines conditions le C-S-H peuvent aussi réagir avec les sulfates et conduire à la formation de thaumasites ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSiO}_2 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ) entraînant des phénomènes expansifs et surtout une désagrégation de l'ensemble du liant [14]. Il a été toujours dit qu'un béton mécaniquement résistant n'est pas nécessairement durable.

### 1.2.3.2.3. Développement mécanique du béton

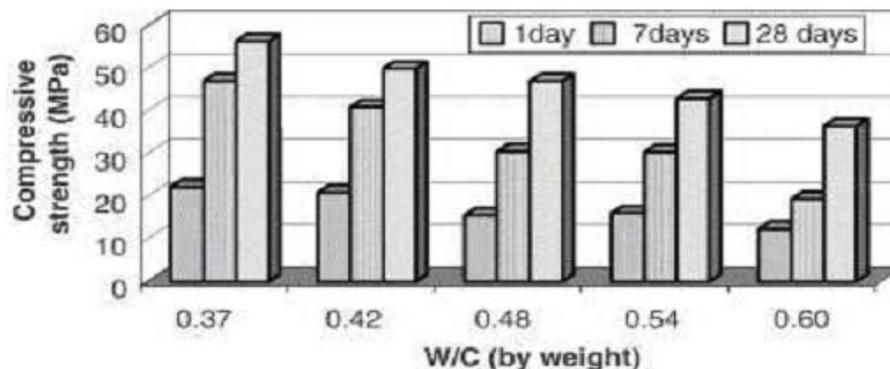
La résistance mécanique du matériau se développe durant l'hydratation : on parle alors de prise du béton. La formation progressive des hydrates permet l'obtention d'une matrice cimentaire résistante mécaniquement. Ces propriétés mécaniques sont mesurées par des essais de résistance en compression simple normalisés à 28 jours. On trouve parfois des mesures à différentes échéances permettant de suivre cinétiquement l'hydratation des matériaux. La **figure 1.1** montre l'évolution dans le temps de la résistance mécanique d'un béton ( $E/C=0,49$ ) confectionné avec différents ciments [48].



**Figure 1.1** : Développement de la résistance mécanique d'un béton ( $E/C=0,49$ ) [48]

Le développement des propriétés mécaniques d'un béton est fonction de sa formulation et en particulier de la nature du ciment. Certains ciments comme les CEM I font l'essentiel de leur hydratation très tôt et développent donc l'essentiel de leurs propriétés mécaniques entre un et quelques mois. En revanche, pour des ciments à hydratation plus lente (comme les ciments mélangés, contenant de fortes proportions de laitiers de hauts fourneaux ou de cendres volantes), ce processus peut se dérouler sur plusieurs années.

Un autre paramètre influant sur la résistance mécanique est le rapport  $E/C$ . Comme mentionné précédemment, l'augmentation du dosage en eau augmente la porosité capillaire et donc abaisse la compacité. Une conséquence macroscopique de ce processus est une chute des résistances mécaniques, comme le montre la **figure 1.2** concernant l'étude d'un béton auto compactant [48 , 15 , 16]



**Figure 1.2** : Influence du rapport  $E/C$  sur la résistance en compression [15]

L'augmentation du rapport  $E/C$  fait donc diminuer la résistance du matériau et ceci quelque soit son âge. Ceci est à relier à la quantité d'eau libre présente au sein du matériau, qui conditionne la porosité et par conséquent la résistance du béton.

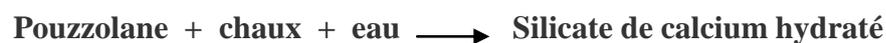
### 1.3. LES AJOUTS MINÉRAUX

#### 1.3.1. Généralités

Les ajouts sont des matériaux minéraux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelques fois également au béton afin d'améliorer les propriétés du mortier ou du béton grâce à une activité hydraulique et / ou pouzzolanique.. Ils sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir un ciment composé ou divers plus économique. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la composition du béton.

On peut fabriquer des bétons en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts minéraux 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 et durabilité. Les ajouts minéraux cimentaires typiques sont les cendres volantes (C.V), le laitier granulé de haut fourneau (L.G.H.F) et les fumées de silice (F.S). L'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques [17].

La plupart des ajouts minéraux ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du  $C_2S$  et du  $C_3S$  avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland (N F P 18-508). On peut écrire donc une réaction pouzzolanique de la façon simple suivante :



Il faut noter qu'à la température de la pièce, cette réaction est généralement lente et peut se développer sur plusieurs semaines. Cependant plus la pouzzolane est fine et vitreuse, plus sa réaction avec la chaux est rapide. L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du  $C_2S$  et du  $C_3S$  (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux contribue à la chute de résistance de la pâte de ciment hydratée. Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau, ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte de ciment. Le seul aspect positif de la présence de chaux dans un béton est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures d'acier.

Quand on fabrique des bétons, si on utilise 20 à 30% de pouzzolane, théoriquement, on pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment portland pour la transformer en

C-S-H. Cependant, les conditions dans lesquelles on utilise le béton sont très différentes de cette situation idéale et la réaction pouzzolanique n'est jamais complète. Ces matériaux étant des sous produits industriels, leurs compositions chimiques sont en général moins bien définies que celle du ciment Portland.

### **1.3.2. Avantages des ajouts minéraux**

#### **1.3.2.1 Avantages techniques**

D'abord, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Ensuite, les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés, les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration.

#### **1.3.2.2. Avantages économiques**

Typiquement, le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plupart des matériaux (ajouts) susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou béton sont des sous-produits, et, à ce titre, demandent relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment Portland. Toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et le coût élevé du transport qui en résulte risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels. De même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés. Bien qu'il soit difficile à prédire, le prix des ajouts cimentaires pourrait se comparer à celui du ciment si la demande en béton ne diminuait pas, dans ce monde que menace le (CO<sub>2</sub>). Et c'est bien le gaz carbonique (dioxyde de carbone) qui pourrait finalement décider de la valeur de ces denrées.

#### **1.3.2.3. Avantages écologiques**

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). De fait, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de (CO<sub>2</sub>). En général l'utilisation de cendres volantes (C.V) et de fumées de silice (F.S) comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie. Le laitier, par contre, doit être granulé et sa granulation provoque l'émission d'environ 0,07 tonne de (CO<sub>2</sub>) par tonne de laitier granulé de haut fourneau (L.G.H.F) produit. A cela, il faut ajouter les émissions de CO<sub>2</sub> causées par le transport des matériaux (ajouts) jusqu'au

chantier de construction. Les études montrent que le transport (par camion et chemin de fer) d'une tonne d'ajouts cimentaires sur une distance de 1000 Km libère environ 0,022 tonne de ( $\text{CO}_2$ ).

### 1.3.3. Classification des ajouts minéraux

Selon la norme ENV 2006, les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes.

#### 1.3.3.1. Principaux ajouts minéraux inertes

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à  $60\mu\text{m}$  ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305). En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats. Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau,...). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière.

##### 1.3.3.1.1. Fillers calcaires

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, ...). Les fillers se différencient les uns des autres par :

- leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine. Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles:

- ✓ Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- ✓ Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- ✓ Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du  $\text{C}_3\text{S}$  et du  $\text{C}_3\text{A}$  et à la formation de carboaluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- ✓ Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.

### 1.3.3.1.2. La poussière

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

### 1.3.3.2. Les ajouts minéraux actifs

Parmi ces ajouts on distingue la pouzzolane, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Nous nous intéresserons ici que par la pouzzolane puisqu'elle est l'ajout utilisée dans nos essais.

#### - La pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [18].

Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

#### A) pouzzolane naturelle

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.

#### B) Pouzzolane artificielle

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite et moler. Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories [18] :

- Les constituants actifs: phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées.
- Les constituants inertes: phase cristallisée autre que les zéolites.
- Les constituants nocifs: substances organiques et argiles gonflantes.

#### 1.3.3.2.1. Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées (cas des squelettes siliceux de micro-organismes). Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux [19] et [20].

Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactives. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux. L'activité pouzzolanique s'explique par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux (portlandite). Des tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation ne suffisent pas pour déterminer la réactivité pouzzolanique. D'autre part, la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure [18].

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

- ajouts de produits chimiques.
- broyage à une finesse plus élevée.
- traitement thermique.

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

#### **1.3.3.2.2. Propriétés hydrauliques des pouzzolanes**

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme [19] [20].

#### **1.3.3.2.3. Propriétés physiques de remplissage des pouzzolanes**

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité [19] [20].

### **1.4. LES ADJUVANTS**

#### **1.4.1. Définition**

L'adjuvant est un produit incorporé au moment du malaxage du béton à un dosage inférieur ou égal à 5 % de la masse de ciment du béton, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et / ou à l'état durci [AFNOR NF EN 934-2/A2, 2006]. Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule, mais peut présenter une ou plusieurs fonctions secondaires. Plusieurs catégories sont définies par la norme. Il existe plusieurs types d'adjuvants qui sont régis par la norme NF EN 934-2 : plastifiants/superplastifiants, rétenteurs d'eau, entraîneurs d'air, accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise, hydrofuges...etc.

### 1.4.2. Rôle des adjuvants

Les adjuvants comme indiqué précédemment sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors du malaxage ou avant leur mise en œuvre, provoquent des modifications des propriétés du béton, notamment à l'état frais [21].

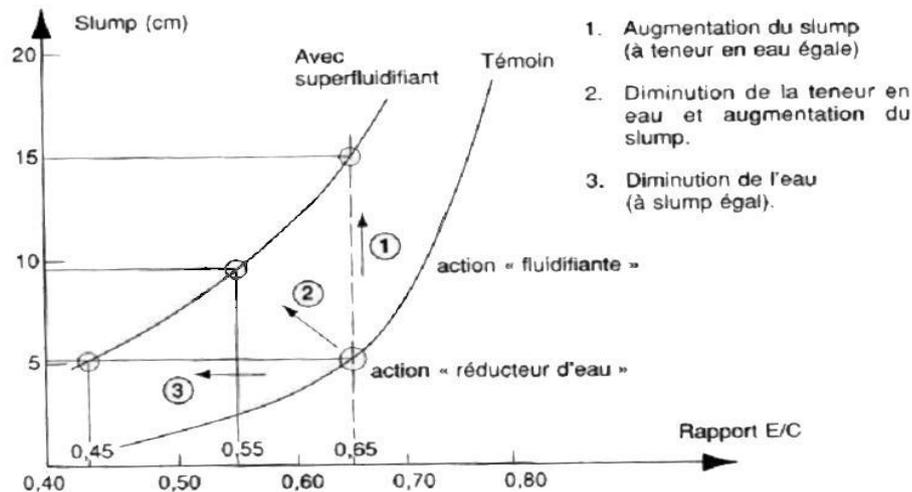


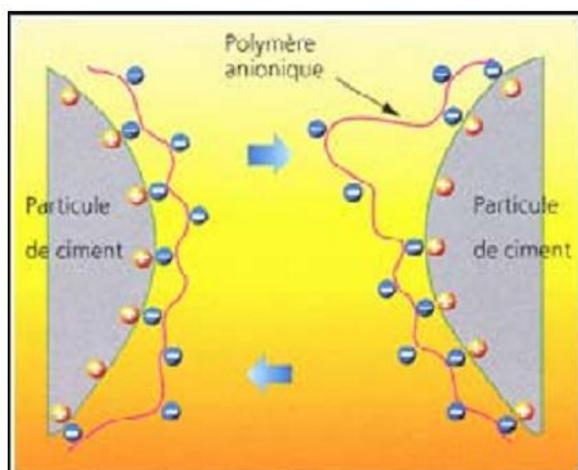
Figure 1.3 : Utilisations des superplastifiants [21]

Les plastifiants et les superplastifiants permettent, comme décrit dans la **figure 1.3** [21], soit de réduire le dosage en eau à maniabilité constante, induisant donc un gain de résistance en compression, soit d'augmenter l'affaissement à teneur en eau constante. Les deux types de produits sont différenciés par leur efficacité en terme de réduction d'eau, les superplastifiants étant plus efficaces. Les premières générations de superplastifiants étaient des résines du type mélamines sulfonées, naphthalènes-sulfonates ou vinyles sulfonates. Un superplastifiant permet de réduire la quantité d'eau et donc d'augmenter la résistance mécanique du béton tout en contrôlant sa rhéologie. Il devient possible de rapprocher considérablement les grains de ciment lorsqu'ils s'hydratent durant le mélange. Cet effet permet ainsi de confectionner des bétons à matrice cimentaire très dense et très imperméable qui présentent une résistance à la pénétration des agents agressifs sans commune mesurée avec celle des bétons ordinaires [24].

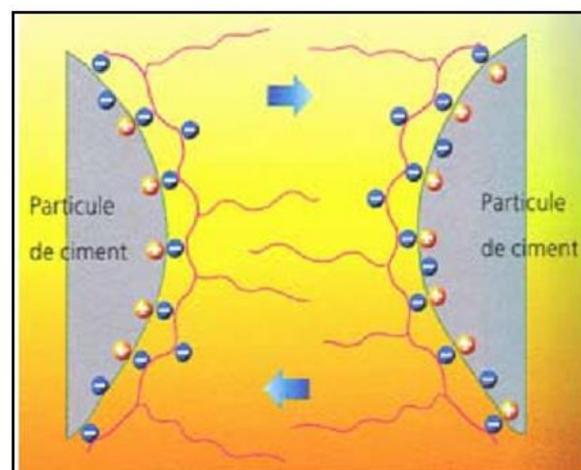
Le mécanisme physique, permettant au superplastifiant d'augmenter la maniabilité du béton, est résumé comme suit [23 ,22] : le ciment, dont la taille des grains varie de l'ordre de quelques microns à une centaine de microns, est obtenu par broyage. Ce dernier provoque une désorganisation de la surface des grains, et donc la création de sites chargés électriquement. Par conséquent, le ciment présente, à l'état concentré, une structure floculante: les charges opposées s'attirent mutuellement pour former des agrégats de particules. Au sein d'une suspension (béton frais), les grains de ciment forment des agglomérats qui emprisonnent une certaine quantité d'eau,

qui n'est plus alors disponible pour donner de l'ouvrabilité au mélange. Le rôle des superplastifiants est donc de casser ces agglomérats pour rendre cette eau disponible. Ce type d'adjuvant se compose de molécules organiques solubles dans l'eau, portant des charges électriques (négative par exemple) réparties sur leur longueur. Ces molécules viennent donc se fixer aux points chargés positivement situés à la surface des grains de ciment et forment des boucles au-dessus de cette surface. Grâce à cette boucle, tout se passe comme si le grain de ciment avait acquis une forte charge négative. Chaque grain de ciment, étant chargé de cette façon, tend à s'écarter de ses voisins. Ces forces de répulsion peuvent être assez grandes pour fragmenter des agglomérats et libérer l'eau liée. Parmi les nouvelles générations de superplastifiants, on trouve la famille des polycarboxylates. Ils sont en général plus efficaces et fournissent un maintien de l'ouvrabilité plus long. Ces produits agissent sur les grains de ciment, comme exposé ci-dessus, mais plutôt par effet d'encombrement stérique [25]. Ces superplastifiants hauts réducteurs d'eau à effet fluidifiant prolongé sont des polymères acryliques (chargés négativement) sur lesquels sont fixés des polymères non chargés (polyoxydes d'éthylène) ou présentant des groupements terminaux anioniques. Spécialement conçu pour le béton de bâtiment et de génie civil, ils permettent la confection de bétons à hautes performances. Leur action dispersante, liée aux groupements polyoxydes d'éthylène très encombrants, est principalement due à des forces de répulsion stériques. Ces adjuvants présentent deux effets qui peuvent être à l'origine de la dispersion : – la défloculation par répulsion électrostatique suite à l'adsorption de molécules portant de nombreuses charges de même signe (**Figure 1.4**) ;

- la lubrification des grains par répulsion stérique due à l'encombrement des molécules (**Figure 1.5**).



**Figure 1.4** : Particules de ciment recouvertes de polymères anioniques : dispersion par répulsion électrostatique [24]



**Figure 1.5** : Particules de ciment recouvertes de polymères à fort encombrement stérique: dispersion par répulsion stérique [24]

## 1.5. LES GRANULATS POUR LE BÉTON

La définition de granulat est donnée par la norme XP-P 18.540 : « ensemble de grains de dimensions comprises entre 0 et 125mm destiné notamment à la confection des mortiers et des bétons ». Les sables sont des granulats dont le diamètre du plus gros grain doit être inférieur à 2mm. Les granulats ont une influence importante sur les performances mécaniques et sur les déformations différées du béton obtenu. En effet ils ont, en règle générale, de meilleures performances mécaniques que la pâte de ciment. L'origine du granulat doit être prise en compte pour l'explication du comportement différé du béton en conditions séchantes à température ambiante, et à hautes températures.

Les granulats peuvent également contribuer à la dégradation d'une structure en béton. En effet les granulats ne subissent pas de déformations différées à l'échelle de la durée de vie des structures. Les déformations différées de la pâte de ciment sont donc empêchées ce qui se traduit par :

- Des déformations différées à l'échelle du béton bien plus faibles que celles observées sur pâte de ciment.
- L'apparition de contraintes internes auto induites (sans chargement mécanique extérieur) dans la pâte de ciment et les granulats.

La forme et la rugosité des granulats ont une grande influence sur la compacité du mélange granulaire, qui est également sensible à la granulométrie (distribution de taille des granulats utilisés dans un béton donné). La granulométrie a pour but d'optimiser la réduction du volume des vides afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques du béton. [26]. La forme et la nature (calcaire, siliceuse, silico-calcaire) des granulats choisie joue également sur l'adhérence avec la matrice cimentaire. Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine soit naturelle, soit artificielle, soit recyclée.

### 1.5.1. Les principes de fabrication des granulats

Il n'est pas toujours possible de trouver dans la nature des gisements de granulats qui ont exactement les caractéristiques techniques désirées leur permettant de remplir sans traitement les fonctions auxquelles on les destine. Il faut impérativement les transformer dans des installations de production, ou bien les fabriquer en concassant et en tamisant des morceaux de roches abattus par dynamitage sur le front de taille d'une carrière.

Les granulats sont donc produits suite aux quatre opérations suivantes:

- l'extraction de la matière première;
- le concassage;
- le criblage;
- le stockage avant expédition.

Parfois, une seule opération complète ou remplace un de ces quatre traitements. Par exemple, la cuisson des nodules d'argile ou de schiste prend place entre le concassage et le criblage et lorsque les nodules sont moulés, le concassage est supprimé.

#### **1.5.1.1. Les granulats concassés de roche massive (granulats de carrière)**

Les granulats concassés de roche massive sont des granulats naturels extraits de carrières. Ils sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur confère des formes très angulaires. Nous nous intéresserons aux roches massives les plus couramment utilisées dans l'industrie du béton. Parmi celles-ci, quatre roches sont d'origine magmatique : granite, porphyre, basalte, diorite ; deux roches sont d'origine métamorphique : quartzite, marbre ; une roche est sédimentaire : le calcaire. [27]

##### **□ Roches d'origine magmatique**

Le granite est une roche magmatique consolidée en profondeur. Il est constitué de quartz, de feldspath et de mica. Les porphyres ou rhyolites sont des roches de composition similaire au granite, elles contiennent de gros cristaux de feldspath, de quartz ou d'éléments ferro-magnésiens. Le basalte est une roche lourde, dont les éléments essentiels sont le feldspath calco-sodique et le mica. Les diorites sont des roches de teinte sombre, d'aspect granitoïde, constituées de feldspath et de mica.

##### **□ Roches d'origine métamorphique**

Les quartzites sont des grès très compacts formés uniquement de grains de quartz cimentés par de la silice. Les marbres sont des calcaires grenus (à grains microscopiques). Ils sont constitués de grains de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) de grosseur uniforme ou irrégulière, regroupés sans orientation mais sans laisser de vide.

##### **□ Roches d'origine sédimentaire**

Les calcaires sont principalement constitués de calcite. Ils montrent un très fin développement de petits grains de taille uniforme ou irrégulière.

#### **1.5.1.2. Extraction des granulats concassés**

Ils sont produits à partir de bancs rocheux. Pour le carrier, une bonne connaissance géologique de son gisement peut orienter, du moins dans une certaine mesure, son exploitation vers tel ou tel banc, telle ou telle zone afin de produire des granulats ayant les caractéristiques requises. L'extraction se fait par abattage à l'explosif, après que la première couche de découverte qui porte principalement sur la terre végétale ait été éliminée au buteur. L'abattage sert à fragmenter le massif que le matériau soit repris aisément par les engins et acheminé à l'usine de traitement.

Après l'abattage, on procède fréquemment à un pré criblage appelé "scalpage". Le scalpage permet d'éliminer les restes de découverte et de roches altérées dans l'abattage [28].

Le matériau scalpé ou non, est ensuite concassé pour être amené à la dimension d'utilisation.

#### 1.5.1.2.1. Le concassage

Le concassage est la division des matières dures en fragments grossiers. Ce procédé permet de transformer des gros fragments de roches en une série de granulats qui répondent en quantité et en qualité aux divers besoins de l'industrie: granulats pour béton, granulats routiers,...etc. Cette opération est réalisée en plusieurs étapes, concassage primaire, secondaire et tertiaire, par exemple, séparés l'un de l'autre par des criblages. Les équipements qui permettent le concassage des blocs rocheux sont appelés concasseurs [28]. Ces appareils de concassage peuvent être classés en deux catégories suivant qu'ils travaillent:

- par écrasement entre deux pièces de concassage;
- par chocs et projections sur des enclumes fixes;

Le choix des concasseurs affectés à ces opérations est évidemment très lourd de conséquences pour le carrier puisque, d'une part les concasseurs représentent un investissement important et, d'autre part, la productivité de l'installation, la qualité et le prix de revient des granulats en dépendent énormément

Habituellement, le concasseur primaire est un concasseur à mâchoires, les autres étant des giratoires. Cependant, actuellement, on trouve également des concasseurs primaires giratoires. Les concasseurs à mâchoires ou giratoires sont des appareils qui travaillent par écrasement dont une pièce broyante est fixe et l'autre mobile.

##### a) **Concasseurs travaillant par écrasement :**

Dans cette catégorie d'appareils, on trouve des concasseurs dont une pièce broyante est fixe et l'autre mobile tels que les concasseurs giratoires ou à mâchoires et des concasseurs dont les deux pièces broyantes sont mobiles tels que les concasseurs à cylindres.

##### □ **Concasseurs giratoires**

Le pied de l'arbre principal étant engagé dans un mouvement excentrique, décrit un cercle; sa tête étant fixe, l'arbre décrit un cône autour de l'axe vertical de l'appareil. À mi-hauteur de cet arbre, une pièce broyante, appelée le cône ou la noix, oscille à l'intérieur d'une pièce fixe appelée l'anneau de broyage ou bol. Ainsi, pendant le fonctionnement en charge de l'appareil, le cône roule sur les matériaux, ce qui réduit l'usure des pièces broyantes. Selon la géométrie interne qu'on leur donne, les concasseurs giratoires peuvent être utilisés comme concasseurs primaires, secondaires ou tertiaires [29].

Les concasseurs giratoires primaires présentent de larges ouvertures d'entrée qui leur permettent d'accepter les plus gros blocs. Actuellement, les plus gros appareils en service ont des ouvertures d'admission atteignant dans le sens radial plus de deux mètres, ce qui permet d'admettre des blocs de 10 à 15 tonnes de poids unitaires avec une production pouvant dépasser 3500 t/h. Ces concasseurs ainsi chargés à plein, travaillent constamment au maximum de leur capacité. Le rapport de réduction de ce type de concasseur est de l'ordre de 6 à 8.

Les concasseurs giratoires secondaires ne sont pas habituellement utilisés pour fabriquer des matériaux finis. On demande donc à ces appareils d'avoir une capacité de prise aussi grande que possible afin de pouvoir être alimentés sans difficulté. Ils doivent permettre une bonne prise des matériaux et comporter une chambre facilitant l'admission et l'évacuation.

Les concasseurs giratoires tertiaires ou finisseurs sont utilisés lorsque l'on traite des matériaux durs et abrasifs et que l'on veut obtenir des gravillons de bonne cubicité. Divers fabricants se sont penchés sur les améliorations techniques permettant de créer les conditions idéales de production de granulats de qualité. Ces conditions sont les suivantes:

- vitesse d'écrasement bien adaptée pour permettre une meilleure prise des matériaux dans la zone d'alimentation et favoriser une bonne évacuation des produits, et de ce fait obtenir une compacité favorisant l'autobroyage;
- grand nombre de chocs sur toutes les faces des produits surtout dans la zone parallèle de finition (partie de finition de la chambre de broyage) de favoriser l'autobroyage et la rupture des éléments longs et plats;
- broyage en milieu dense, compact et homogène.

On voit donc que le mode d'utilisation, les caractéristiques mécaniques du concasseur giratoire et les caractéristiques physiques de sa chambre de concassage ont une influence extrêmement importante sur le rendement et la qualité des produits.

#### □ Concasseurs à mâchoires

Le principe général de ces appareils est le suivant: le matériau est écrasé entre deux mâchoires, l'une mobile et l'autre fixe. Le mouvement de la mâchoire mobile est différent suivant qu'il s'agit d'un appareil à simple ou à double effet. Les concasseurs à mâchoires à simple effet sont constitués d'un bâti en acier sur lequel est montée la mâchoire fixe. Le balancier, équipé de la mâchoire mobile, est suspendu sur un arbre excentré. Cet arbre est muni de deux volants d'inertie comportant des masses d'équilibrage. L'amplitude de la mâchoire mobile est réglée par l'inclinaison du plan du volet par rapport au plan du balancier. Dans un cycle complet, la mâchoire mobile commence par s'écarter de la mâchoire fixe avec un mouvement ascendant, puis elle se rapproche avec un mouvement descendant qui entraîne les produits vers la sortie.

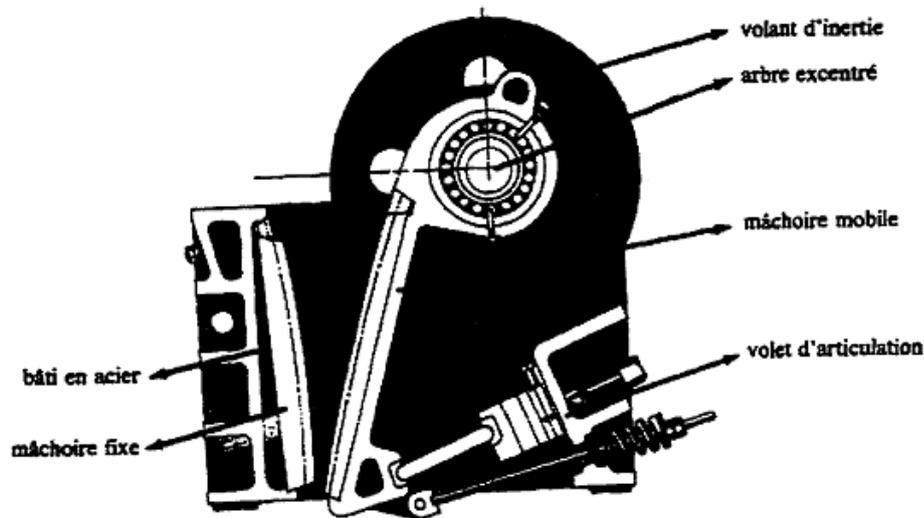
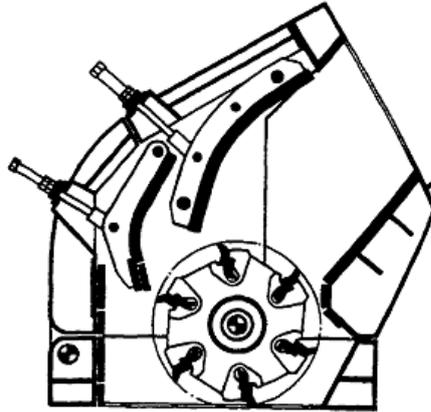


Figure 1.6: Concasseur à mâchoires à simple effet [29].

Un concasseur à mâchoires à double effet comporte un bâti sur lequel sont montés la mâchoire fixe et deux balanciers: l'un, le balancier moteur, entraîné par l'arbre excentrique, décrit des cercles dans sa partie haute, ce qui engendre un mouvement vertical alternatif. Ce mouvement vertical est transformé en un mouvement alternatif horizontal transmis au pied du balancier porte- mâchoire. Le mouvement de la mâchoire mobile est donc purement horizontal, ce qui limite l'usure due au va-et-vient vertical. Les qualités essentielles de ce type de concasseur sont sa robustesse et sa facilité d'entretien. Par contre, si la roche exploitée est à la fois dure et abrasive, et si le rendement horaire recherché est élevé ( $\geq 1000$  t/m), il est souvent préférable d'utiliser soit un concasseur giratoire, soit un concasseur à choc. Le rapport de réduction de ce type de concasseur est de d'ordre de 4 à 5.

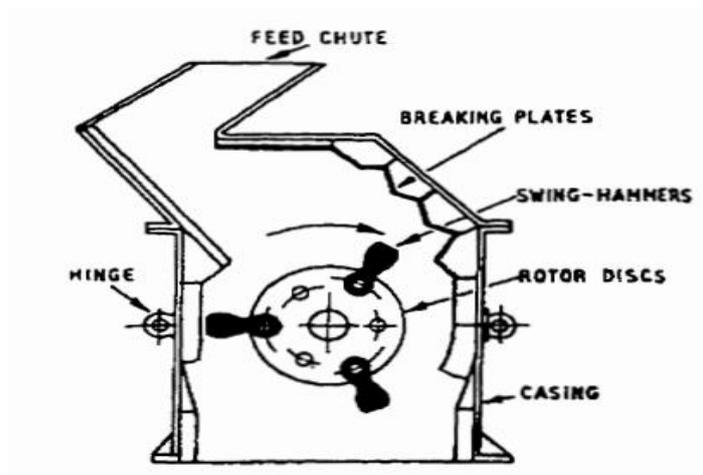
#### b) Concasseur travaillant par chocs

Le principe général en est toujours le même. Un rotor tourne à grande vitesse à l'intérieur d'une enceinte fermée équipée de plaques de chocs ou d'enclumes. Le rotor muni d'un certain nombre de pièces de chocs, fixes dans le cas des concasseurs à chocs, mobiles dans le cas des broyeurs à marteaux, projette les matériaux sur les enclumes. Le concassage s'effectue par chocs des particules sur les percuteurs ou marteau du rotor, par chocs des matériaux entre eux, par chocs des matériaux sur les enclumes. Les concasseurs à chocs permettent de très grands rapports de réduction pouvant aller jusqu'à 30, mais produisent un pourcentage important d'éléments fuis; par contre, ils sont très sensibles à l'usure. Lorsqu'on a affaire à des matériaux tant soit peu abrasifs contenant plus de 10 % de silice. Il importe cependant de rappeler que les broyeurs à marteaux permettent d'obtenir des granulats de cubicité inégalable.



**Figure 1.7:** Concasseur à choc primaire [30].

Le concasseur «à projection» est un nouveau type de broyeur qui fonctionne par projection. Les granulats à broyer sont introduits par le tube d'alimentation sur la face supérieure du concasseur. Le rotor, tournant à grande vitesse, projette les matériaux à la périphérie, soit sur un matelas de matériaux qui sert d'écran de broyage, soit dans certains cas sur des enclumes interchangeables en métal anti-abrasion. La production comporte un pourcentage important d'éléments fins et la cubicité des particules obtenues est excellente. Ces appareils sont parfois utilisés uniquement en correcteur de forme.



**Figure 1.8 :** Concasseur à projection dit finisseur (ou correcteur de forme) [30].

### c) Choix du type de concasseur

Il n'existe pas de concasseur idéal; les différents types de concasseurs que nous venons de décrire présentent des avantages et des inconvénients, compte tenu du type de roche qui doit être traité et de l'utilisation prévue des granulats produits. Les facteurs qui interviennent lors du choix d'un concasseur sont :

- la dimension des plus gros morceaux des produits d'abattage;
- le débit horaire;

- le rapport de réduction désiré;
- la dureté et l'abrasivité de la roche à traiter;
- la granulométrie désirée des produits fins;
- la forme des produits concassés;
- la consommation d'énergie et la puissance des moteurs;
- les caractéristiques mécaniques du concasseur (rusticité, facilité d'entretien, facilité de remplacement des parties usées par abrasion, facilité des réglages, etc.).

En conclusion, les paramètres tels que les caractéristiques mécaniques de la roche, la granularité du matériau à l'entrée du concasseur, le débit d'alimentation et sa régularité, le réglage du concasseur, ont une grande influence sur la forme, l'angularité, la granularité et le débit du produit de concassage. Il faut donc que les appareils choisis, soient bien réglés et bien utilisés. En particulier, le débit d'alimentation doit varier aussi peu que possible, et pour éviter les dérèglages accidentels, il faut surveiller les concasseurs à l'aide d'instruments de contrôle, ampèremètre, voltmètre, etc.

#### **1.5.1.2.2. Le criblage**

Le criblage est l'opération qui permet de séparer un ensemble de granulats en deux sous-ensembles, l'un contenant les éléments plus gros d'une dimension donnée, l'autre les plus fins. Le criblage est l'opération complémentaire du concassage. Avant chaque concassage, on commence par éliminer les matériaux qui ont déjà une dimension inférieure à celles des particules les plus petites qui sortiront du concasseur: on parle de précriblage. Cette opération vise plusieurs objectifs:

- augmenter le rendement horaire du concasseur.
- éliminer les particules de roche Les plus fragiles qui ont été réduites les premières en particules de petites dimensions.
- limiter l'abrasion dans le concasseur puisque ce sont les particules les plus fines qui causent le plus l'usure du concasseur.

Après le concassage, le système de tamisage, constitué par un empilement de cribles inclinés à mailles carrées ou rectangulaires, permet de séparer les particules selon leur grosseur. L'efficacité du tamisage dépend des paramètres suivants:

- épaisseur de la couche de matériau sur le crible;
- vitesse de déplacement du matériau;
- fréquence et amplitude de vibration du crible;
- longueur et surface du crible.

D'autres paramètres tels que la proportion de passant, la forme des particules, la teneur en eau du matériau, influent sur les paramètres ci-dessus, compliquant ainsi le problème qui, il faut bien le dire, n'a pas de solution toute faite.

Le système de tamisage peut fonctionner en circuit ouvert, c'est-à-dire qu'aucune des particules qui a été classée n'est retournée vers le concasseur pour y voir sa taille réduite. Il peut fonctionner en circuit fermé avec le concasseur, c'est-à-dire que le refus du tamis supérieur est sans cesse retourné vers le concasseur.

### **1.5.1.3. Les granulats alluvionnaires**

La plupart des granulats alluvionnaires sont des roches sédimentaires détritiques non consolidées [27]. En effet, les matériaux alluvionnaires sont le résultat d'une érosion sur place des différentes roches, les résidus de cette altération ayant été entraînés par les eaux de ruissellement puis par les rivières et les fleuves. Au cours de ce transport, des éléments sont arrachés par les cours d'eau aux terrains qu'ils traversent, ce qui explique l'hétérogénéité des alluvions [28].

### **1.5.1.4. Extraction des granulats alluvionnaires**

Les exploitations de granulats alluvionnaires se trouvent dans les vallées où sont implantées des agglomérations, c'est-à-dire à proximité des besoins en granulats pour les bétons. La distance entre le gisement et le lieu d'utilisation est limitée ce qui diminue d'autant le coût de transport. Comme ces granulats se présentent déjà sous une forme granulaire et que par conséquent ils nécessitent moins de fragmentation, le coût de production est faible.

L'extraction des granulats alluvionnaires se fait généralement à l'aide de pelles mécaniques en site terrestre et par dragage en site aquatique. Le concassage est une opération auxiliaire pour les granulats alluvionnaires. Il est essentiellement employé pour augmenter la production des classes déficitaires à partir des classes granulaires excédentaires. Le criblage est l'opération principale du process. Il est généralement pratiqué dans un courant d'eau, ce qui permet de combiner les opérations de tamisage et de lavage [28].

## **1.5.2. Fabrication des granulats à l'étranger**

### **1.5.2.1. Caractéristiques des granulats alluvionnaires**

Due fait de leur érosion naturelle, les granulats alluvionnaires sont des matériaux aux formes arrondies. Comme de plus les matériaux sont peu concassés lors du process industriel, les granulats produits sont peu anguleux [28]. Le **tableau 1.1** donne les valeurs moyennes et l'étendue des caractéristiques des granulats alluvionnaires.

Caractéristique	valeur minimale	valeur moyenne	valeur maximale
<b>Propriétés physiques</b>			
Masse volumique réelle (tonnes/m <sup>3</sup> )	sable 2,4	2,5	2,6
	gravillon 2,5	2,6	2,7
Absorption eau (%)	sable 0,5	0,8	1,2
	gravillon 0,6	0,8	2,1
Sensibilité au gel (%)	0	11	20
Module de Finesse	2,2	2,4	2,8
Teneur en fines (% <80 µm)	2,5	3,5	6
Équivalent de sable (PS en %)	70	85	90
Valeur de bleu (g de colorant/kg de fraction 0/2 mm)	< 0,7		
Matières organiques (%)	test négatif		
Impuretés (%)			
Éléments coquilliers (%)	0	0,1	1
Propreté des gravillons (%)	0,2	0,4	1,5
<b>Propriétés mécaniques</b>			
Los Angeles	15	22	30
<b>Propriétés chimiques</b>			
Teneur en soufre total (%)	< 0,1		
Teneur en sulfates (%)	< 0,1		
Teneur en chlorures (%)	< 0,02		

**Tableau 1.1** : Caractéristiques moyennes des granulats alluvionnaires [31]

Les principales caractéristiques des granulats alluvionnaires sont leur faible teneur en fines (éléments inférieurs à 80 µm) et leur propreté (équivalent de sable élevé). Leur teneur en fines est inférieure à 4 % et leur équivalent de sable (PS) supérieur à 85 % en moyenne. Le module de finesse des sables alluvionnaires indique une valeur moyenne de 2.4 ce qui est caractéristique d'un bon sable à béton. Concernant les caractéristiques mécaniques, la valeur de l'essai Los Angeles qui est supérieure à 20 indique que les granulats alluvionnaires ont une résistance moyenne à la fragmentation par choc.

Les granulats alluvionnaires sont des matériaux de choix pour la fabrication des bétons hydrauliques et notamment des produits en béton courants. La forme arrondie ou roulée des granulats alluvionnaires confère au béton frais une maniabilité élevée qui facilite le serrage et permet l'obtention d'une compacité élevée.

#### 1.5.2.2. Caractéristiques des granulats concassés

Dans le **tableau 1.2** les caractéristiques des granulats issus de roches massives concassées. Nous nous sommes intéressés aux types de roches les plus couramment utilisées dans l'industrie du béton. Parmi les granulats calcaires, il faut distinguer les calcaires durs des calcaires tendres. En effet, un calcaire dur possède des propriétés très proches d'une roche magmatique ou métamorphique tandis qu'un calcaire tendre présente une absorption d'eau, une sensibilité au gel ainsi que des propriétés mécaniques beaucoup moins favorables à la réalisation d'un béton [31].

Caractéristique	Type de granulat					Nature de la roche															
	Granite	Porphyre	Basalte	Diorite	Quartzite	Marbre	Calcaire														
	<b>Propriétés physiques</b>																				
Masse volumique réelle (tonnes/m <sup>3</sup> )	2.6	2.7	2.8	2.5	2.6	2.7	2.7	2.8	2.9	2.6	2.8	2.9	2.5	2.6	2.7	2.5	2.6	2.7	2.2	2.5	2.7
Absorption eau (%)	0.7	0.9	1.3	0.4	0.8	1.2	1.2	1.5	1.8	0.3	0.5	0.7	0.6	0.9	1.4	0.2	0.4	0.7	1.2	2.5	3.2
Sensibilité au gel (%)	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<10	<10	<10	0.8	1.4	2.3
Module de Finesse	2.9	3.1	3.3	2.	2.5	3.2	2.7	3.1	3.7	2.2	2.5	2.9	2.5	3.1	3.6	-	2.5*	-	2.4	2.9	3.6
Coefficient d'aplatissement (%)	11	14	16	13	14	15	11	14	17	8	10	12	14	15	16	7	12	23	1	7	12
Teneur en fines (% <80 µm)	9	11	17	10	14	18	7	9	12	13	13	15	9	12	16	•	10*	•	6	12	19
Équivalent de sable (PS en %)	58	64	71	53	59	71	65	68	70	62	64	68	48	63	75	•	75*	•	67	74	79
Valeur de bleu (g de colorant/kg de fraction 0/2 mm)	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.7
Matières organiques (%)	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif
Impuretés (%)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Éléments coquilliers (%)	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet
Propreté (%)	0.3	0.9	1.6	0.6	1.1	2	0.2	0.5	0.9	0.6	1	1.7	0.9	1	1.1	0.7	0.9	1	1.1	2.8	6.2
	<b>Propriétés mécaniques</b>																				
Los Angeles	12	20	32	11	17	25	8	13	17	10	13	16	15	18	25	15	22	32	16	31	49
	<b>Propriétés chimiques</b>																				
Teneur en soufre total (%)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Teneur en sulfates (%)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Teneur en chlorures (%)	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02

\* valeur unique

**Tableau 1.2 :** Caractéristiques des granulats issus des roches massives concassés [31]

Concernant les propriétés physiques, mis à part les calcaires tendres, toutes les roches étudiées ont une masse volumique légèrement plus élevée que celle des granulats alluvionnaires. Parmi ces roches, les basaltes et les diorites se différencient des autres roches par des masses volumiques réelles supérieures. Le coefficient d'absorption d'eau moyen et la sensibilité au gel des granulats concassés de roche massive sont comparables à ceux des granulats alluvionnaires, mis à part pour les calcaires tendres qui sont par définition des roches poreuses. De manière générale, les granulats concassés sont plus anguleux, plus écaillés et plus allongés que les granulats alluvionnaires [32] ; ils ont donc un coefficient d'aplatissement plus élevé.

Concernant la propreté des granulats concassés de roche massive, la valeur de bleu, les teneurs en matières organiques, en impuretés et en éléments coquilliers sont comparables à celles des granulats alluvionnaires. La spécificité des granulats concassés est leur importante teneur en fines (9 à 14 %) et leur équivalent de sable plus faible que celui des granulats alluvionnaires.

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, les granulats concassés de roche massive ont globalement un Los Angeles plus faible que celui des granulats alluvionnaires, ce qui signifie une meilleure résistance à la fragmentation par chocs. Il faut noter que les granulats de basalte et de diorite sont plus résistants que les autres granulats concassés de roche massive. Les granulats calcaires tendres peuvent avoir un Los Angeles supérieur à 30, ce qui est caractéristique d'une roche peu résistante à la fragmentation par chocs.

Enfin, concernant les teneurs en soufre total, sulfates et chlorures, rien ne différencie un granulats concassé de roche massive d'un granulats alluvionnaire.

### **1.5.2.3. Approvisionnement en granulats et spécificité des granulats concassés**

L'utilisation de granulats concassés de roche massive dans l'industrie du béton est liée à la proximité de cette matière première. Lors de la formulation du béton, le problème majeur rencontré est celui de l'importante quantité de fines. En effet, la fabrication d'un sable de concassage génère de 9 à 14 % de fine ( $< 80 \mu\text{m}$ ). Pour diminuer la teneur en fines, les carriers et les industriels du béton emploient différentes méthodes :

- ✓ le carrier défillérise partiellement le sable concassé ;
- ✓ le carrier défillérise totalement le sable concassé qui est ensuite recomposé par ajout de fillers de différentes natures ;
- ✓ le sable concassé est mélangé en usine à un autre sable pauvre en fines.

Le problème posé par l'abondance des fines est encore plus délicat avec les sables concassés de calcaire car ces granulats peuvent produire de nouvelles fines lors du malaxage du béton (le coefficient Los Angeles est une indication de la résistance à l'attrition des granulats).

### **1.5.2.4. Influence des granulats sur les process de fabrication**

De manière générale, les bétons frais de granulats concassés sont moins maniables que les bétons frais de granulats alluvionnaires. Cette remarque est surtout valable pour les bétons frais de granulats concassés de roche éruptive ou métamorphique. Cette moindre maniabilité est due à l'angularité des grains ainsi qu'à leur forme allongée. Pour améliorer la maniabilité et la mise en place du béton frais, il est nécessaire d'augmenter la quantité de liants, la teneur en eau et d'ajouter des plastifiants ou des superplastifiants. L'augmentation de la quantité d'eau peut toutefois être minimisée en ajoutant du sable alluvionnaire de faible granulométrie.

L'influence des granulats sur l'usure du matériel de fabrication (malaxeur, moule, presse ...) est tout à fait différente si on utilise des granulats concassés de roche éruptive ou métamorphique ou si on utilise des granulats concassés de calcaire tendre. En effet, les granulats concassés de calcaire tendre ont un pouvoir abrasif moins important que les granulats concassés de roche éruptive, métamorphique ou de calcaire dur. Dans le cas des granulats de calcaire tendre, l'usure des malaxeurs, des presses et des moules est comparable à celle observée lors de l'utilisation des granulats alluvionnaires.

Dans le cas du sable du basalte concassé, qui est une des roches les plus abrasives utilisées dans l'industrie du béton, on observe que l'usure des malaxeurs et des presses est trois fois plus importante et que celle des moules métalliques est quatre fois plus importante que l'usure observée dans le cas des granulats alluvionnaires. En utilisant des marbres, des diorites ou des porphyres concassés, des industriels du béton ont observé une usure du matériel liée à la dureté des roches deux fois plus importante d'avec les granulats alluvionnaires. Même pour la production de dalles qui est effectuée à faible cadence, les moules s'usent plus vite. Il est à noter, à titre de comparaison, que l'emploi de granulats alluvionnaires concassés (ayant des grains plus anguleux que les granulats alluvionnaires ou concassés) provoque une usure du matériel supérieure de 10%.

#### **1.5.2.5. Influence des granulats sur les caractéristiques des produits**

Dans l'industrie française du béton, les granulats concassés de roches éruptives, métamorphiques et calcaires sont utilisés dans la fabrication de tous les produits en béton de consommation courante tels que les blocs, les pavés, les bordures, les regards, les dalles de voirie, les entrevous, les poutrelles... À condition de réduire les teneurs en fines de ces granulats, ceux-ci peuvent être utilisés en totalité de la fraction sable ou de la fraction gravillon.

Les caractéristiques mécaniques des produits obtenus sont souvent supérieures de 10 à 20 % à celles des produits fabriqués avec des granulats alluvionnaires. Ceci est dû à la dureté des granulats concassés qui en font des granulats particulièrement intéressants pour la production de produits de voirie par exemple.

L'utilisation des granulats concassés peut également être liée à la nécessité d'obtenir des caractéristiques précises au niveau de l'aspect ou de la teinte des produits. Par exemple, l'utilisation de calcaire concassé permet d'obtenir des produits de teinte plus claire. Pour certains industriels la teinte ou l'aspect des produits constitue la raison majeure qui justifie l'utilisation des granulats concassés. Lors de la fabrication des blocs et des entrevous, l'utilisation de granulats concassés favorise la cohésion du béton frais dans les moules. En outre, les blocs et les entrevous ne nécessitent pas de finition de surface et les enduits sont plus faciles à appliquer sur les faces

des blocs de granulats concassés. Les blocs et les entrevous sont donc, du point de vue technique, des produits très favorables à l'utilisation de granulats concassés, ce qui explique la forte proportion de granulats concassés utilisés pour leur fabrication.

### 1.5.3. Emploi du sable de carrières dans le béton hydraulique

En les récentes années, il a eu lieu un intérêt croissant de l'utilisation du sable concassé obtenu des carrières de calcaire dans quelques pays où le sable alluvionnaire n'est largement disponible. D'ailleurs, la demande en agrégats pour produire le béton est encore élevée pendant que les ressources naturelles sont en décroissance.

Une large quantité de matériau à la dimension de filler est produite durant le processus de concassage des calcaires peu solides en particulier, qui peut être utilisée comme agrégat. L'utilisation de ce matériau est bénéfique pour l'amélioration du béton de sorte à décroître le contenu en air. Pour plusieurs années, le calcaire a été de plus en plus utilisé dans le béton comme gros agrégat, filler ou constituant principal du ciment. Il est utilisé dans le béton haute performance comme dans celui d'ordinaire. Comparé au béton ordinaire, avec le même rapport E/C et même ciment, le béton avec une teneur élevée de filler et une répartition convenable, possède généralement des caractéristiques améliorées dans la résistance.

Certaines quantités de fillers dans le béton favorise l'amélioration de cohésion. Cependant, une quantité excessive de fillers tend à croître le besoin en eau et dégrade l'adhérence agrégat-pâte du ciment. Les fillers aident à réduire le contenu total d'air dans le béton. Par conséquent, ça va contribuer à améliorer la qualité du béton. La poussière du calcaire concassé est utilisée comme matériau filler dans le ciment, ou agrégat pouvant avoir quelques effets bénéfiques sur le béton dépendant du taux de substitution et de la composition chimique de la poussière.

En vue de ceci, il est donc nécessaire de contrôler le contenu d'agrégat en argile, limon et la poussière fine. ASTM C 33 et BS 883 ont mis des limites maximales entre 3 et 15 % de la masse du sable, selon le type du matériau.

L'effet de l'ajout de fillers calcaires au ciment utilisé dans la confection de mortier et béton, à l'état frais et à l'état durci, a été le sujet de plusieurs recherches durant des années ; mais des travaux moindres, ont été fait pour étudier l'effet de l'ajout fillers calcaires au sable, sur les propriétés du béton.

Les granulats concassés issus de roche massive conviennent à la confection des bétons hydrauliques et à l'exécution des travaux de viabilité courants [28].

Les bétons confectionnés à partir de granulats concassés de roche massive ont une moins bonne maniabilité que les bétons de granulats alluvionnaires. Ceci est dû à la nature anguleuse,

écaillée et allongée de grains de granulats concassés [32]. Pour atteindre une maniabilité comparable à celle des bétons de granulats alluvionnaire, il est nécessaire d'apporter une quantité d'eau supérieure au mélange et d'augmenter le dosage en ciment dans des proportions variant de 10 à 30 kg/m<sup>3</sup> [33].

Toutefois, la demande en eau des bétons de granulats concassés peut être réduite en utilisant du sable alluvionnaire comme granulats fin. L'addition d'un plastifiant est également recommandée toujours dans le but d'améliorer la maniabilité des bétons frais [34].

Concernant la résistance mécanique, les bétons fabriqués avec des granulats concassés de type basalte ont généralement des résistances à la compression supérieures à celles des bétons de gravillons alluvionnaires [35, 36].

Par ailleurs, à résistance à la compression égale, les résistances à la flexion des bétons de gravillons concassés peuvent être entre 10 à 20 % supérieures à celles des bétons de gravillons alluvionnaires [36].

D'après **Coquillat et Lesage** [37], en France, Les teneurs en fines déterminées expérimentalement comme optimales sont très voisines de celles résultant de la production industrielle des sables, résultat économiquement très intéressant. Pour 9 ou 10 sables sur 12, les résistances mécaniques des mortiers sont égales ou supérieures à celles du mortier normal. Pour les sables de basalte, de gneiss, d'andésite, de microdiorite, la résistance du mortier à fort dosage en ciment est supérieure de 20 à 25 % à celle du mortier normal.

**Ahmed E.Ahmed et Ahmed A.El-Kourid** [38] ont étudié l'influence des particules fines (fillers) de deux sables sur la performance du béton frais et durci. Ces sables utilisés dans le béton à Riyadh, la capitale de l'Arabie-Saoudite, sont soit du sable naturel d'oued ou fabriqué issu des pierres concassées. En général, les deux sables sont dérivés des roches calcaires. Les résultats indiquent que le besoin en eau croit rapidement quand le remplacement des fines dépasse plus de 5 % pour le béton de sable naturel et plus de 15 % pour le béton de sable concassé. Cependant, la résistance à la compression pour les bétons de même consistance décroît linéairement en augmentant le pourcentage des particules fines en substitution (**figures 1.9 et 1.10**). La résistance à la flexion et d'adhérence en ont la même allure. Pour les bétons ayant le même rapport E/C, l'incorporation des particules fines provoque des réductions significatives du slump. En revanche, la résistance à la compression du béton au sable naturel n'était pas affectée d'une façon significative par l'incorporation des particules fines, le béton au sable concassé a indiqué une augmentation dans la résistance. Les résultats de cette étude indiquent aussi que les taux limites de fillers inférieures à 75 µm sont de 5 à 10 %, respectivement, pour les bétons à sable naturel et à

sable concassé de la région de Riyadh. Quand l'ouvrabilité de ces bétons est améliorée par des réducteurs d'eau, l'augmentation de ces limites de 7 à 15 %, respectivement, n'aura pas d'effets significatifs sur l'air occlus, la résistance à la compression et la contrainte d'adhérence du béton ; et par conséquent, ça sera acceptable.

Le retrait de dessiccation de bétons à sable naturel et à sable concassé de même slump (100 mm) croit avec l'augmentation de substitution de fillers. Aucune différence n'a été observée entre les valeurs du retrait pour les deux bétons ayant la même substitution.

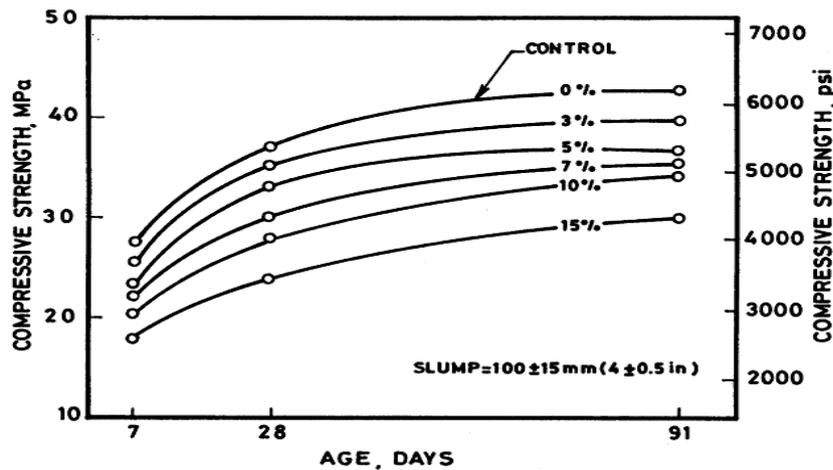


Figure 1.9 : variation de la résistance à la compression en fonction d'âge du béton à sable naturel avec un slump de 10 mm [38]

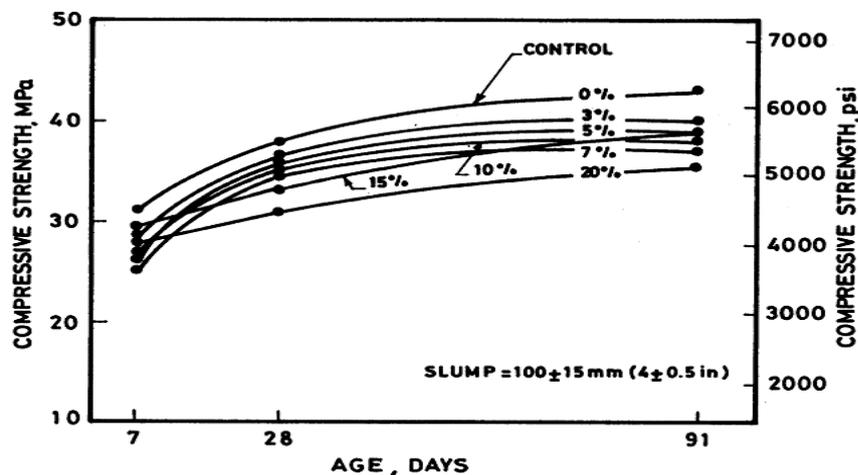
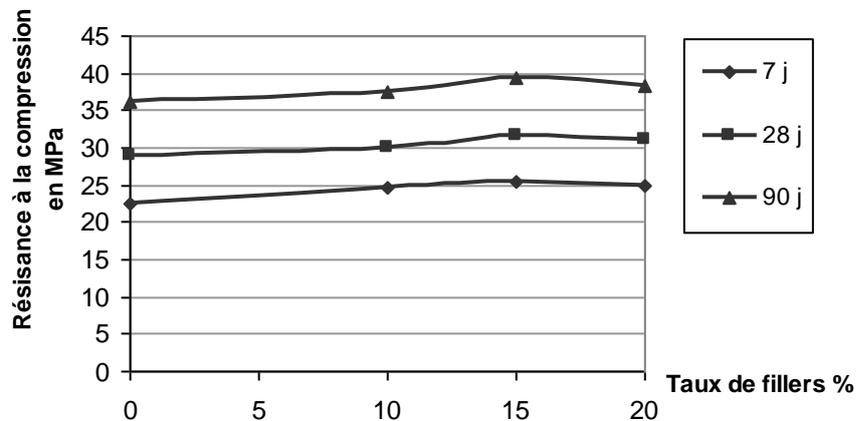


Figure 1.10 : variation de la résistance à la compression en fonction d'âge du béton à sable concassé avec un slump de 10 mm [38]

Sadhouari et al [39], de l'université d'Oran, ont conclu que la présence des fines en proportion modérée (entre 5 et 15 %) dans un sable est une nécessité (figure 1.11), les résultats obtenus avec différents pourcentages de fines, ont mis en évidence l'intérêt de l'ajout des fillers calcaires pour l'amélioration des performances mécaniques des mortiers et bétons. Donc, le sable

de concassage constitue une solution idéale au problème d'approvisionnement à condition qu'il soit corrigé en fines ou combiné avec un sable de mer.



**Figure 1.11** : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers (Kristel). [39]

**Hachaichi et Behim** [40], de l'université d'Annaba ont montré que la substitution du sable naturel par les déchets de concassage ne répond pas uniquement à un souci environnemental mais contribue à l'amélioration de certaines propriétés mécaniques notamment la résistance en compression et physiques. La substitution du sable roulé par le sable concassé donne des résultats intéressants, notamment en compression. La présence des fines calcaires améliore la compacité du mélange par effet de remplissage et accélère l'hydratation du ciment à court terme par effet physique.

**Makhloufi et al** [41], de l'université de Laghouat, ont fait une étude aboutissant à la conclusion suivante: Les bétons fabriqués à partir des granulats calcaires concassés du Turonien de l'Atlas Saharien Central, ont un comportement mécanique qui se rapproche de celui des bétons fabriqués par des granulats alluvionnaires siliceux et silico-calcaires, puisque pour des maniabilités plastiques du béton frais, et après 28 jours de conservation dans un environnement ambiant, la résistance à la compression peut atteindre 25 MPA.

**Alshahwany** [42], après une recherche expérimentale sur, l'influence des fillers calcaires comme substitution partielle au sable sur les propriétés du béton à base agrégats de rivière, a conclu que l'affaissement décroît avec l'augmentation du taux de filler calcaire, alors que le besoin en eau croît légèrement avec l'augmentation de ce dernier, tandis que la résistance à la compression du béton croît avec l'augmentation du taux de substitution de filler dans le sable ; ainsi le béton constitué avec 20 % de substitution a donné la valeur élevée de résistance de compression. De plus, le remplacement partiel du sable par le filler calcaire à un taux de 20 % fait augmenter la résistance à la traction par fendage.

**Kherbache et al** [43], en étudiant les granulats produits par deux carrières de la wilaya de Bejaia, sont arrivés aux conclusions suivantes :

Les sables de carrières peuvent être utilisés dans les bétons de structure si la qualité et le taux de fines sont conformes aux spécifications en vigueur et que la composition optimale est à 10 % de fines pour les résistances à la compression. Par contre pour le retrait c'est l'inverse (retrait maximal à 10 % de fines) ; Afin de concilier résistance à la compression importante et retrait faible, on peut admettre que le taux de fines de 15 % est acceptable à condition d'utiliser des adjuvants et un meilleur contrôle des fines argileuses (essai au bleu de méthylène).

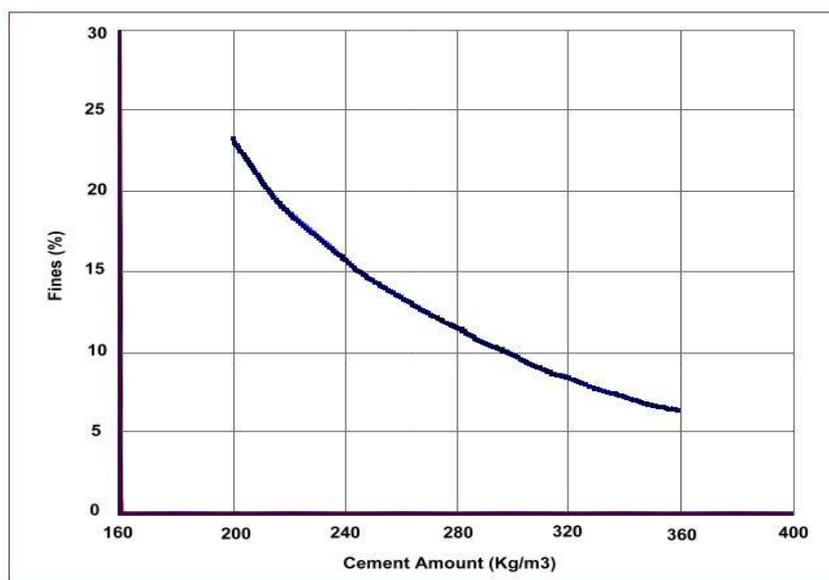
**Ćurčić et al** [44], en utilisant différents types d'agrégats (de rivière, calcaire, andésite, diabase et basalte, ont tenté d'étudier l'influence de ces agrégats sur la consistance du béton, ont trouvé que les fines des agrégats concassés ont une importante influence sur la consistance puisqu'ils font diminuer l'ouvrabilité du béton .En revanche, la substitution avec les agrégats de rivière améliore l'ouvrabilité. D'autre part, le type d'agrégat a aussi une influence sur la consistance. On peut citer leurs conclusions dans les points suivants :

- ✓ Les consistance obtenues des deux méthodes slump test ou Vébé ont une excellente concordance.
- ✓ Quand le rapport E/C croît de 0.45 à 0.65, la consistance du béton change de ferme à liquide sans se soucier du type d'agrégat.
- ✓ Dans les mélanges aux agrégats concassés, les fines de pierres concassées ont une influence défavorable sur la consistance du béton à l'état frais.
- ✓ Les imperfections des fines des agrégats concassés disparaissent après sa substitution avec celles d'agrégat de rivière.
- ✓ Au rapport E/C de 0.55, il y a une importante influence du type d'agrégat sur la consistance du béton, tandis que au rapport E/C de 0.65, cette influence se minimise.
- ✓ Pour le béton confectionné d'agrégats concassé avec des fines de rivière, l'influence du type d'agrégat croît avec l'augmentation du rapport E/C.
- ✓ Pour le béton moderne, l'usage des superplastifiants paraît nécessaire.

**Ltifi et al** [45], ont mené une étude sur l'effet de la substitution totale ou partielle de sable alluvionnaire par le sable de concassage sur le comportement de béton hydraulique et notamment sur la résistance à la compression. La conclusion de cette étude est que les résistances à la compression des différents bétons étudiés sont dans la même fourchettes de résistance ( $\pm 10$ MPa ), ce qui conduit à penser que le béton calcaire ne se distingue pas particulièrement, sur cet aspect, des bétons classiques. Ainsi, on peut conclure que ces matériaux locaux (sables de concassage)

peuvent remplacer avantageusement le sable siliceux. Mais à l'influence importante de pourcentage des fines, on peut bien améliorer la qualité du béton calcaire en essayant d'enlever les fines, une voie possible mais délicate.

D'après **Sven-Henrik** [46], le contenu en fines du sable concassé est encore important. Il est souvent très élevé dans le sable concassé que le sable naturel (alluvionnaire) parce que les fines de ce dernier ont été lavées au cours de sa production naturelle. Les normes industrielles, comme ASTM C33 et les spécifications d'agrégats des producteurs du béton, permettent des taux limités de fines dans le sable. Malgré que des recherches récentes et des exemples commerciaux davantage indiquent les avantages d'utiliser des taux élevés des fines, le taux optimal des fines varie en fonction du type du béton à fabriquer de ces sables. Désormais, il y a un besoin de séparer les fines du sable puis les ajouter, sans se soucier du taux désiré. Une recherche du Chili (CDT - Corporación de Desarrollo Tecnológico) a été faite pour établir le taux optimal des fines pour différents types de propriétés du béton (**figure 1.12**).



**Figure 1.12** : le taux optimal des fines pour différents types de propriétés du béton - [46] tiré de CDT

A titre d'exemple, on présente ci-dessous, une méthode révolutionnaire pour la solution du problème d'excès des fines dans le sable concassé, créée par la compagnie Metso minerals. [46]

Les équipements de Metso minerals pour le sable ont été basés rationnellement sur l'efficacité des systèmes de concassage et filtrage pour réduire les pertes de production et offrir un produit de qualité stable. Cela permettra aux producteurs de minimiser les frais de production tout en préservant un rendement élevé de produits.

Pour assurer une bonne qualité de sable concassé, tout le matériau doit passer au moins une fois par le concasseur. Typiquement, le sable concassé contient en excès de matériau de 0 à 0.25 mm en comparant avec les spécifications de la courbe enveloppe de granulométrie largement utilisée dans l'industrie. Cette solution est tout à fait loin des pratiques opérations de classification pour la plupart des tamis vibrants, avec la méthode traditionnelle d'enlever ces fines à travers les équipements de processus de mouillage comme les roues de sable ou les hydrocyclones. Les séries de Nordberg AC de classification par classificateur d'air emploient l'air au lieu de l'eau pour enlever les fines du sable concassé. Les avantages sont à la fois :

1. pas besoin d'eau ou traitement d'eau qui coûte cher.
2. un produit sec veut dire une économie en production car il n'y a pas besoin de séchage du produit.

## 1.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a tenté de faire une synthèse bibliographique sur les constituants du béton hydraulique, notamment le sable de concassage, en présentant certains résultats de recherches faites en Algérie et à l'étranger, relatifs à la valorisation de ce sable comme substitution au sable alluvionnaire dans la fabrication du béton.

Nous nous sommes rendus compte qu'il y a une bonne possibilité de remplacement du sable alluvionnaire par le sable concassé, ainsi d'autres effets positifs sur le béton. Par conséquent, le sable concassé constitue une bonne alternative en matière de manque d'approvisionnement en sable alluvionnaire. Les résultats obtenus par plusieurs chercheurs sur le béton à base de sable de carrière apparaissent prometteurs, mais des études approfondies sur les propriétés de ce béton s'imposent davantage en vue d'une meilleure utilisation du sable de concassage dans les bétons et les mortiers.

## Chapitre 2 : MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPERIMENTALES

### 2.1. Introduction

Dans le but de mettre en évidence l'influence d'utilisation du sable de carrière et éventuellement les ajouts minéraux et adjuvants sur les propriétés des mortiers et bétons à l'état frais et à l'état durcis, on a utilisé un ciment de la classe CPA CEM I 42.5- ES, deux types de sable l'un issu de carrière et l'autre issu d'oued (alluvionnaire), et des gros agrégats de pierres concassées, en outre un ajout minéral actif « la pouzzolane naturelle » et un adjuvant superplastifiant. Les caractéristiques de ces matériaux et ainsi les méthodes expérimentales seront présentées dans ce chapitre.

### 2.2. Le ciment

Le ciment utilisé dans tous les essais appartient à la classe CPA CEM I 42.5- ES selon NA442-2000 provenant de la cimenterie de Ain Touta (wilaya de Batna).

#### 2.2.1. Composition chimique et minéralogique du ciment

Les essais pour la détermination des caractéristiques chimiques du ciment a été effectuée au niveau du laboratoire de la cimenterie de Ain-Touta (Batna) selon la norme NF EN 196-2. La composition chimique du ciment CPA utilisé dans tous les essais ainsi que sa composition minéralogique sont données respectivement aux **tableaux 2.1 et 2.2**.

**Tableau 2.1** : Composition chimique du ciment

Elément	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.F
%	21.62	4.49	5.37	63.91	1.66	1.92	0.25	0.03	0.81

**Tableau 2.2** : Composition minéralogique du ciment

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
52.48	22.69	2.82	16.32

#### 2.2.2. Propriétés physiques

##### 2.2.2.1. La finesse du ciment

La finesse d'un ciment peut être caractérisée par sa surface massique : c'est la surface totale des grains contenus dans une unité de masse exprimée en m<sup>2</sup> / kg de poudre ou (cm<sup>2</sup>/g). L'étude de la finesse ou surface spécifique du ciment est d'autant plus nécessaire puisqu'elle a une influence directe sur les propriétés mécaniques et rhéologiques du mortier et béton. Elle est calculée en fonction du temps au moyen de l'appareil de Blaine ou « perméabilimètre de Blaine » (EN 196-6).

La surface spécifique  $S$  est calculée par la formule : 
$$S = k \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1-e) \cdot \sqrt{\eta}}$$

$S$  : Surface spécifique

$k$  : Constante de l'appareil

$e$  : Porosité de la couche tassée

$t$  : Temps mesuré en secondes

$\rho$  : Masse volumique (  $\text{g/cm}^3$  )

$\eta$  : Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises).

Aussi elle peut être déterminée par la formule :  $S = k_t \cdot k_d \cdot k_a \cdot \sqrt{T}$  (B. Mezghiche)

$k_a$  : Constante de l'appareil (0.255)

$k_t$  : Constante de la température

$k_d$  : Constante de densité

$T$  : Temps mesuré en secondes.

### 2.2.2.2. La consistance normale

Le but de l'essai de consistance est précisément de déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage. La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement, dans la pâte d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. La consistance évaluée de cette manière sera appelée « consistance Vicat ». (EN 196 – 3).

### 2.2.2.3. Le temps de prise

Le début ou la fin de prise dépend de plusieurs paramètres, il varie notamment suivant la composition chimique et la finesse de mouture de ciment étudié, il dépend aussi de la température ambiante et, le cas échéant, des dosages en adjuvant, utilisés à une même température et sans adjuvant, deux ciments différents pourront se distinguer, par une plus ou moins grande rapidité de prise. L'objectif de l'essai est de définir, pour un ciment donné, un temps qui soit signification de cette rapidité de prise. (EN196 – 3).

Le **tableau 2.3** résume les caractéristiques physiques du ciment.

**Tableau 2.3** : Caractéristiques physiques du ciment.

Masse volumique apparente $\text{g/cm}^3$	Masse volumique absolue $\text{g/cm}^3$	Surface spécifique $\text{cm}^2/\text{g}$	Consistance normale (%)	Début de prise (heure : min)	Fin de prise (heure : min)
1.02	3.02	3470	27	2 :50	3 :45

### 2.2.2.4. Essais mécaniques sur le ciment

### 2.2.2.5. Mesure des résistances à la compression et à la flexion

Les ciments sont classés d'après leur résistance mécanique minimale, à la rupture par compression à 7 et 28 jours d'âge, mesurée sur des éprouvettes prismatiques  $(4 \times 4 \times 16) \text{cm}^3$  en mortier normal (EN 196 - 1).

Les résultats des essais de résistance sont donnés dans le **tableau 2.4**.

**Tableau 2.4** : Résistance à la compression et à la flexion du ciment.

Résistances en (MPa)	7 j	28 j
à la compression	34.2	48.6
A la flexion	4.8	6.5

Donc, l'activité du ciment CPA CEM I 42.5 MPa est vérifiée.

### 2.3. Les agrégats

Pour pouvoir réaliser notre étude, on a choisi d'utiliser des agrégats locaux, à savoir un sable de carrière, un sable alluvionnaire d'oued (comme témoin) et des graviers de pierres concassées. Les agrégats utilisés alors sont les suivants :

- Gravier de pierres concassées (PC) : 7/15 et 15/25 provenant d'une carrière à Biskra.
- Sable concassé de fraction 0/3 (SC): provenant d'une carrière à Biskra.

Pour ce sable, on a utilisé trois types selon la teneur en fines à savoir :

- ✓ Sable de carrière sans modification (SM) : pourcentage des fines 12 %.
  - ✓ Sable de carrière tamisé au tamis 0,16 mm (ST) : pourcentage des fines 4 %.
  - ✓ Sable de carrière lavé (SL) : pourcentage des fines 0.1 %.
  - Sable alluvionnaire de fraction 0/5 comme témoin (Stm) : pourcentage des fines 6 %.  
provenant d'oued Djedi (Biskra).
- ❖ On note que les différents pourcentages des fines ont été obtenus en procédant à des analyses granulométriques des sables.

#### 2.3.1. Le Sable

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du béton et du mortier. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs. En vue de son utilisation dans la confection des mortiers et bétons, le sable doit être soumis à des essais de laboratoire tels que l'analyse granulométrique, l'essai de l'équivalent de sable et l'analyse chimique ...etc. Avant d'exposer les différentes caractéristiques de notre sable, nous tenons à rappeler quelques spécifications des normes françaises concernant les sables. Il est préférable que la courbe granulométrique du sable appartienne au fuseau proposé pour la granularité optimale de sable à béton qui correspond à un module de finesse (MF) compris entre 2,2 et 2,8. La teneur en sulfates doit être inférieure à 0.2% conformément à la norme NF EN 196-2. La présence de sulfates dans les granulats est à l'origine de réactions expansives dues à la formation d'étringite.

La norme NF P 18-583 stipule que le pourcentage des chlorures doit être indiqué par le fournisseur s'il est égal ou supérieur à 0.02%.

Le pourcentage d'éléments coquilliers dans un sable doit être inférieur ou égale à 5% conformément à la norme NF P 18-540. Si les éléments coquilliers sont en trop grandes proportions, ils peuvent diminuer sensiblement les résistances et l'ouvrabilité des bétons.

### 2.3.2. Granulométrie et forme des grains

L'analyse granulométrique a été réalisé conformément à la norme NF EN 933-1, qui permet de déterminer la grosseur et les pourcentages de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension inférieur ou égale à 80 mm, en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimension des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas, le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

La forme des grains pour le gravier des pierres concassées est plus au moins ronde.

Les courbes granulométriques des différents types d'agrégats utilisés (voir **photos 2.1 à 2.4**) sont représentées dans les figures (**2.1 à 2.5**).



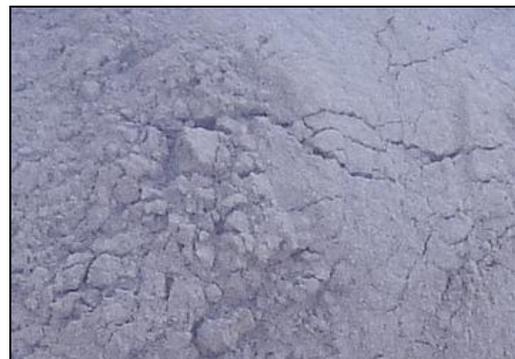
**Photo 2.1** : Sable de carrière



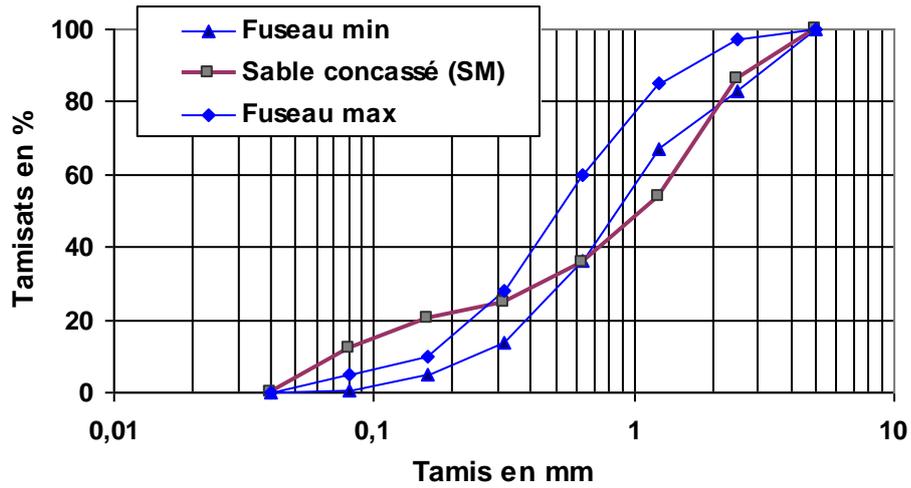
**Photo 2.2** : Sable d'oued (alluvionnaire)



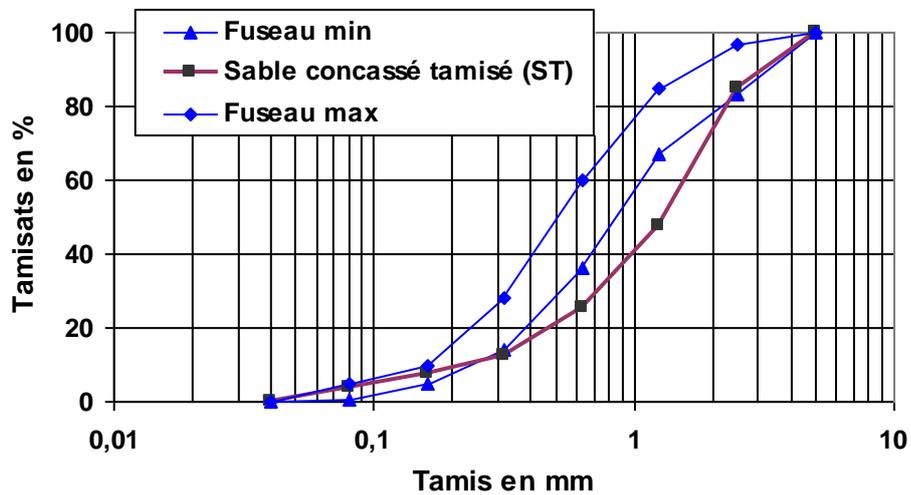
**Photo 2.3** : Gravier de pierres concassées



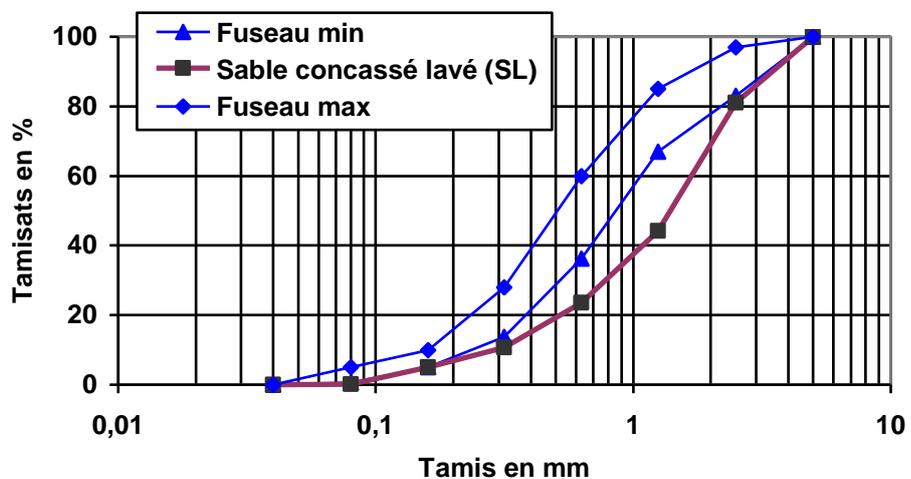
**Photo 2.4** : Pouzzolane naturelle (broyé)



**Figure 2.1 :** Courbe granulométrique du sable de carrière sans modification (SM).  
(Pourcentage des fines 12 % ; Module de finesse = 2.79)



**Figure 2.2 :** Courbe granulométrique du sable de carrière tamisé (ST).  
(Pourcentage des fines 4 % ; Module de finesse = 3.22)



**Figure 2.3 :** Courbe granulométrique du sable de carrière lavé (SL).  
(Pourcentage des fines 0.1 % .Module de finesse = 3.36)

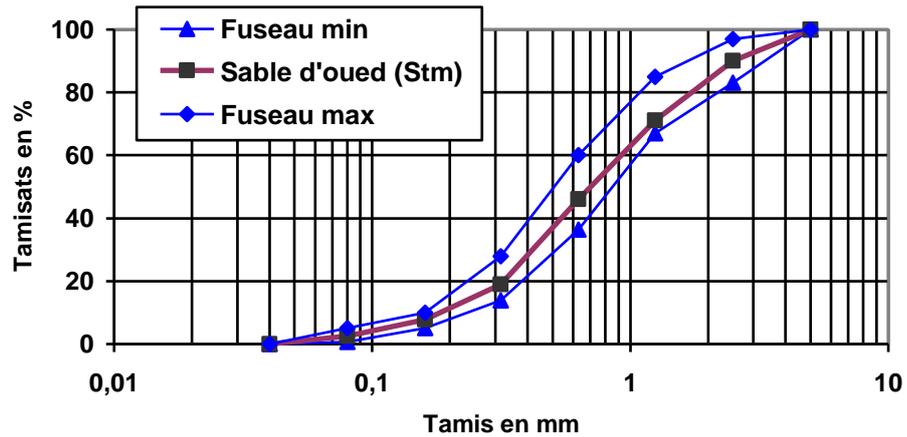


Figure 2.4 : Courbe granulométrique du sable d’oued (Stm).  
(Pourcentage des fines 6 %.Module de finesse = 2.69)

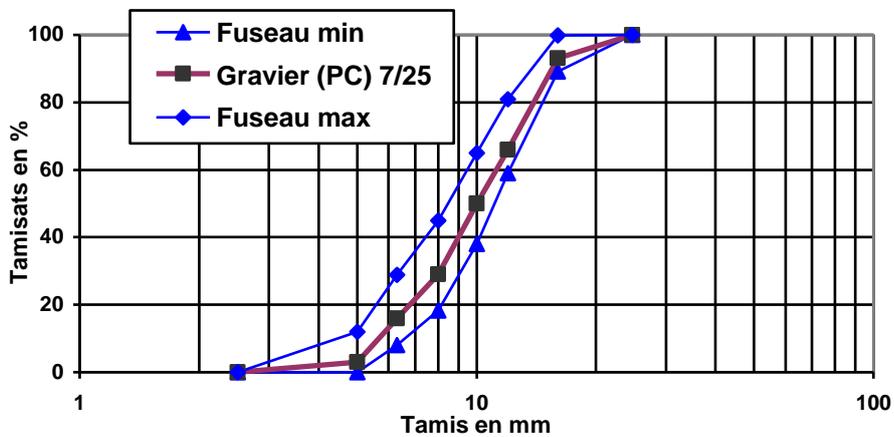


Figure 2.5 : Courbe granulométrique du gravier de pierres concassées (PC) 7/25.

2.3.3. Masses volumiques

Les masses volumiques apparentes et absolues des différents granulats utilisés sont mesurées d’après la norme NF P 18-554 et 555, les résultats sont résumés dans le **tableau 2.5**.

Tableau 2.5 : Masses volumiques des granulats utilisés

Granulats	Masse volumique absolue g/cm <sup>3</sup>	Masse volumique apparente g/cm <sup>3</sup>
Sable concassé	2.67	1.59
Sable d’oued	2.50	1.62
Gravier	2.67	1.48

2.3.4. Absorption d’eau

Le coefficient d’absorption est défini comme le rapport de l’augmentation de la masse de l’échantillon après immersion dans l’eau pendant 24 heures à 22° C à la masse sèche de l’échantillon conformément à la norme NF P 18-555.

Les résultats de cet essai sur les granulats utilisés sont donnés au **tableau 2.6**.

**Tableau 2.6 :** Absorption d'eau des granulats utilisés

Granulats	Sable concassé	Sable d'oued	Gravier
Absorption %	2.4	1.2	1.5

### 2.3.5. Propriétés des granulats

#### 2.3.5.1. Propreté des gros agrégats (impureté)

Les impuretés concernées sont telles que le limon, l'argile, et des matériaux solubles. Pour les granulats naturels, les impuretés sont en général un mélange de poussière, de petites particules d'argile. Le pourcentage prescrit par la norme NF P 18-591 à ne pas dépasser est fixé à 3 %. Les résultats concernant nos granulats indiquent qu'ils ne comportent pas d'impuretés.

#### 2.3.5.2. Résistance à l'abrasion ( Essai Los -Angeles)

La dureté des granulats utilisés a été contrôlée par l'essai de Los- Angeles conformément à la norme NF P 18-573 qui exige la valeur limite de 40 % à ne pas dépasser. La valeur obtenue de cet essai nous donne un Los Angeles égal à 22 %, qui est une indication d'un bon granulat.

#### 2.3.5.3. Equivalent de sable

Cet essai, utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables. L'essai a été fait conformément à la norme (NF P18 – 598).

Les résultats de l'essai sur les sables utilisés est donnés au **tableau 2.7**.

**Tableau 2.7 :** Equivalent de sable

Equivalent de sable	Sable concassé			Sable d'oued (Stm)
	SM	ST	SL	
Esv (%)	92	95	99	73
Es (%)	84	94	98	71
Nature et qualité du sable	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.			Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

#### 2.3.5.4. Compacité et porosité des granulats

La compacité C est définie par le rapport du volume de matière pleine au volume total, alors que la porosité (P) est par définition le complément à l'unité de la compacité.

$$C = \frac{MV_{app}}{MV_{abs}} \times 100 (\%); \quad P = 1 - C (\%)$$

$MV_{app}$  : Masse volumique apparente.

$MV_{abs}$  : Masse volumique absolue.

La compacité selon Dreux [21] pour les granulats courants est de l'ordre de 55 % à 65 %. L'essai est réalisé selon la norme NFP18-554, **tableau 2.8**.

**Tableau 2.8** : Compacité et porosité des granulats.

Granulats	Sable concassé	Sable d'oued	Gravier
Compacité (%)	60	69	55
Porosité (%)	40	31	45

### 2.3.5.5. Analyse chimique des granulats utilisés

L'analyse chimique des granulats utilisés est indispensable dans le but de savoir le taux des matières nuisibles qui peuvent affecter la qualité du béton ou mortier. L'analyse chimique a été effectuée au niveau du laboratoire de la cimenterie de Ain-Touta. Le **tableau 2.9** montre la composition chimique du gravier et sable de carrière.

**Tableau 2.9** : Composition chimique du gravier et du sable de carrière.

Elément	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	P.F	M.O
%	2.35	45.70	0.29	1.89	0.74	/	42.48	/

## 2.4. Eau de gâchage

Toutes les eaux ne peuvent être utilisées pour gâcher les bétons et les mortiers, l'eau potable est toujours utilisable, mais dans certains cas l'eau contient des impuretés, ce qui nécessite une analyse chimique pour déterminer les impuretés qui s'y trouvent. Ces impuretés sont soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis-à-vis du ciment, des granulats ou des armatures, soit des particules en suspension qui sont indésirables.

- L'excès d'impuretés détériore les propriétés du béton : les propriétés physiques et mécaniques (prise et résistance), les propriétés esthétiques (tâches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures).

La teneur en chlorures admise ne doit pas dépasser 500mg. Les chlorures peuvent provenir de l'eau de gâchage, du ciment, des granulats et éventuellement de l'adjuvant. Les chlorures en faible proportion peuvent modifier légèrement la prise et le durcissement du ciment, par contre la forte proportion peut réagir avec le ciment et compromettre la durabilité du béton, leurs effets sont néfastes sur les armatures dont la corrosion provoque l'éclatement du béton.

Selon la norme NF P 18.325 la quantité maximale des ions chlorures est fixée aux valeurs suivantes :

- ✓ 1% pour les bétons non armés
  - ✓ 0.5% pour les bétons armés
  - ✓ 0.2% pour les bétons précontraints
- La norme NF P 18-303 stipule que :
- Les matériaux en suspension doivent être inférieures à 0.5% de l'eau en masse pour le béton non armé. L'argile en suspension fait diminuer les caractéristiques mécaniques.
  - Les matières organiques doivent être inférieures à 0.5% .Les micro algues diminuent les résistances et ont un effet d'entraînement d'air diminuant la compacité.
  - Les sulfates doivent être inférieures à 0.1% pour le béton non armé. Ils réagissent avec le ciment pour former de l'étringite qui s'accompagne de gonflement.
  - Les nitrates doivent être inférieures à 0.05%.
  - Les sels de sodium (Na) et de potassium (K) doivent être inférieures à 0.1%. Ils interviennent dans la rhéologie du béton, la prise du ciment et la durabilité du matériau durci.
  - L'acidité en pH doit être supérieure à 4.

L'eau utilisée dans la fabrication des mélanges du mortier et béton est provenant du robinet exempt d'impuretés. Il s'agit d'une eau potable, sa température n'est pas contrôlée lors du gâchage, quoique le béton obtenu a une température assez constante d'un mélange à l'autre, de 18 à 20 °C.

### 2.5. Superplastifiant

Il s'agit d'un superplastifiant MEDAPLAST- SP40 provenant de la Société Algérienne Granitex, de couleur marron, de densité  $1,22 \pm 0,01$  et de 32 % d'extrait sec. Il a été incorporé directement dans le mélange après quelques minutes de malaxage, selon la norme NFP18-335. Il permet d'obtenir des bétons et mortiers plus maniable et de très haute qualité. Lors de nos essais, on a incorporer dans les mélanges une quantité de ce superplastifiant égale à 0.5% de la masse du ciment utilisé.

### 2.6. La pouzzolane naturelle

Afin d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques du mortier et béton, la pouzzolane naturelle a été incorporée au ciment avec une proportion de **10 %** en masse de ciment en substitution.

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle d'origine volcanique de provenance du gisement de Bouhamidi (Béni-Saf), et fournie par la cimenterie de Ain-Touta en quantité suffisante pour nos besoins d'élaboration sur le plan expérimental. Cette pouzzolane est fournie

sous forme de roches concassées de type pierre ponce et scorie de diamètres variant de 5 à 10 mm. Pour pouvoir la substituer au ciment CPA, nous avons d'abord procédé à son étuvage à 105 °C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage. Nous l'avons ensuite complètement broyé puis passé au tamisage.

Les caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle d'origine volcanique sont illustrées dans le **tableau 2.10** suivant :

**Tableau 2.10** : Caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle

Caractéristiques physiques	Unité	Valeurs
masse volumique apparente	g/ cm <sup>3</sup>	0.98
masse volumique absolue	g/ cm <sup>3</sup>	2.70
surface spécifique Blaine	cm <sup>2</sup> /g	4700
pouzzolannicite	%	85
absorption	%	58.70
porosité	%	57.10
humidité	%	2.50
perte au feu	%	5.60

Le **tableau 2.11** illustre à son tour la composition chimique de la pouzzolane naturelle.

**Tableau 2.11** : Composition chimique de la pouzzolane naturelle

Composants	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>4</sub>	Cl	P.F
%	45.21	17.85	9.99	9.84	4.38	/	/	3.91

## 2.7. Composition des mortier et bétons

Afin de réaliser cette étude, plusieurs mélanges de mortier et béton de différents dosages et avec des différents rapport E/C ont été faits à base de **quatre types de sable** à savoir :

- ◆ Sable de carrière sans modification
- ◆ Sable de carrière tamisé au tamis 0.16 mm
- ◆ Sable de carrière lavé
- ◆ Sable d'oued (témoin)

Notons que le calcul de ces mélanges a été fait par la méthode des « volumes absolus » élaborée par le professeur B.Scramtaïv [47].

Les mélanges du mortier et béton ont été réalisés comme suivant :

- Pour le mortier, un dosage variable de 300, 350 et 400 Kg/m<sup>3</sup> et avec un rapport E/C variant 0.65, 0.70 et 0.75. Pour l'ajout de la pouzzolane et le superplastifiant, on a choisi d'utiliser le rapport E/C de 0.70 avec les trois dosages de 300, 350 et 400 Kg/m<sup>3</sup>.
- Pour le béton, un dosage variable de 300, 350 et 400 Kg/m<sup>3</sup> et avec un rapport E/C variant 0.4, 0.5 et 0.6. Pour l'ajout de la pouzzolane et le superplastifiant, on a choisi d'utiliser deux rapports E/C 0.4 et 0.5 avec un dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup>.

Les **tableaux 2.12 à 2.15** présentent la formulation complète des différents mélanges de mortier et béton comme indiquée au dessus.

**Tableau 2.12 :** Composition des mélanges de mortier avec « sable d'oued » témoin pour différents dosages de ciment 300, 350 et 400 kg/m<sup>3</sup>

E/C	Ciment kg/m <sup>3</sup>	Eau l/m <sup>3</sup>	Sable kg/m <sup>3</sup>
0.65	300	195	1765
	350	227	1644
	400	260	1520

**Tableau 2.13 :** Composition des mélanges de mortier avec « sable concassé » pour différents dosages de ciment 300, 350 et 400 kg/m<sup>3</sup>

E/C	Ciment kg/m <sup>3</sup>	Eau l/m <sup>3</sup>	Sable kg/m <sup>3</sup>
0.65	300	195	1884
0.70		210	1845
0.75		225	1805
0.65	350	227	1754
0.70		245	1707
0.75		262	1661
0.65	400	260	1623
0.70		280	1570
0.75		300	1516

**Tableau 2.14** : Composition des mélanges de béton avec « sable concassé » pour différents dosages de ciment 300, 350 et 400 kg/m<sup>3</sup>

E/C	Ciment kg/m <sup>3</sup>	Eau l/m <sup>3</sup>	Pierres concassés kg/m <sup>3</sup>	Sable kg/m <sup>3</sup>
0.4	300	120	1213	872
0.5		150	1182	823
0.6		180	1143	782
0.4	350	140	1172	816
0.5		175	1143	751
0.6		210	1115	686
0.4	400	160	1133	757
0.5		200	1106	677
0.6		240	1089	588

**Tableau 2.15** : Composition des mélanges de béton avec « sable d'oued » témoin pour différents dosages de ciment 300, 350 et 400 kg/m<sup>3</sup>

E/C	Ciment kg/m <sup>3</sup>	Eau l/m <sup>3</sup>	Pierres concassés kg/m <sup>3</sup>	Sable kg/m <sup>3</sup>
0.5	300	150	1182	770
	350	175	1143	703
	400	200	1106	634

## 2.8. Confection et cure des éprouvettes

Pour le mortier, nous avons élaboré des séries d'éprouvettes cubiques (50x50x50) mm<sup>3</sup> destinées aux essais de compression et des prismes (70x70x280) mm<sup>3</sup> destinées aux essais de flexion simple et aux essais du retrait et gonflement.

Pour le béton, des éprouvettes cubiques (10x10x10) cm<sup>3</sup> ont été réalisées pour les essais de compression, d'absorption d'eau par immersion, de durabilité et de ramollissement, des prismes (10x10x40) cm<sup>3</sup> pour les essais de flexion simple et les essais de déformabilité. La confection des éprouvettes est faite conformément aux normes NF P 18-404 et 405.

Les moules contenant les échantillons sont couverts de film en plastique et stockés dans l'environnement de laboratoire. Le démoulage est effectué après une durée de 24h et les

échantillons sont conservés au laboratoire dans l'eau sous une température de  $20^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$  jusqu'au jour de l'échéance. Il est à noter que pour les différents mélanges de mortier et béton, trois éprouvettes par échéance ont été utilisées pour effectuer l'essai, soit 28 jours.

## 2.9. Malaxage du béton

Le malaxage du béton est effectué selon la norme NF P 18-404.

Les constituants sont introduits dans la cuve dans l'ordre suivant :

- ✓ Placer les gros graviers, liant (ciment + ajout) et le sable.
- ✓ Malaxer à sec pendant 1mn.
- ✓ Ajouter l'eau d'une façon uniforme et malaxer pendant 2mn (pour les bétons avec adjuvant le superplastifiant est introduit dans la deuxième partie d'eau de gâchage et malaxé pendant 30 secondes - voir la fiche technique-).
- ✓ Directement après le malaxage on remplit les moules à raison de deux couches, la vibration est effectuée à l'aide d'une table vibrante.
- ✓ Enfin araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle.
- ✓ Les éprouvettes sont ensuite maintenues dans le moule pendant 24 heures.
- ✓ Après démoulage, les éprouvettes sont pesées et conservées dans l'eau à  $20 \pm 2^{\circ} \text{C}$  jusqu'à la date d'essai.

## 2.10. Programme des essais

### 2.10.1. Ouvrabilité

Pour le mortier, l'ouvrabilité a été mesurée par la table à secousses conformément aux normes NF P 18-452 et NF P 15-437. Le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 30 chocs en 30 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en mm (**Figure 2.6**) est donné par la formule:

$$E = \frac{D_1 - D_2}{2} \text{ mm} ; \quad \text{avec } D_r = \text{diamètre final et } D_i = \text{diamètre initial 100 mm}.$$

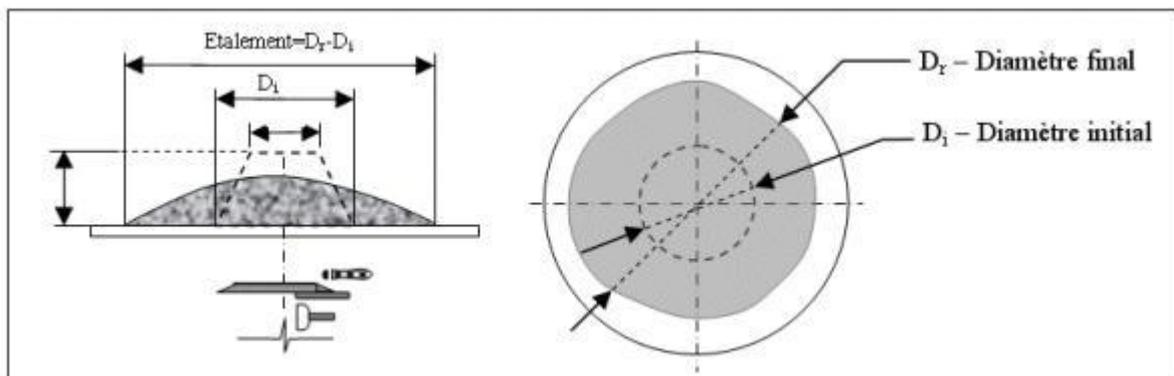


Figure 2.6 : Table à secousses

Le contrôle de l'ouvrabilité des bétons est effectué grâce à l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (Slump test – NF P 18-451), (**photo 2.5**). Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide. Cet essai consiste à remplir le cône en trois couches tassées avec une tige d'acier pointue de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche, puis soulever le moule avec précaution et mesurer l'affaissement en cm.

Les mesures sont évidemment quelque peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la consistance d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au **tableau 2.16**. [21]

**Tableau 2.16** : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône. [21]

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	$\pm 1$ cm
Plastique P	5 à 9	$\pm 2$ cm
Très plastique TP	10 à 15	$\pm 3$ cm
Fluide Fl	$\geq 16$	



**Photo 2.5** : Essai du Slump-test.

### 2.10.2. Essai de la résistance à la compression

Cet essai a été effectué sur une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et cela conformément à la norme NF P 18-406 et à la norme EN 196-1. Pour les différents mélanges de mortier et béton, trois éprouvettes par échéance ont été utilisés pour effectuer l'essai, soit après 28 jours de cure (**photo 2.6**).



**Photo 2.6** : Eprouvettes cubiques (10x10x10) cm<sup>3</sup>.

### 2.10.3. Essai de traction par flexion

L'essai a été effectué selon la norme NF P 18 – 407 et à la norme EN 196-1. Les éprouvettes sont testées après une cure de 28 jours dans l'eau. On a pris la moyenne de trois éprouvettes pour chaque type de béton (**photo 2.7**).



**Photo 2.7** : Eprouvettes prismatiques (10x10x40) cm<sup>3</sup>.

### 2.10.4. Essai d'absorption d'eau par immersion

L'absorption par immersion consiste à mettre les éprouvettes du béton dans l'étuve et de les peser jusqu'à poids constant, ensuite les immerger totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24h c'est-à-dire jusqu'à saturation du matériau.

### 2.10.5. Coefficient de ramollissement

Le coefficient de ramollissement est le rapport de la résistance à la compression d'un matériau saturé d'eau  $R_{sat}$  à la résistance à la compression du matériau sec  $R_{sec}$ . Pour les matériaux dont le coefficient de ramollissement est égal ou supérieur à 0.80 sont considérés comme résistant à l'eau. Les résistances  $R_{sat}$  et  $R_{sec}$  sont mesurées sur éprouvettes cubiques 10x10x10<sup>3</sup> cm à 28 jours d'âge.

### 2.10.6. Essai du retrait et gonflement

Le retrait est un facteur très important dans la pratique, car il entraîne souvent l'apparition de fissures qui peuvent nuire à la durabilité du béton. La présence des éléments fins engendre des modifications dans le squelette solide vis-à-vis de la déformation (retrait) du mortier. Cet essai consistera à mesurer le retrait et le gonflement sur des différents mortiers à base de sable de carrière. Les mesures et les observations sont faites au cours de cet essai portent sur la mesure du retrait et du gonflement des mortiers sur prismes 4x4x16 cm<sup>3</sup> sur une période de 28 jours.

### 2.10.7. Essai de Durabilité

Afin de caractériser d'une façon générale la durabilité du béton à base de sable concassé et tenant en compte la nature du climat sévère de notre région qui se distingue par un écart très important des températures entre l'hiver et l'été avec en particulier de très hautes températures en ce dernier, on a opté d'exposer des éprouvettes de ce béton à des ambiances cycliques de température simulant ainsi notre climat. Cet essai a pour but d'apprécier l'endurance du ce type du béton par estimation d'une éventuelle chute sa la résistance à la compression.

Des éprouvettes alors, à l'âge de 28 jours, ont été mises à une température de 60 °C pendant 24h, ensuite laissées refroidir naturellement pendant 24h, formant ainsi un cycle. Au bout de 20 cycles, ces éprouvettes y compris témoin ont été écrasées. Les résistances à la compression issues de cet essai nous ont données une idée sur la durabilité du béton à base de sable concassé.

### 2.10.8. Essai de déformabilité et module d'élasticité

Pour pouvoir étudier l'influence d'utilisation du sable de concassé sur la déformabilité du béton à 60 jours, on a réalisé huit types de béton à partir des quatre types de sable à savoir : sable de carrière sans modification, sable de carrière tamisé au tamis 0.16 mm, sable de carrière lavé et sable d'oued (comme témoin) , soit quatre béton dosé à 350 Kg/m<sup>3</sup> en ciment et avec un rapport E/C de 0,5 et quatre autres du même dosage en ciment et avec un rapport E/C de 0,6 . Chaque type comprend trois échantillons prismatiques (10×10×40) cm<sup>3</sup>.

Les essais ont été effectués à 60 jours du durcissement, la déformation a été mesurée au moyen de comparateurs à cadran ayant la valeur d'une division de 0.01 mm qui sont installés à l'aide de cadres appropriés sur une distance de 200 mm dans le sens longitudinal et de 100 mm dans le sens transversal. (Photo 2.8).

**Photo 2.8** : Essai de déformabilité sur éprouvette prismatique (10×10×40) cm<sup>3</sup>.



### 2.11. Conclusion

Les essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers et bétons qui seront étudiés au chapitre suivant à l'état frais et à l'état durci.. La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux.

## Chapitre 3 : ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 3.1. Introduction

Nous présenterons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les mortiers et bétons confectionnés selon les différentes compositions mentionnées en détail dans le chapitre précédent. Ces résultats concernant en première partie le mortier, et en deuxième partie le béton. La résistance et l'ouvrabilité sont à étudier de pair, car ces deux propriétés sont étroitement dépendantes l'une de l'autre et d'autant plus, qu'elles varient en sens inverses en fonction de certains facteurs essentiels de la composition du béton.

On s'intéresse aussi, tout au long de ce chapitre à l'effet d'incorporation de l'ajout de la pouzzolane et d'un adjuvant superplastifiant sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers et bétons à l'état frais et durci à base de sable de carrières.

A l'issu de ces résultats, des discussions et des interprétations seront présentées au fur et à mesure.

### 3.2. Propriétés des mortiers frais

#### 3.2.1. Consistance des mortiers frais

Les résultats d'étalement issus de l'essai de l'ouvrabilité des différents mortiers mesurés par la table à secousses sont portés dans le **tableau 3.1**.

**Tableau 3.1** : Etalement des différents types de mortiers.

Type de mortier	E/C	Dosage en Kg/m <sup>3</sup>		
		300	350	400
		Etalement en mm		
Mtm	0,65	120	124	150
MS		103	104	110
MT		104	106	124
ML		105	109	140
MS	0,70	105	106	130
MT		106	108	140
ML		108	117	162
MS	0,75	108	118	152
MT		110	126	160
ML		112	134	172

D'après les **figures 3.1 à 3.3**, on constate que pour tous les types de mortiers, l'ouvrabilité croit en augmentant le dosage en ciment à un rapport E/C constant, et elle croit aussi en

augmentant le rapport E/C à un dosage donné. L'ouvrabilité des différents types de mortiers peut être classé par ordre croissant comme suivant : MS, MT, ML et Mtm. Cela s'explique par la nature du sable utilisé. Le sable d'oued (alluvionnaire) utilisé comme témoin donne au mortier la meilleure ouvrabilité à cause de la forme arrondie ou roulée de ses grains qui confère au mortier frais une maniabilité élevée ; tandis que le sable de carrières donne des mortiers de moindre ouvrabilité du fait de l'angularité de ses grains ainsi qu'à leur forme allongée et le taux plus au moins élevé des particules fines (fillers). Pour les trois types de mortiers (MS, MT, ML), l'ouvrabilité est d'autant plus moindre que le pourcentage des fines est plus important. Notons que le mortier le moins maniable est celui à base de sable de carrières sans modification (MS).

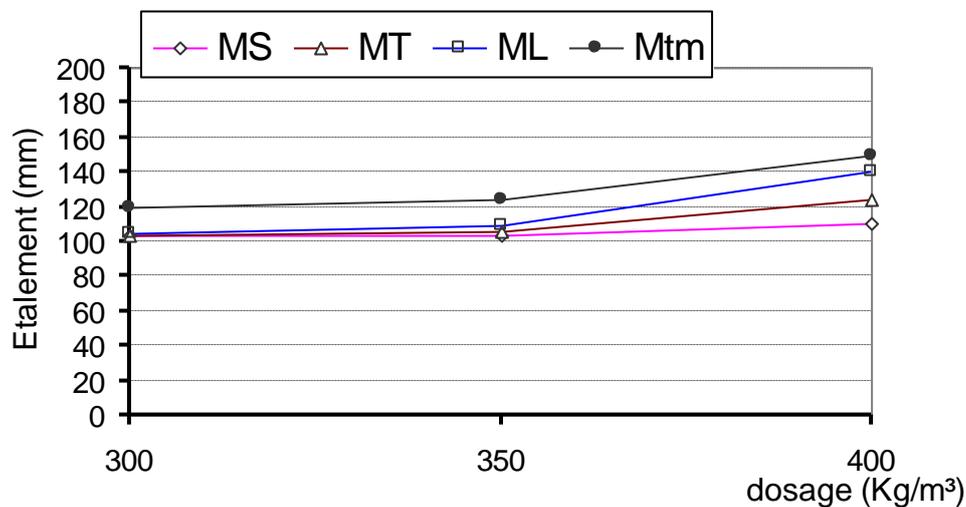


Figure 3.1 : Etalement des différents types de mortier en fonction du dosage pour un rapport E/C 0,65

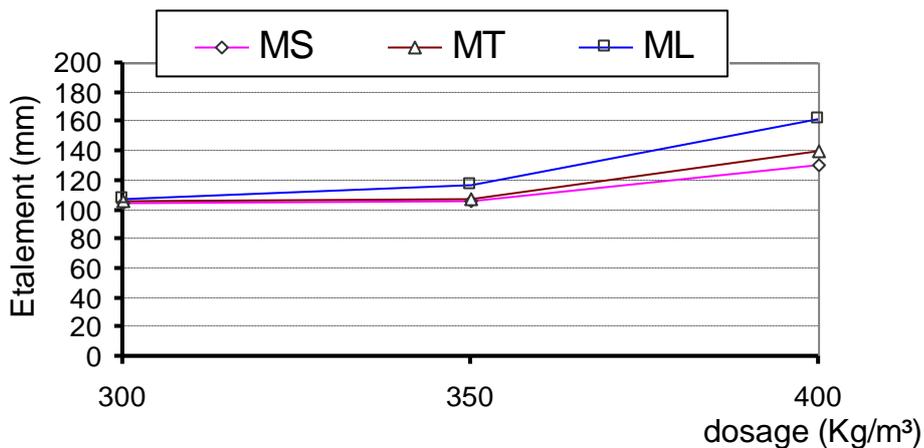
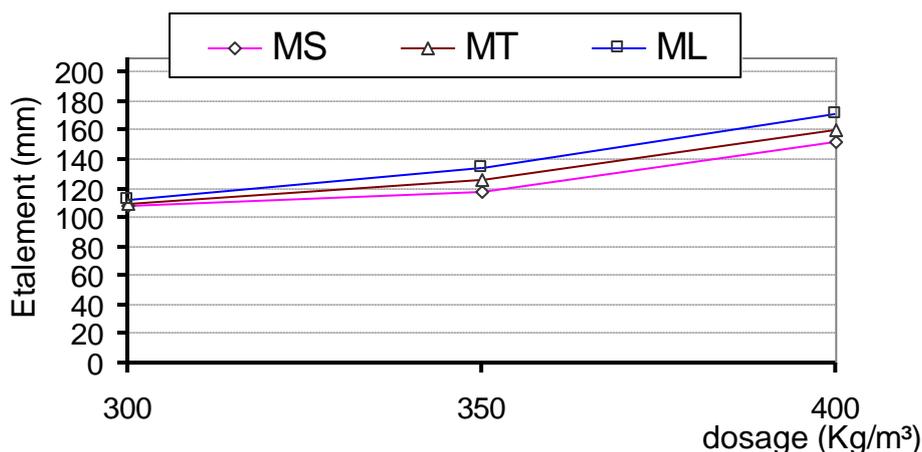


Figure 3.2 : Etalement des différents types de mortier en fonction du dosage pour un rapport E/C 0,70



**Figure 3.3 :** Etalement des différents types de mortier en fonction du dosage pour un rapport E/C 0,75

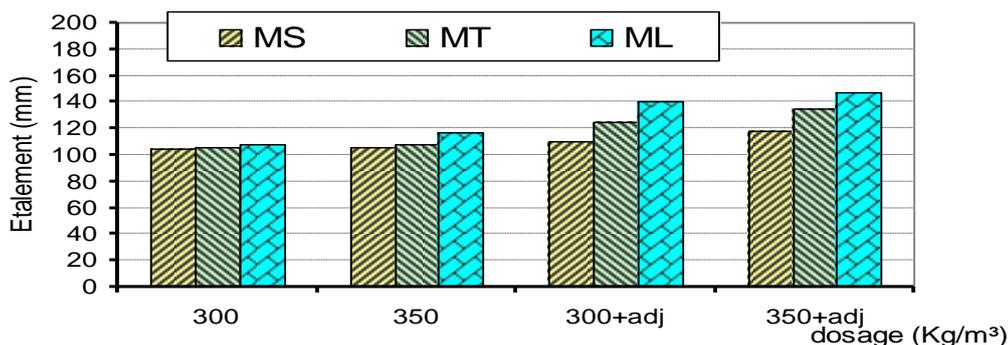
### 3.2.2. Effet du superplastifiant et de la pouzzolane

Afin d'améliorer l'ouvrabilité des mortiers à base de sable de carrières, on a vu nécessaire d'incorporer un pourcentage de 0.5% d'un adjuvant fluidifiant (superplastifiant) et 10% de la pouzzolane naturelle. Les résultats de cet essai sont illustrés dans le **tableau 3.2** pour le rapport E/C = 0.70 et les dosages en ciment de 300 et 350 Kg/m<sup>3</sup>.

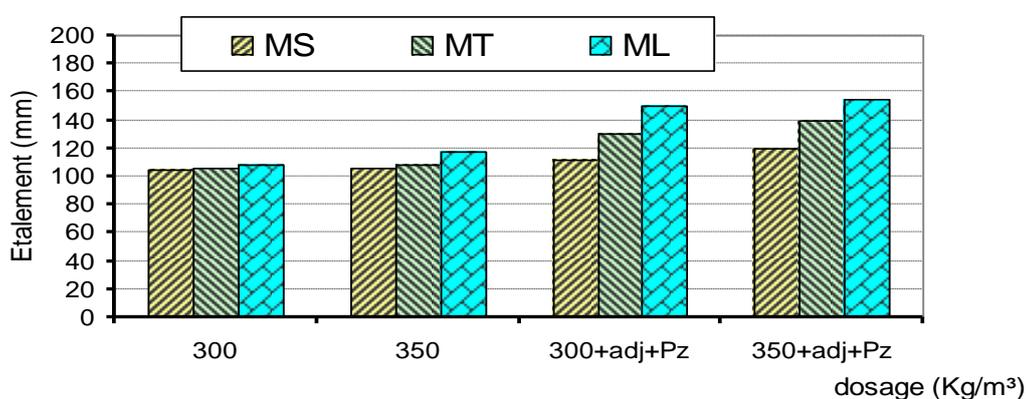
**Tableau 3.2 :** Etalement des différents types de mortiers avec ajouts (adj+Pz) pour E/C=0.70.

Type de mortier	E/C	Dosage en Kg/m <sup>3</sup>	
		300	350
		Etalement en mm	
MS +adj	0,70	110	118
MT+adj		125	135
ML +adj		140	147
MS +adj+Pz		112	120
MT+adj+Pz		130	140
ML+adj+Pz		150	155

D'après la **figure 3.4**, en incorporant du superplastifiant, on remarque une amélioration importante d'ouvrabilité pour les trois types de mortiers adjuvantés à base de sable de carrières, en comparaison avec celle des mêmes mortiers non adjuvantés. Cela est dû à la nature dispersante du superplastifiant qui casse les agglomérats formés par les grains du ciment emprisonnant une certaine quantité d'eau qui n'est plus alors disponible pour donner de l'ouvrabilité au mélange. Le rôle du superplastifiant est donc de casser ces agglomérats pour rendre cette eau disponible. Cependant, pour les mortiers adjuvantés avec pouzzolane à base de sable de carrières, une amélioration de plus a été observé dans leur ouvrabilité selon la **figure 3.5**.



**Figure 3.4 :** Etalement des différents types de mortier adjuvanté (avec superplastifiant) et non adjuvanté pour les dosages de 300 et 350Kg/m³ et avec un rapport E/C 0,70.



**Figure 3.5 :** Etalement des différents types de mortier adjuvanté avec pouzzolane et non adjuvanté sans pouzzolane pour les dosages de 300 et 350Kg/m³ et avec un rapport E/C 0,70.

### 3.3. Propriétés des mortiers durcis

#### 3.3.1. Résistance à la compression

Les résultats des essais de la résistance à la compression pour les différents types de mortiers à différents dosages et rapports E/C sont illustrés dans le **tableau 3.3** suivant.

**Tableau 3.3 :** Résistance à la compression des différents types de mortier à 28j

Dosage en ciment (Kg/m³)	Rapport E/C	Résistance à la compression des différents types de mortier à 28j (MPa)			
		Mtm	MS	MT	ML
300	0,65	23,6	29,1	24,8	20,9
	0,70	-	27,7	22,4	17,6
	0,75	-	24,0	16,7	13,3
350	0,65	26,2	33,6	28,0	24,5
	0,70	-	30,2	24,7	21,4
	0,75	-	26,0	19,8	15,5
400	0,65	28,3	36,0	31,5	27,0
	0,70	-	32,5	28,1	24,7
	0,75	-	29,8	23,6	19,5

D'après les figures 3.6 à 3.8, on peut observer que, pour tous les types de mortiers, la résistance à la compression croît en augmentant le dosage en ciment à un rapport E/C constant, et elle croît aussi en augmentant le rapport E/C à un dosage donné. Elle peut être classé par ordre croissant comme suivant : ML, MT, MS pour les mortiers à base de sable de carrières. Cela est dû probablement à l'effet granulaire des fines calcaires contenus dans le sable de carrières à des différents pourcentages, ces fines font densifier le squelette granulaire en remplissant les vides ce qui fait diminuer la porosité, et par conséquent une augmentation de la résistance à la compression. D'autre part, en comparant les résistances des mortiers MS, MT et ML avec le témoin Mtm, on peut conclure que le mortier à base de sable de carrières ne se distingue pas de celui à base de sable d'oued (témoin) du point de vue résistance mécanique.

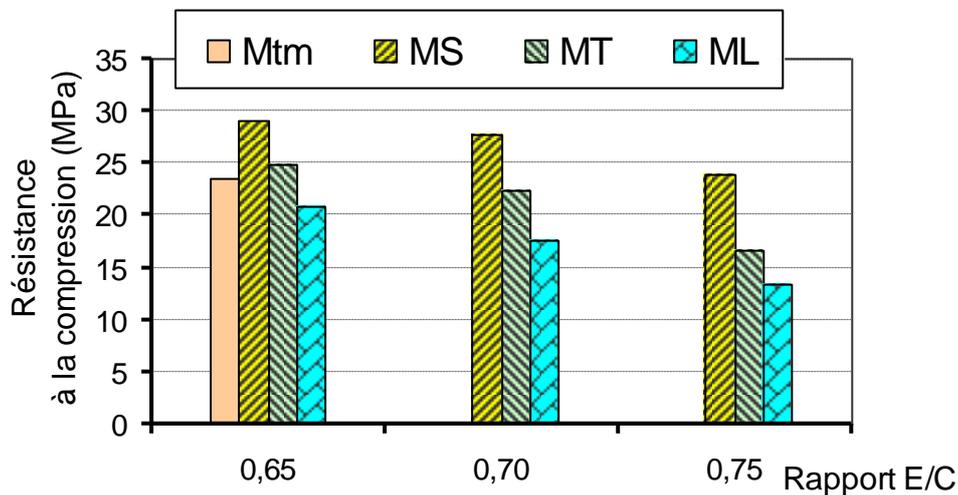


Figure 3.6 : Résistance à la compression des différents types de mortier en fonction du rapport E/C pour un dosage de 300 Kg/m³ à 28j

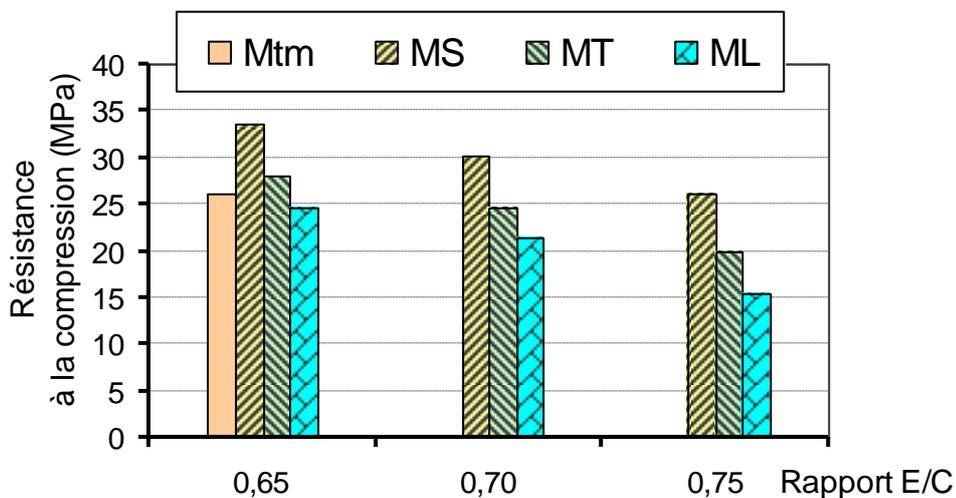
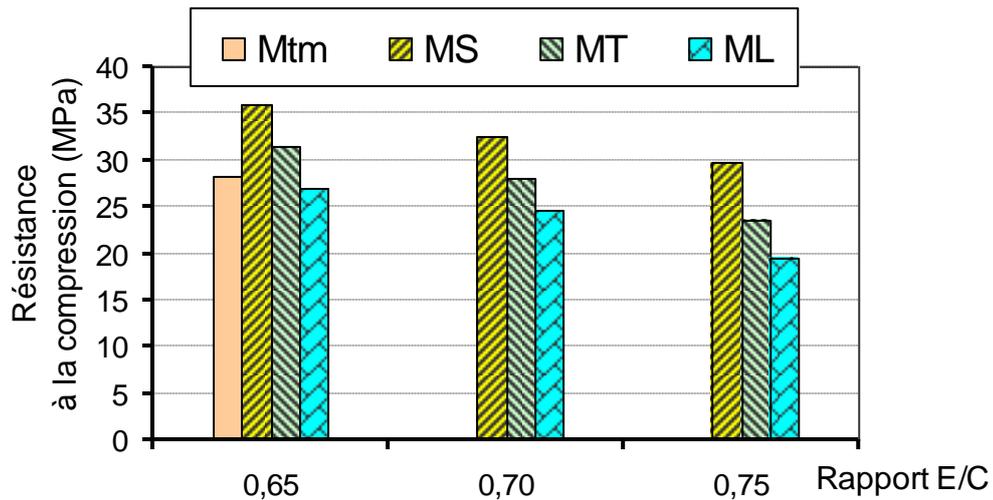


Figure 3.7 : Résistance à la compression des différents types de mortier en fonction du rapport E/C pour un dosage de 350 Kg/m³ à 28j.



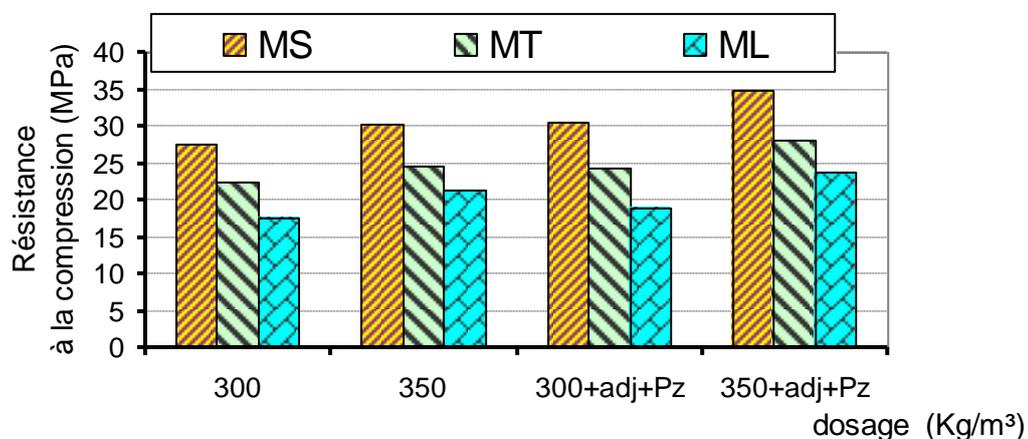
**Figure 3.8 :** Résistance à la compression des différents types de mortier en fonction du rapport E/C pour un dosage de 400 Kg/m<sup>3</sup> à 28j.

### 3.3.2. Effet du superplastifiant et de la pouzzolane

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques des mortiers, on a incorporé 0.5% du superplastifiant plus ajout de 10 % de la pouzzolane en substitution. Le **tableau 3.4** montre les résultats de la résistance à la compression des différents types de mortier à base de sable concassé pour les dosages de 300 et 350 Kg/m<sup>3</sup> avec un rapport E/C 0.70 à 28 jours.

**Tableau 3.4 :** Résistance à la compression des différents types de mortier adjuvanté plus pouzzolane pour les dosages de 300 et 350 Kg/m<sup>3</sup> et avec un rapport E/C 0,70 à 28j.

Rapport E/C	Dosage en ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Résistance à la compression des différents types de mortier à 28j (MPa)		
		MS	MT	ML
0,70	300	33,2	26,9	20,8
	350	38,0	30,1	25,9



**Figure 3.9 :** Résistance à la compression des différents types de mortier adjuvanté plus pouzzolane et non adjuvanté sans pouzzolane pour les dosages de 300 et 350 Kg/m<sup>3</sup> et avec un rapport E/C 0,70 à 28j.

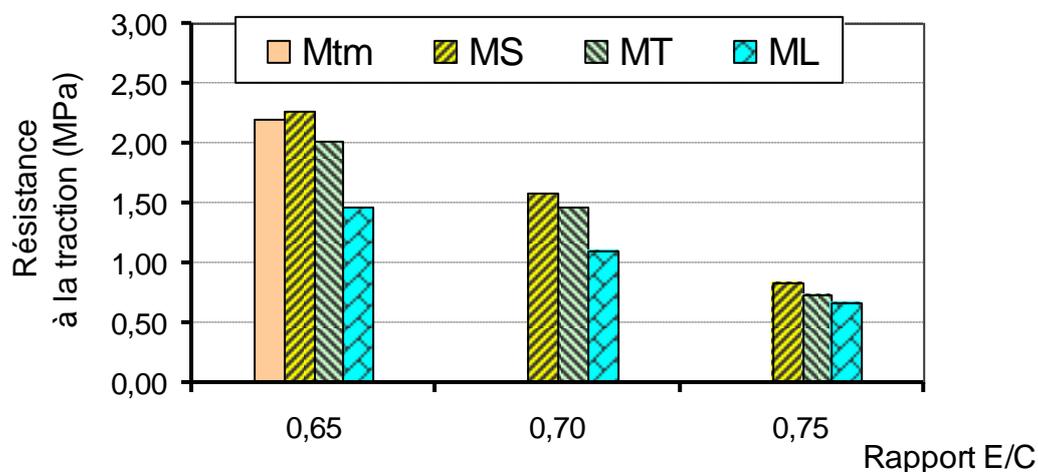
D'après la **figure 3.9**, on remarque une amélioration dans les résistances à la compression des mortiers (MS, MT et ML) adjuvantés plus pouzzolane en comparaison avec celles des mêmes mortiers non adjuvantés sans pouzzolane. Cette augmentation varie de 8 à 15% selon le type et le dosage des mortiers. Probablement, cette augmentation de résistance est due à l'effet du superplastifiant et à l'effet de la pouzzolane.

### 3.3.3. Résistance à la traction par flexion

Les résultats des essais de la résistance à la traction par flexion pour les différents types de mortiers à différents dosages et rapports E/C sont illustrés dans le **tableau 3.5** suivant.

**Tableau 3.5** : Résistance à la traction des différents types du mortier

Dosage en ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Rapport E/C	Résistance à la traction des différents types de mortier à 28j (MPa)			
		Mtm	MS	MT	ML
300	0,65	2,20	2,26	2,02	1,47
	0,70	-	1,58	1,47	1,10
	0,75	-	0,84	0,73	0,66
350	0,65	2,39	2,57	2,31	1,84
	0,70	-	1,65	1,54	1,39
	0,75	-	1,10	0,99	0,70
400	0,65	2,72	2,86	2,39	2,20
	0,70	-	2,02	1,76	1,47
	0,75	-	1,39	1,10	0,77



**Figure 3.10** : Résistance à la traction des différents types de mortier en fonction du rapport E/C pour un dosage de 300 Kg/m<sup>3</sup> à 28j.

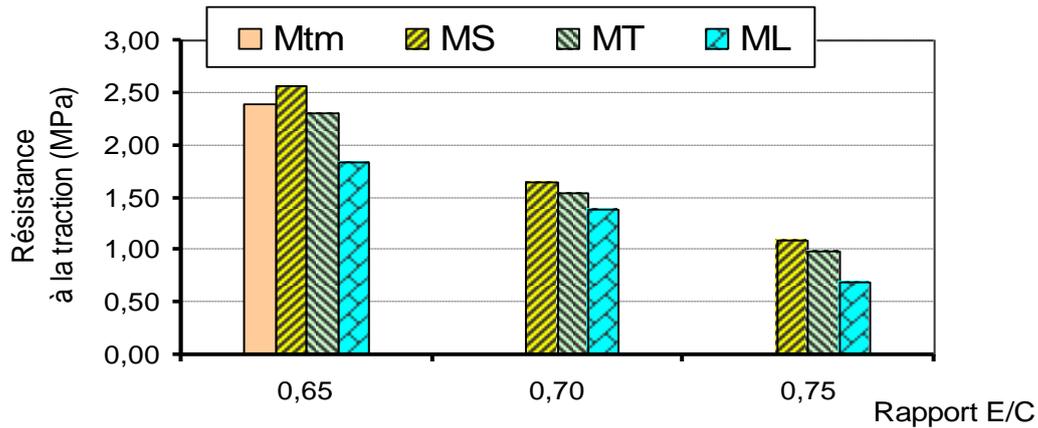


Figure 3.11 : Résistance à la traction des différents types de mortier en fonction du rapport E/C pour un dosage de 350 Kg/m³ à 28j.

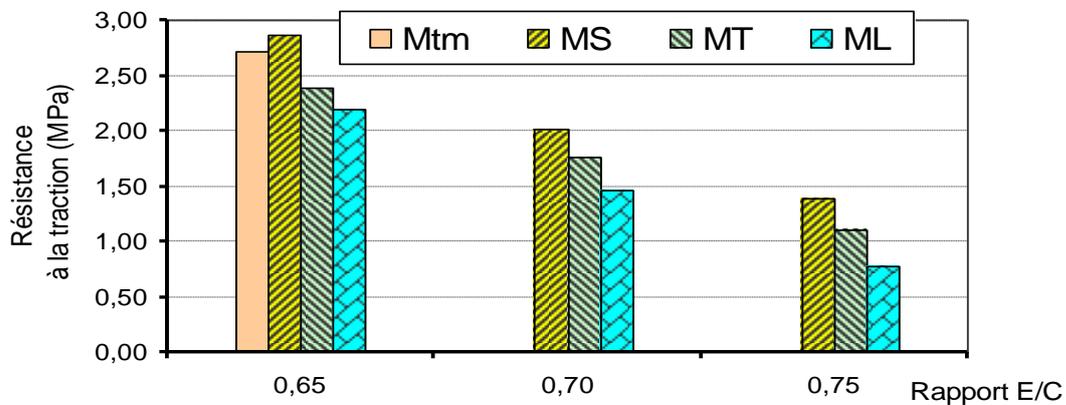


Figure 3.12 : Résistance à la traction des différents types de mortier en fonction du rapport E/C pour un dosage de 400 Kg/m³ à 28j.

D’après les figures 3.10 à 3.12, on remarque que la résistance à la traction des différents mortiers a la même allure que dans le cas de la résistance à la compression. Alors, les mêmes observations et conclusions mentionnées précédemment dans le cas de la résistance à la compressions, sont applicables dans le cas de la résistance à la traction.

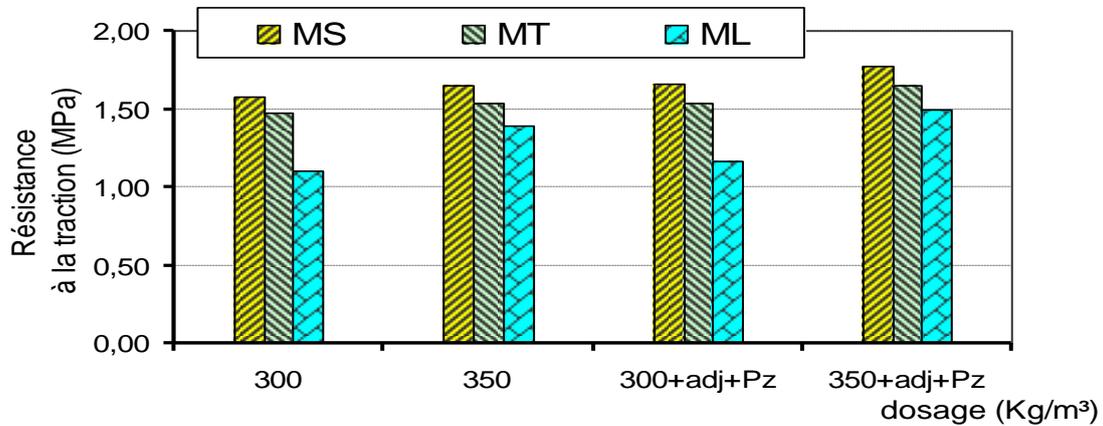
### 3.3.4. Effet du superplastifiant et de la pouzzolane

Le tableau 3.6 montre les résultats de la résistance à la traction des différents types de mortier à base de sable concassé adjuvanté plus pouzzolane pour les dosages de 300 et 350 Kg/m³ avec un rapport E/C 0.70 à 28 jours.

Tableau 3.6 : Résistance à la traction des différents types de mortier adjuvanté plus pouzzolane pour les dosages de 300 et 350 Kg/m³ et avec un rapport E/C 0,70 à 28j.

Rapport E/C	Dosage en ciment (Kg/m3)	Résistance à la traction des différents types de mortier à 28j (MPa)		
		MS	MT	ML
0,70	300	1,66	1,54	1,16
	350	1,77	1,65	1,49

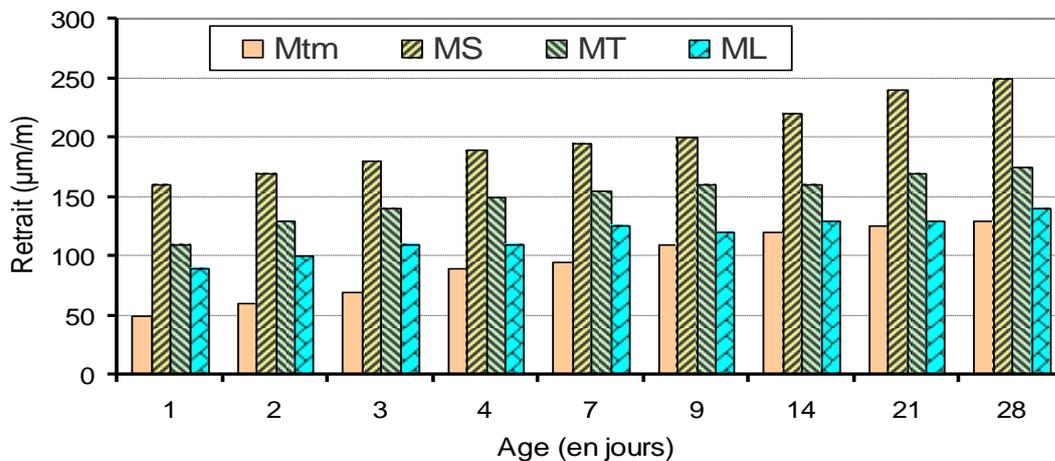
D’après la **figure 3.13**, une amélioration des résistances à la traction est bien remarquée, cela est pour tous les types de mortiers à base de sable de carrières. L’augmentation de ces résistances est de l’ordre de 5 à 11 % par rapport à celle des mortiers non adjuvantés sans pouzzolane.



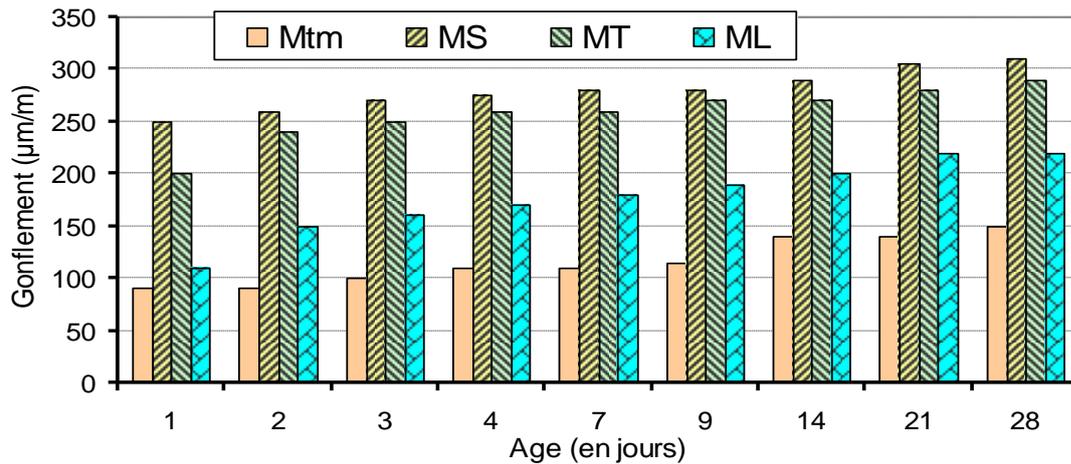
**Figure 3.13 :** Résistance à la traction des différents types de mortier adjuvanté plus pouzzolane et non adjuvanté sans pouzzolane pour les dosages de 300 et 350 Kg/m<sup>3</sup> et avec un rapport E/C 0,70 à 28j.

### 3.4. Retrait et gonflement

Les résultats obtenus du retrait à l’air libre et du gonflement à l’eau nous ont permis de tracer les graphes des **figures 3.14 et 3.15**. D’après ces dernières, il est bien remarqué que les mortiers à base de sable de carrières présentent des retraits (gonflement aussi) plus élevés que ceux des mortiers à sable d’oued. Ce retrait est d’autant plus important que le taux des fines est élevé, par conséquent le mortier MS a la valeur la plus haute du retrait malgré qu’il présente la meilleure résistance à la compression. De ce fait, on peut faire un compromis entre résistance à la compression élevée d’une part et retrait moindre d’une autre part, en choisissant le mortier MT.



**Figure 3.14 :** Evolution du retrait à l’air des différents types de mortier en fonction du temps pour un dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et un rapport E/C = 0,70.



**Figure 3.15 :** Evolution du gonflement à l'eau des différents types de mortier en fonction du temps pour un dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et un rapport E/C = 0,70

### 3.5. Propriétés des bétons frais

#### 3.5.1. Consistance des bétons frais

La consistance des différents types du béton à l'état frais a été fait par l'essai d'affaissement (Slump test) au cône d'Abrams, tandis que pour les bétons qui ne donnent aucun affaissement leur consistance a été mesurée par l'essai Vébé. Les résultats de consistance des différents types de béton mesurée par les deux méthodes sont portés sur le **tableau 3.7** suivant.

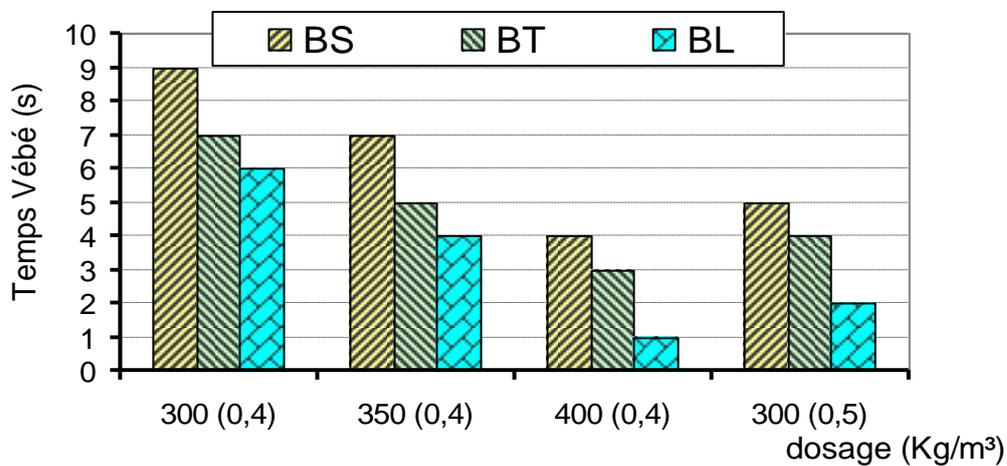
**Tableau 3.7 :** Affaissement et temps Vébé des différents types de béton.

Type du béton	Rapport E/C	Type d'essai	Dosage en ciment (Kg/m <sup>3</sup> )		
			300	350	400
BS	0,4	Temps Vébé (s)	9	7	4
BT			7	5	3
BL			6	4	1
Btm	0,5	Slump (cm)	0 (0 s)	2,5	9
BS			0 (5 s)	0,5	4
BT			0 (4 s)	1	5
BL			0 (2 s)	1,5	8
BS	0,6		1	10	15
BT			2	12	17
BL			5	14	20

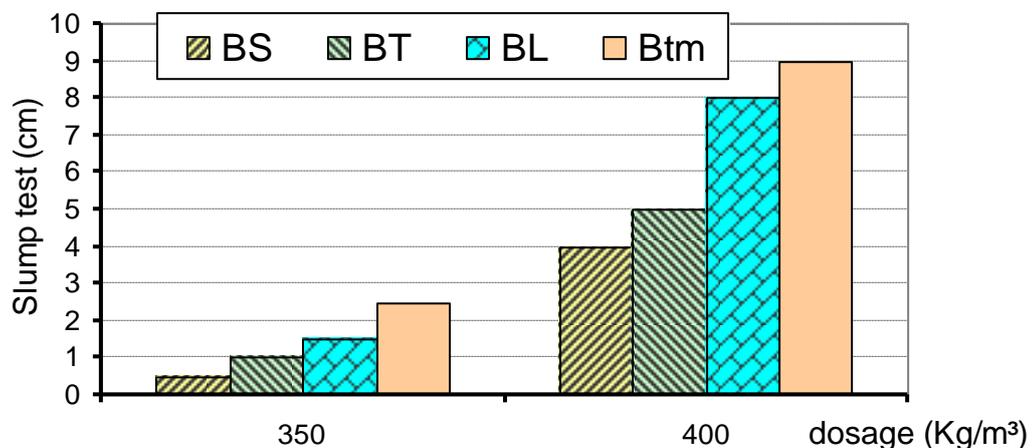
En observant les **figures 3.16 à 3.18**, on constate que , pour tous les types de bétons, l'ouvrabilité croit en augmentant le dosage en ciment à un rapport E/C constant, et elle croit aussi en augmentant le rapport E/C à un dosage donné. L'ouvrabilité des différents types de bétons peut être classé par ordre croissant comme suivant : BS, BT, BL et Btm. En variant le

rapport E/C, les bétons à base de sable de carrières sont fermes au dosage de 300 Kg/m<sup>3</sup>, de ferme à plastique au dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup>, de ferme à fluide au dosage 400 Kg/m<sup>3</sup>. Cela s'explique par le pourcentage des fines dans le sable utilisé (voir § 3.2.1); Pour les trois types de bétons (BS, BT, BL), l'ouvrabilité est d'autant plus moindre que le pourcentage des fines est plus important. Notons que le béton le moins maniable est celui à base de sable de carrières sans modification (MS), par contre le plus maniable est celui à base de sable d'oued.

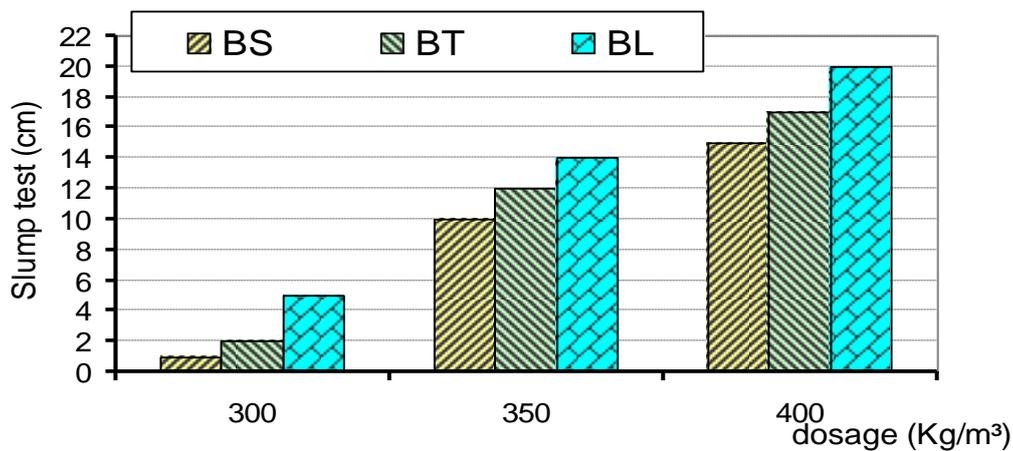
On peut conclure alors que le sable d'oued a l'avantage de nous fournir une ouvrabilité élevée à cause de la forme arrondie ou roulée de ses grains, tandis que le sable de carrières présente un inconvénient en donnant des bétons de moindre ouvrabilité du fait de l'angularité de ses grains ainsi qu'à leur forme allongée et le taux plus au moins élevé des particules fines.



**Figure 3.16 :** Evolution de la consistance des différents types de béton en fonction du dosage avec un rapport E/C 0,4, ainsi pour le dosage de 300 Kg/m<sup>3</sup> avec un rapport E/C 0,5.



**Figure 3.17 :** Evolution de la consistance des différents types de béton pour les dosages 350 et 400 Kg/m<sup>3</sup> avec un rapport E/C 0,5.



**Figure 3.18 :** Evolution de la consistance des différents types de béton en fonction du dosage avec un rapport E/C 0,6.

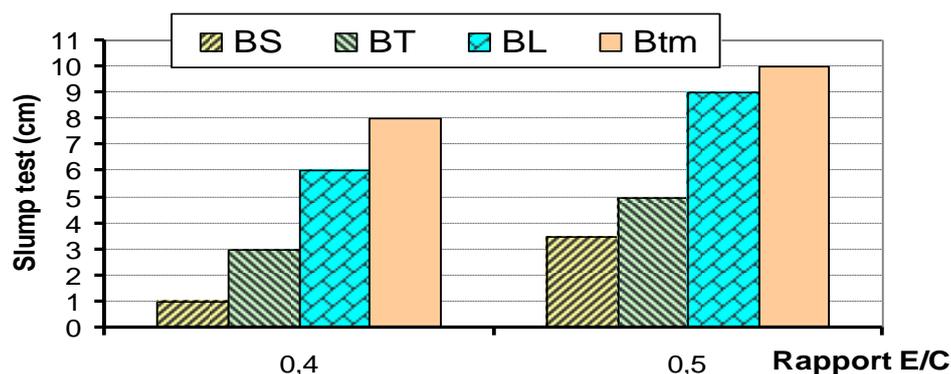
**3.5.2. Effet du superplastifiant et de la pouzzolane**

Vu la mauvaise ouvrabilité des bétons à base de sable de carrières, l’incorporation d’un adjuvant fluidifiant (0.5% d’un superplastifiant) et l’ajout de 10% de la pouzzolane naturelle s’avèrent nécessaires et indispensables. Les résultats de cet essai sont illustrés dans le **tableau 3.8** pour le rapport E/C = 0.5 et le dosage en ciment 350 Kg/m³.

**Tableau 3.8 :** Consistance des différents types de bétons avec ajouts (adj+Pz) pour E/C=0.5.

Type du béton	Dosage en ciment (Kg/m³)	Type d'essai	Rapport E/C	
			0.4	0.5
Btm	350	Slump (cm)	8	10
BS			1	3,5
BT			3	5
BL			6	9

D’après la **figure 3.19**, en incorporant du superplastifiant avec de la pouzzolane, on remarque une amélioration significative d’ouvrabilité pour les trois types de bétons adjuvantés à base de sable de carrières, en comparaison avec celle des mêmes bétons non adjuvantés et sans ajout. Cela est dû à la nature dispersante du superplastifiant qui casse les agglomérats formés par les grains du ciment emprisonnant une certaine quantité d’eau qui n’est plus alors disponible pour donner de l’ouvrabilité au mélange. Le superplastifiant a donc un effet très bénéfique sur l’ouvrabilité des bétons à base de sable de carrières ; en outre, l’ajout de la pouzzolane à un taux de 10 % en substitution au ciment semble avoir d’influence sur l’ouvrabilité de ces genres de béton.



**Figure 3.19 :** Evolution de la consistance des différents types de béton adjuvanté avec pouzzolane en fonction des rapports E/C 0,4 et 0,5 pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup>.

### 3.6. Propriétés des bétons durcis

#### 3.6.1. Résistance à la compression

Les résultats des essais de la résistance à la compression pour les différents types de bétons à différents dosages et rapports E/C sont donnés au **tableau 3.9**.

**Tableau 3.9 :** Résistance à la compression des différents types de béton à 28j

Dosage en ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Rapport E/C	Résistance à la compression des différents types de béton à 28j (MPa)			
		Btm	BS	BT	BL
300	0,4	-	35,0	32,0	29,5
	0,5	34,5	33,0	31,0	28,2
	0,6	-	27,4	23,0	22,2
350	0,4	-	40,0	33,4	31,0
	0,5	37,0	38,0	31,5	29,0
	0,6	-	28,4	27,5	23,6
400	0,4	-	42,0	35,0	31,5
	0,5	39,0	40,0	32,8	29,8
	0,6	-	30,0	28,9	24,5

D'après les **figures 3.20 à 3.22**, on remarque que l'allure de l'évolution de la résistance à la compression des différents types de bétons ne se différencie pas de celle des mortiers discutés précédemment. Alors, pour tous les types de bétons, la résistance à la compression des bétons croît en augmentant le dosage en ciment à un rapport E/C constant, et elle croît aussi en augmentant le rapport E/C à un dosage donné. Elle peut être classé par ordre croissant comme suivant : BL, BT, BS pour les bétons à base de sable de carrières. Cela s'explique comme le cas des mortiers, par l'effet granulaire des fines calcaires contenus dans le sable de carrières à des différents pourcentages, ces fines font densifier le squelette granulaire en remplissant les vides ce qui fait diminuer la porosité, et par conséquent une augmentation de la résistance à la compression. On peut alors déduire que l'existence d'une certaine quantité des fines est une

nécessité pour avoir une meilleure résistance mécanique. D'autre part, en comparant les résistances des bétons BS, BT et BL avec le témoin Btm, on peut apercevoir, en particulier, que les résistances du béton BS sont plus au moins supérieures que celle du béton Btm témoin ; tandis que celles des autres bétons BT et BL sont plus inférieures. On peut conclure donc, que le béton à base de sable de carrières ne se distingue pas de celui à base de sable d'oued (témoin) du point de vue résistance mécanique, ce qui confirme les résultats trouvés par plusieurs chercheurs.

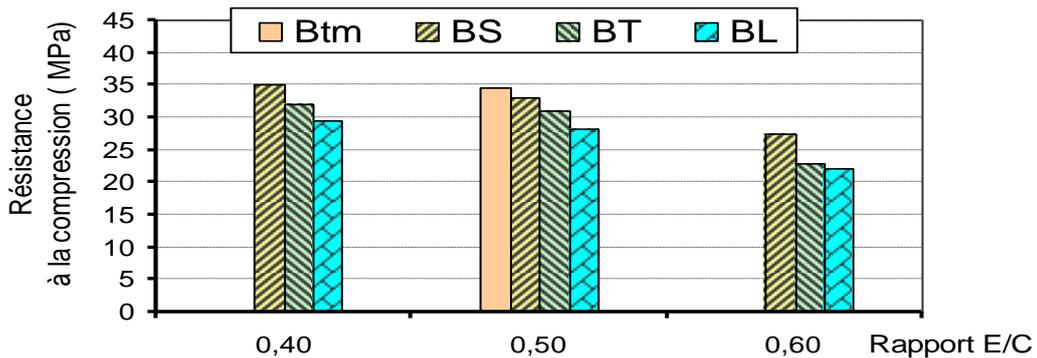


Figure 3.20 : Résistance à la compression des différents types de béton pour un dosage de 300 Kg/m<sup>3</sup> à 28j.

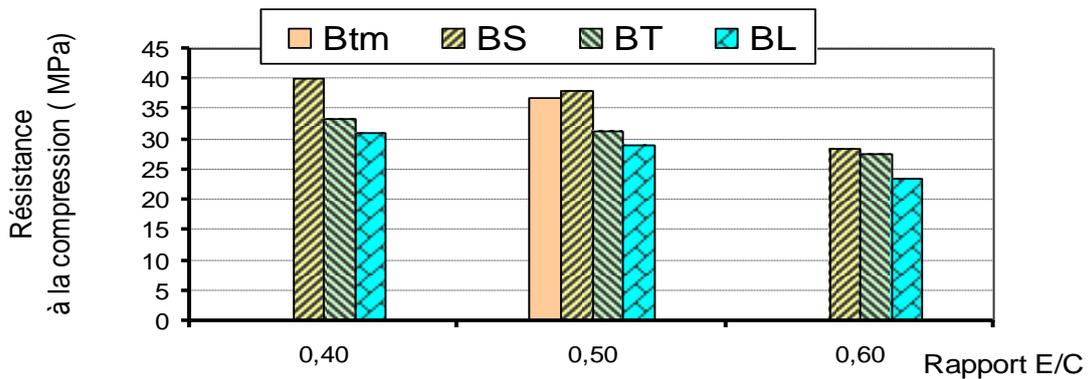


Figure 3.21 : Résistance à la compression des différents types de béton pour un dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> à 28j.

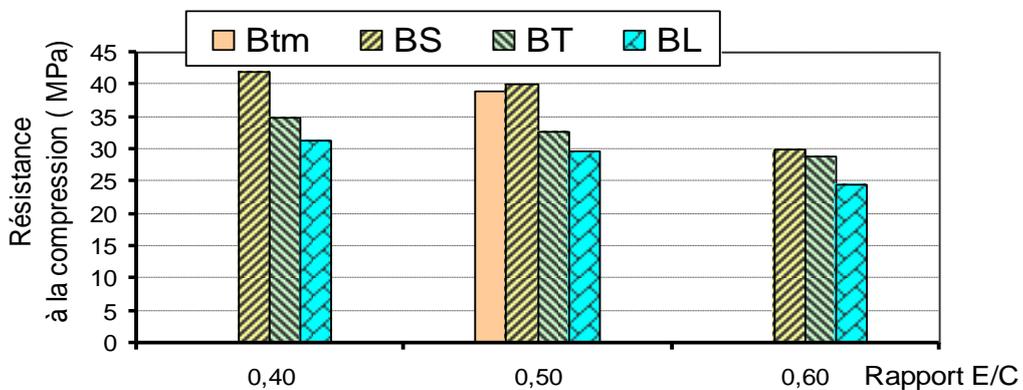


Figure 3.22 : Résistance à la compression des différents types de béton pour un dosage de 400 Kg/m<sup>3</sup> à 28j.

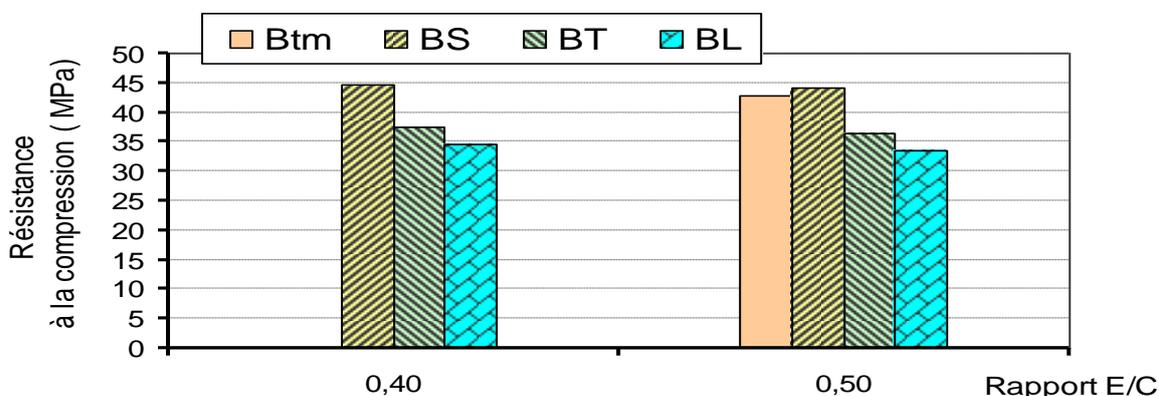
### 3.6.2. Effet du superplastifiant et de la pouzzolane

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques des bétons, on a incorporé 0.5% du superplastifiant avec ajout de 10 % de la pouzzolane en substitution. Le **tableau 3.10** montre les résultats de la résistance à la compression des différents types de béton à base de sable de carrières et témoin pour le dosage 350 Kg/m<sup>3</sup> avec les rapports E/C 0.4 et 0.5 à 28 jours.

**Tableau 3.10** : Résistance à la compression des différents types de béton adjuvanté avec pouzzolane pour le dosage 350 Kg/m<sup>3</sup> et avec les rapports E/C 0,4 et 0.5 à 28j.

Rapport E/C	Dosage en ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Résistance à la compression des différents types de béton à 28j (MPa)			
		Btm	BS	BT	BL
0,4	350	-	44,8	37,4	34,7
0,5		42,9	44,1	36,5	33,6

D'après la **figure 3.23**, on remarque une amélioration favorable dans les résistances à la compression des bétons (BS, BT et BL) adjuvantés avec pouzzolane en comparaison avec celles des mêmes bétons non adjuvantés sans pouzzolane, cela confirme les résultats trouvés dans le cas des mortiers discutés auparavant. Cette amélioration varie de 12 à 16% selon le type et le dosage des bétons. Probablement, elle est due à l'effet du superplastifiant et à l'effet de la pouzzolane.



**Figure 3.23** : Résistance à la compression des différents types de béton adjuvanté (avec superplastifiant) avec 10 % de pouzzolane pour les rapports E/C 0,4 et 0,5 et le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> à 28j.

### 3.6.3. Résistance à la traction par flexion des bétons

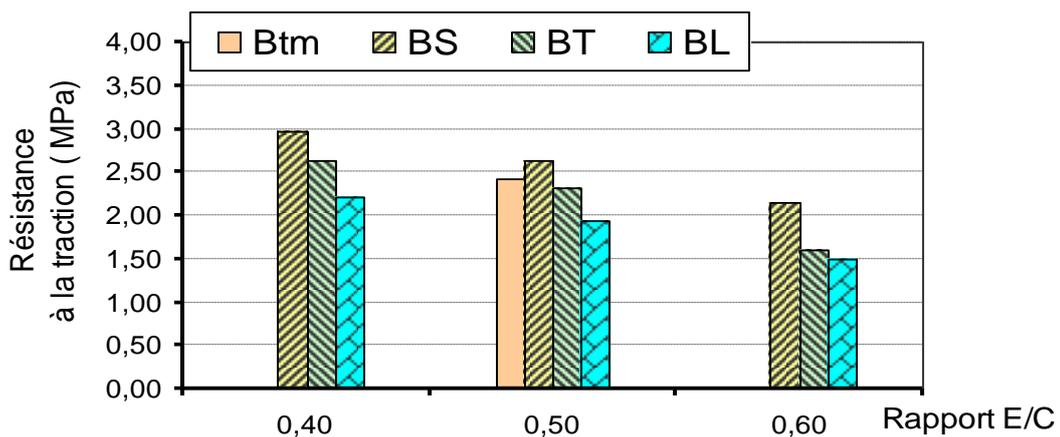
Les résultats des essais de la résistance à la traction par flexion pour les différents types de bétons à différents dosages et rapports E/C sont portés sur le **tableau 3.11**.

D'après les **figures 3.24 à 3.26**, on remarque que la résistance à la traction des différents mortiers a la même allure que dans le cas de la résistance à la compression. Alors, les mêmes

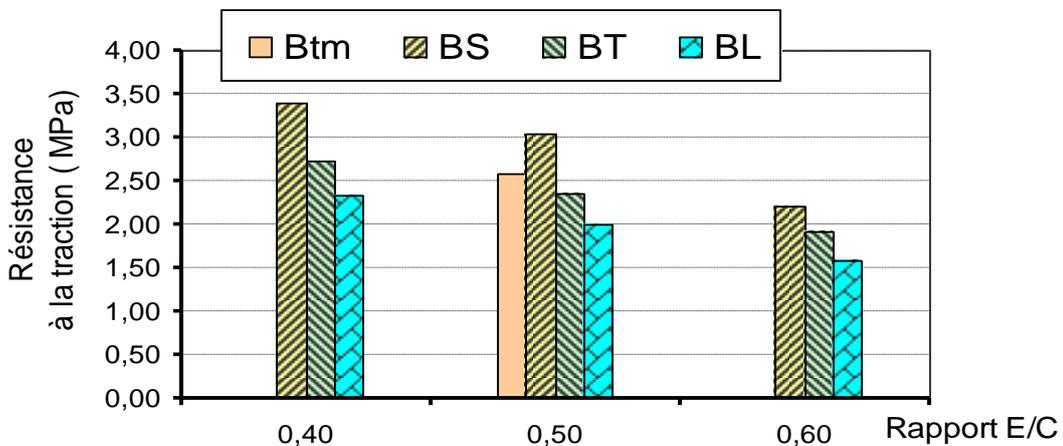
observations et conclusions mentionnées précédemment dans le cas de la résistance à la compressions, sont applicables dans le cas de la résistance à la traction.

**Tableau 3.11** : Résistance à la traction des différents types de béton

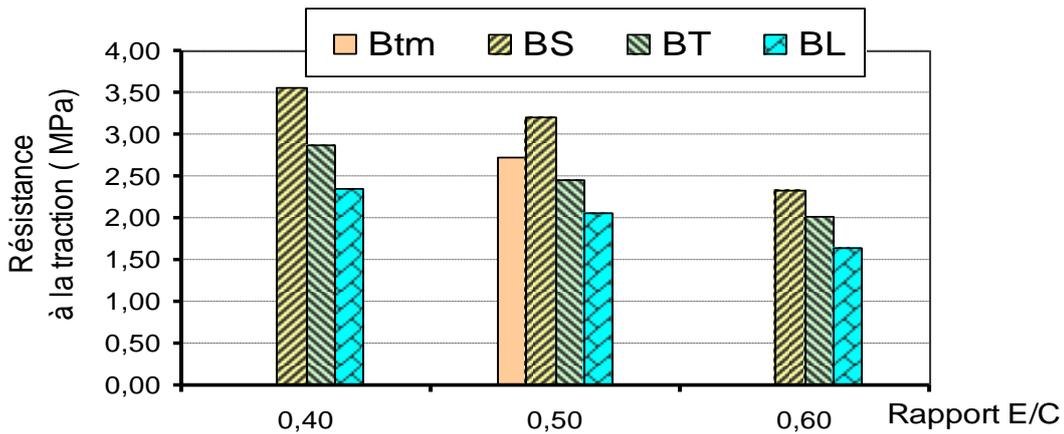
Dosage en ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Rapport E/C	Résistance à la traction des différents types de béton à 28j (MPa)			
		Btm	BS	BT	BL
300	0,4	-	2,98	2,62	2,21
	0,5	2,42	2,64	2,33	1,95
	0,6	-	2,14	1,61	1,49
350	0,4	--	3,40	2,74	2,33
	0,5	2,59	3,04	2,36	2,00
	0,6	-	2,22	1,93	1,58
400	0,4	-	3,57	2,87	2,36
	0,5	2,73	3,20	2,46	2,06
	0,6	-	2,34	2,02	1,64



**Figure 3.24** : Résistance à la traction des différents types de béton en fonction du rapport E/C pour un dosage de 300 Kg/m<sup>3</sup> à 28j.



**Figure 3.25** : Résistance à la traction des différents types de béton en fonction du rapport E/C pour un dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> à 28j.



**Figure 3.26 :** Résistance à la traction des différents types de béton en fonction du rapport E/C pour un dosage de 400 Kg/m<sup>3</sup> à 28j.

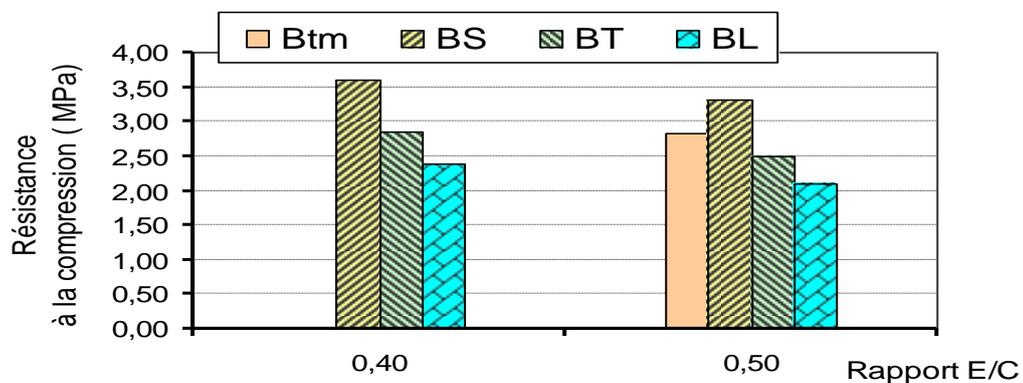
### 3.6.4. Effet du superplastifiant et de la pouzzolane

Le **tableau 3.12** montre les résultats de la résistance à la traction des différents types de béton à base de sable de carrières et témoin, adjuvanté plus pouzzolane pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> avec les rapports E/C 0.4 et 0.5 à 28 jours.

**Tableau 3.12 :** Résistance à la traction des différents types de mortier adjuvanté plus pouzzolane pour le dosage 350 Kg/m<sup>3</sup> et avec les rapports E/C 0,4 et 0.5 28j.

Rapport E/C	Dosage en ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Résistance à la traction des différents types de béton à 28j (MPa)			
		Btm	BS	BT	BL
0,4	350	-	3,60	2,85	2,39
0,5		2,82	3,31	2,50	2,10

D’après **la figure 3.27**, comme dans le cas des mortiers, une amélioration de la résistance à la traction est bien remarquée, cela est pour tous les types de bétons à base de sable de carrières et ainsi le témoin. L’augmentation de cette résistance est de l’ordre de 3 à 9 % par rapport à celle des bétons non adjuvantés sans pouzzolane selon le type du sable.



**Figure 3.27 :** Résistance à la traction des différents types de béton adjuvanté (avec superplastifiant) plus 10 % de pouzzolane pour les rapports E/C 0,4 et 0,5 et le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> à 28j.

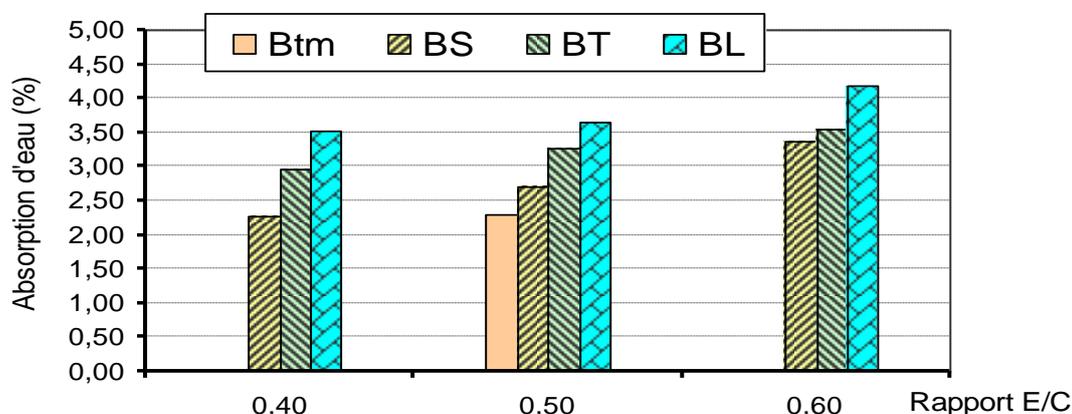
### 3.7. Absorption d'eau par immersion

Les résultats obtenus issus de cet essai concernant les différents types du béton sont résumés dans le **tableau 3.13** suivant.

**Tableau 3.13** : Absorption d'eau des différents types de béton à 28j.

Dosage en ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Rapport E/C	Absorption d'eau des différents types de béton à 28j (%)			
		Btm	BS	BT	BL
300	0,4		2,27	2,96	3,52
	0,5	2,29	2,70	3,27	3,64
	0,6		3,36	3,55	4,18
350	0,4		2,18	2,74	3,31
	0,5	2,21	2,58	2,98	3,46
	0,6		3,04	3,31	3,34
400	0,4		2,11	2,30	3,07
	0,5	2,14	2,30	2,69	3,24
	0,6		2,64	2,95	4,05

D'après les **figures 3.28 à 3.30**, on remarque que tous les types de béton à base de sable de carrières ont des coefficients d'absorption d'eau légèrement plus élevés que celui du béton à base de sable d'oued. On peut classer les bétons à base de sable de carrières en ordre croissant des coefficient d'absorption comme suivant : BS, BT puis BL qui a la plus grande valeur. Cela s'explique par la porosité différente des bétons ; plus la porosité est grande plus le coefficient d'absorption est élevé. Par conséquent, on peut en déduire que les bétons ayant le coefficient d'absorption le plus bas sont les bétons caractérisés par une résistance à la compression plus élevée ; donc on a intérêt à minimiser ce coefficient pour avoir des performances améliorées.



**Figure 3.28** : Absorption d'eau des différents types de béton en fonction du rapport E/C pour un dosage de 300 Kg/m<sup>3</sup>.

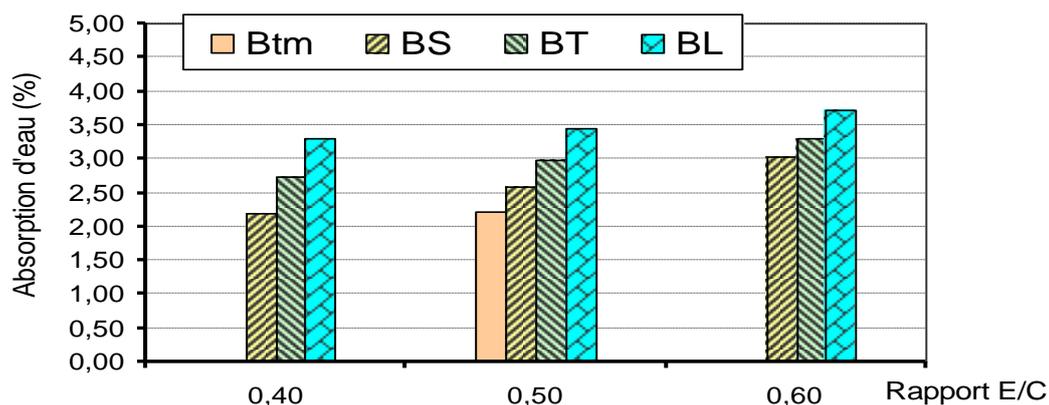


Figure 3.29 : Absorption d'eau des différents types de béton en fonction du rapport E/C pour un dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup>.

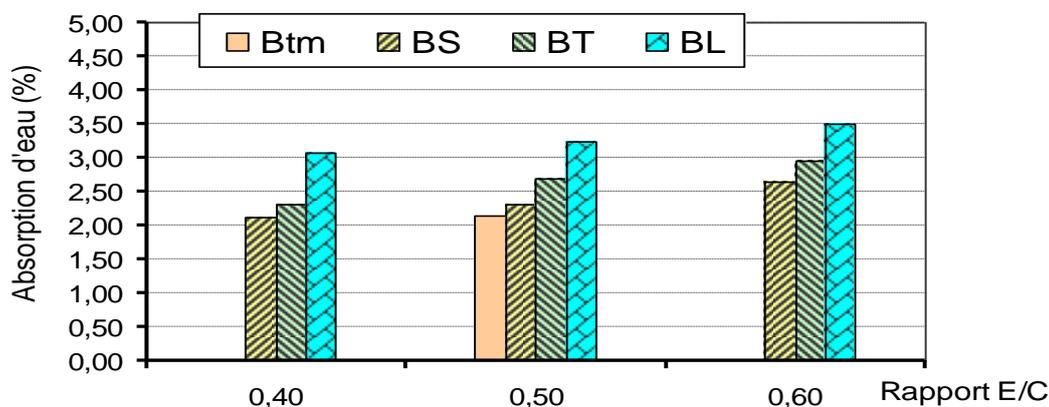


Figure 3.30 : Absorption d'eau des différents types de béton en fonction du rapport E/C pour un dosage de 400 Kg/m<sup>3</sup>.

### 3.8. Coefficient de ramollissement

Les coefficients de ramollissement concernant les différents types du béton sont portés sur le **tableau 3.14** ci-après.

Tableau 3.14 : Coefficient de ramollissement des différents types de béton

Dosage en ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Rapport E/C	Coefficient de ramollissement des différents types de béton à 28j			
		Btm	BS	BT	BL
300	0,4		0,81	0,79	0,74
	0,5	0,79	0,80	0,77	0,73
	0,6		0,78	0,75	0,70
350	0,4		0,85	0,83	0,79
	0,5	0,82	0,83	0,81	0,77
	0,6		0,80	0,78	0,75
400	0,4		0,87	0,84	0,80
	0,5	0,84	0,85	0,82	0,79
	0,6		0,81	0,80	0,77

D'après les figures 3.31 à 3.33, on remarque que tous les types de béton à base de sable de carrières ont des coefficients de ramollissement ne se distinguant pas de ceux du béton à base de sable d'oued, et parfois sont plus meilleurs. On peut classer les bétons à base de sable de carrières par ordre croissant comme suivant : BL, BT puis BS qui la plus grande valeur. Cet ordre est l'inverse de celui des coefficients d'absorption d'eau. Cela a donc la même explication déjà rapportée précédemment. Par conséquent, on conclut que les bétons à base de sable de carrières ont des résistance à la compression acceptables généralement à l'état saturé.

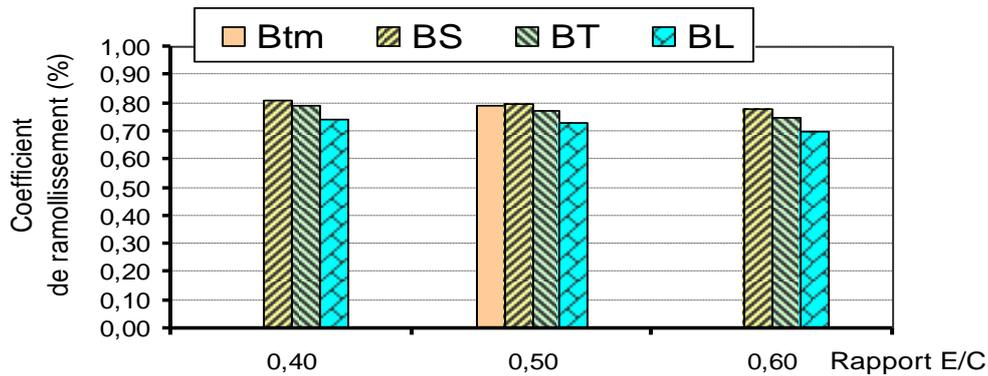


Figure 3.31 : Coefficient de ramollissement des différents types de béton en fonction du rapport E/C pour un dosage de 300 Kg/m³.

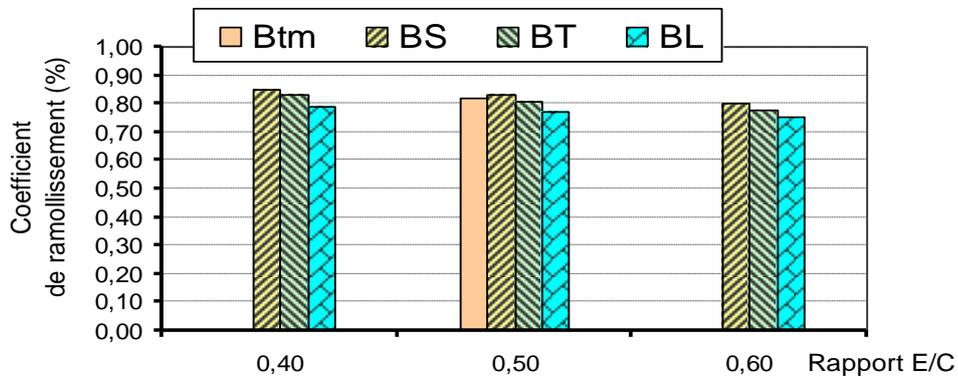


Figure 3.32 : Coefficient de ramollissement des différents types de béton en fonction du rapport E/C pour un dosage de 350 Kg/m³.

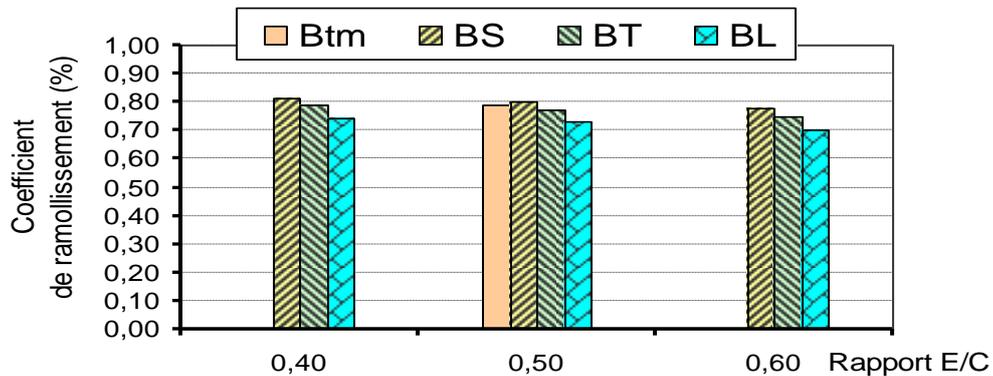


Figure 3.33 : Coefficient de ramollissement des différents types de béton en fonction du rapport E/C pour un dosage de 400 Kg/m³.

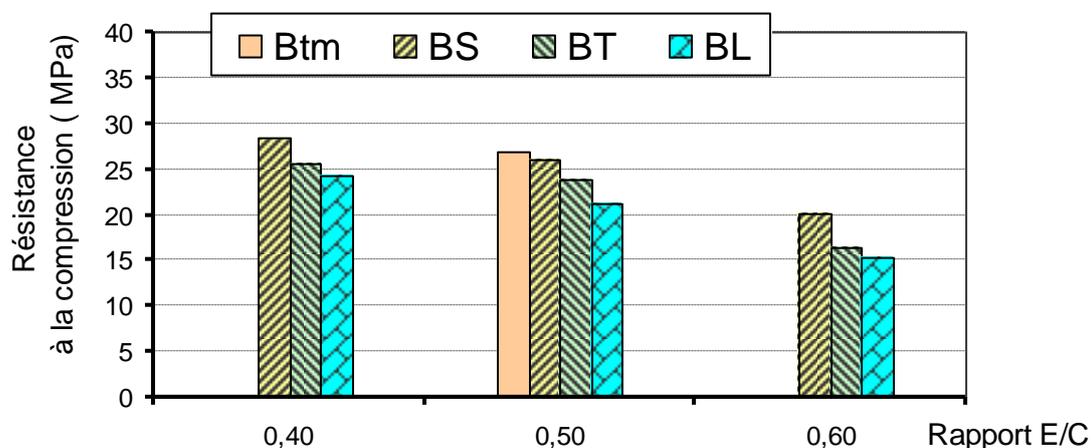
### 3.9. Durabilité

Les résultats issus de l'essai de l'endurance (durabilité) vis-à-vis les effets cycliques de la température sont illustrés dans le **tableau 3.15** ci-après.

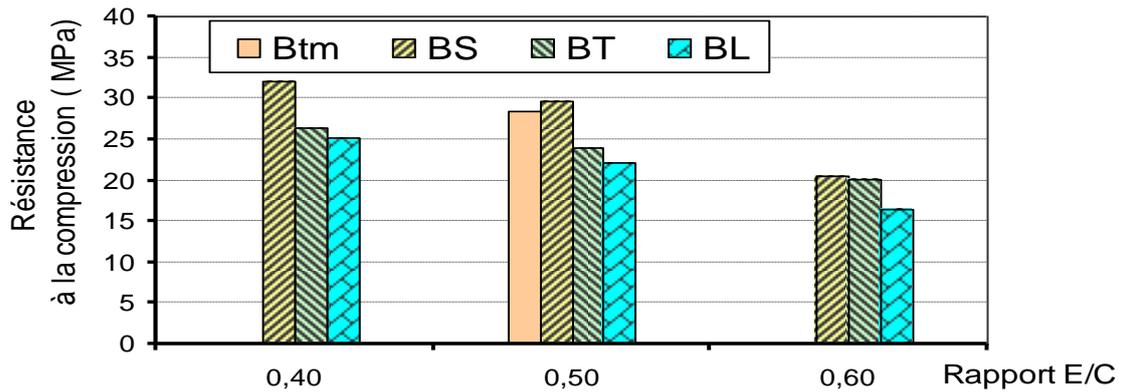
**Tableau 3.15** : Résistance à la compression pour la durabilité (après 20 cycles) des différents types de béton.

Dosage en ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Rapport E/C	Résistance à la compression pour la durabilité des différents types de béton à 28j (MPa)			
		Btm	BS	BT	BL
300	0,4	-	28,4	25,6	24,2
	0,5	26,9	26,1	23,9	21,2
	0,6	-	20,0	16,3	15,3
350	0,4	-	32,0	26,4	25,1
	0,5	28,5	29,6	23,9	22,0
	0,6	-	20,4	20,1	16,5
400	0,4	-	34,4	28,4	24,9
	0,5	29,6	30,8	24,6	22,1
	0,6	-	22,2	20,2	16,7

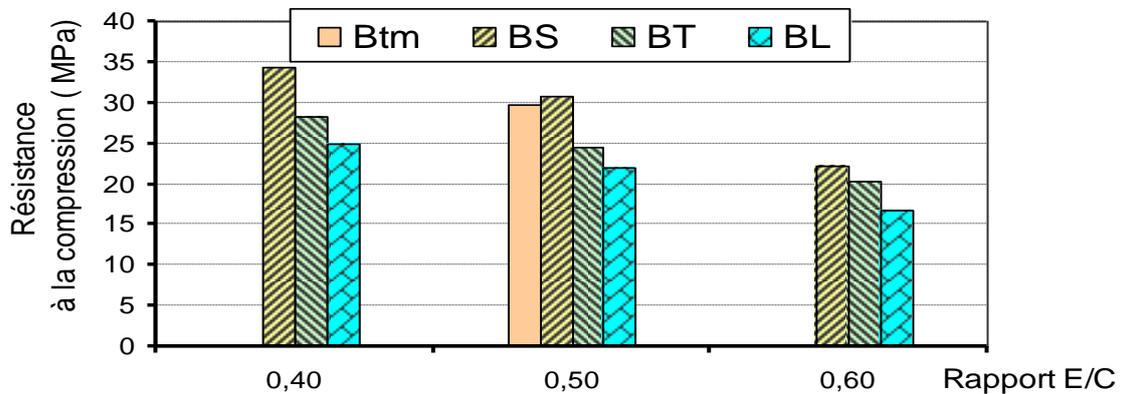
En examinant les **figures 3.34 à 3.36**, et en comparant avec le béton témoin, on peut apercevoir que malgré des chutes plus ou moins grande de résistance à la compression des différents types du béton à base de sable de carrières, que ces derniers ne se distinguent pas des bétons à base de sable d'oued. On peut donc conclure que de point de vu durabilité vis-à-vis les effets cycliques de la température, le béton à base de sable de carrière est utilisable et pourrait remplacer le béton à base de sable d'oued.



**Figure 3.34**: Résistance à la compression pour la durabilité (après 20 cycles) des différents types de béton en fonction du rapport E/C pour un dosage de 300 Kg/m<sup>3</sup>.



**Figure 3.35 :** Résistance à la compression pour la durabilité (après 20 cycles) des différents types de béton en fonction du rapport E/C pour un dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup>.



**Figure 3.36 :** Résistance à la compression pour la durabilité (après 20 cycles) des différents types de béton en fonction du rapport E/C pour un dosage de 400 Kg/m<sup>3</sup>.

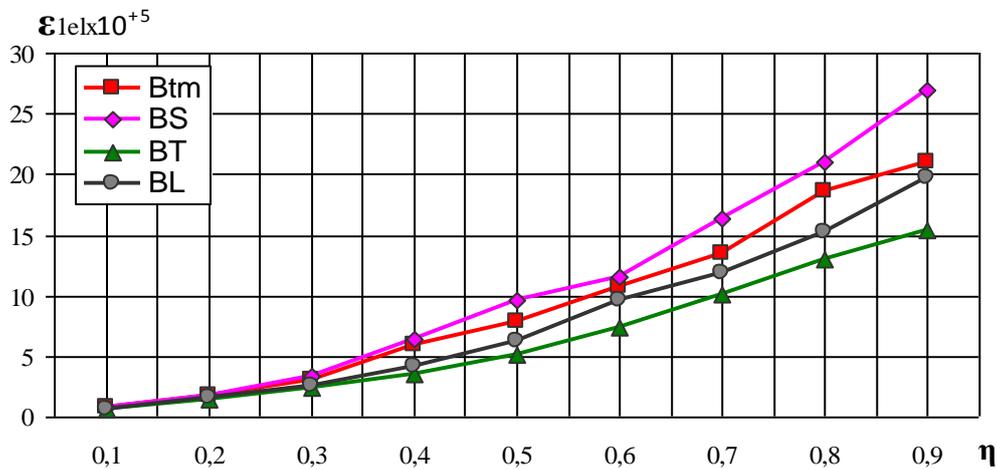
### 3.10. Déformabilité et module d'élasticité

Afin d'étudier l'influence du type de sable sur la déformabilité et le module d'élasticité, on a effectué des essais de déformabilité sur des prismes (10x10x40) cm<sup>3</sup> confectionnés à partir des différents types de sable (Btm, BS, BT et BL) pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et les rapports E/C de 0,5 et 0,6. Les résultats issus de ces essais sont représentés sur les graphes (3.37 à 3.43) et (3.44 à 3.50) pour les rapports E/C 0,5 et 0,6 respectivement. Ces graphes représentent l'évolution des déformations élasto-instantanées longitudinales et transversales à l'instant (t) et relatives totales à (t+Δt) avec l'augmentation de la contrainte relative (η), le module de déformabilité, le module d'élasticité et enfin une comparaison entre les résistances à la compression cubiques et prismatiques.

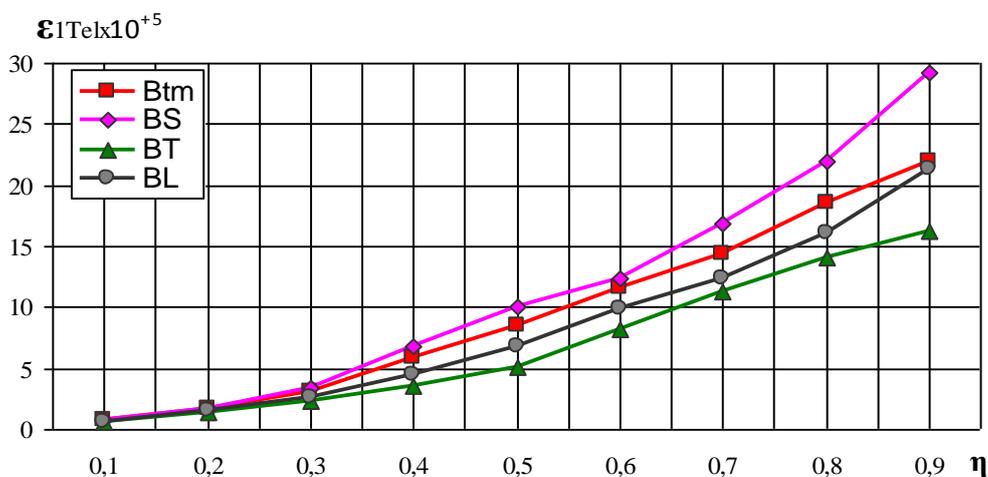
D'après ces graphes, on peut citer les remarques suivantes :

- La relation entre la contrainte relative et les déformations élasto-instantanées du béton revêt un caractère rectiligne pour (η = 0.1-0.3). Un comportement élastique linéaire.
- La relation entre (η) et les déformations est curviligne dans l'intervalle (η = 0.4 - 0.9), ce qui signale le développement dans les bétons des déformations irréversibles.

- La résistance à la compression prismatique est toujours inférieure à la résistance à la compression cubique pour tous les types de sable.
- Les bétons à base de sable de carrière et le béton témoin présentent la même allure de la déformabilité.
- D’après les figures, on peut observer que le béton à base de sable concassé tamisé BT présente des déformations moindres ainsi q’un module de déformabilité relativement élevé par rapport aux autres types de béton et par conséquent une meilleure déformabilité. On peut conclure donc que le béton à base de sable concassé tamisé BT présente un meilleur module d’élasticité (voir figures 3.42 et 3.49) par rapport aux autres types de béton. Cela est probablement dû la forte adhérence entre la pâte du ciment et les agrégats.



**Figure 3.37 :** Déformations élasto-instantanées longitudinales du béton  $\epsilon_{1el}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Btm, BS, BT et BL pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et le rapport E/C=0,5



**Figure 3.38 :** Déformations élasto-instantanées totales longitudinales du béton  $\epsilon_{1Tel}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Btm, BS, BT et BL pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et le rapport E/C=0,5

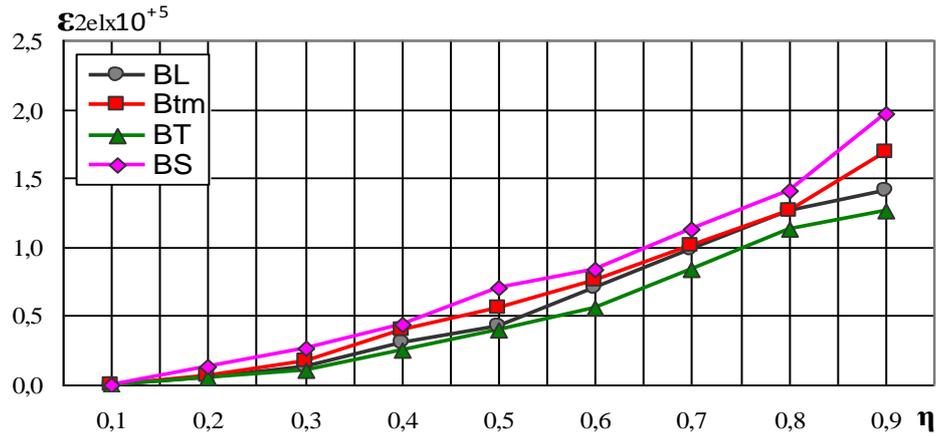


Figure 3.39 : Déformations élasto-instantanées transversales du béton  $\epsilon_{2el}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Btm, BS, BT et BL pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et le rapport E/C=0,5

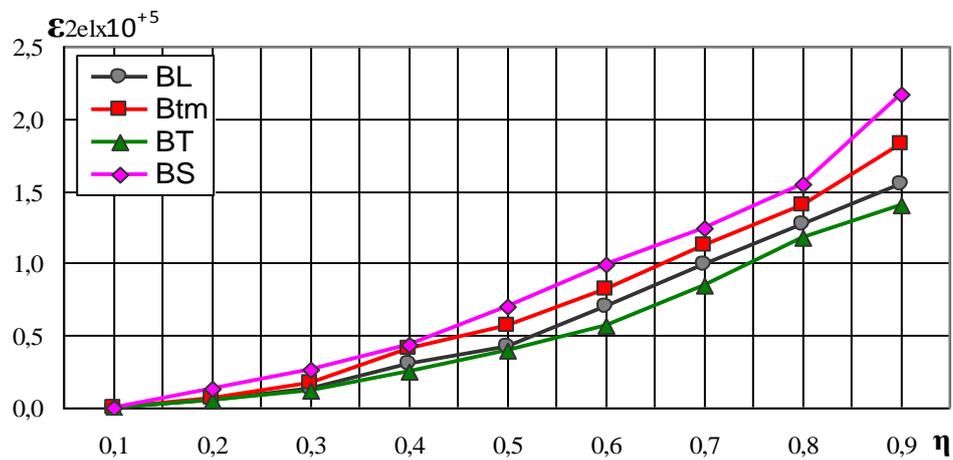


Figure 3.40 : Déformations élasto-instantanées totales transversales du béton  $\epsilon_{2Tel}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Btm, BS, BT et BL pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et le rapport E/C=0,5

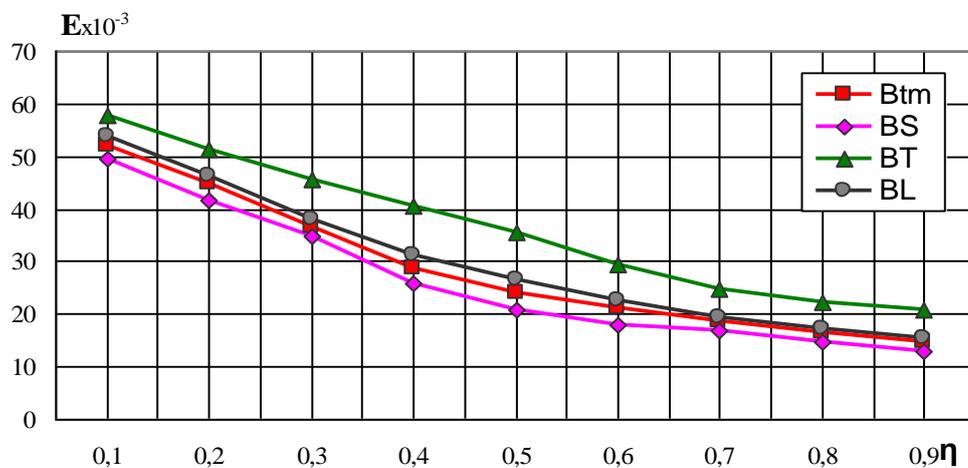


Figure 3.41 : Module de déformabilité E du béton en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Btm, BS, BT et BL pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et le rapport E/C=0,5

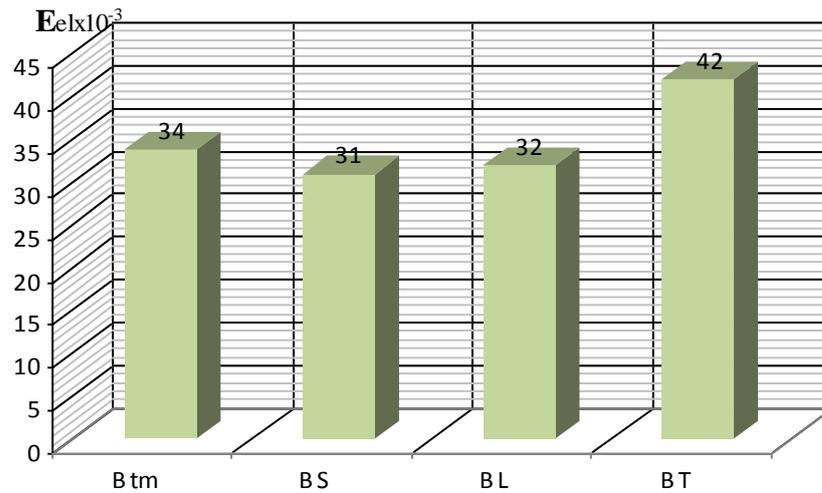


Figure 3.42 : Module d'élasticité des bétons Btm, BS, BT et BL pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et le rapport E/C=0,5

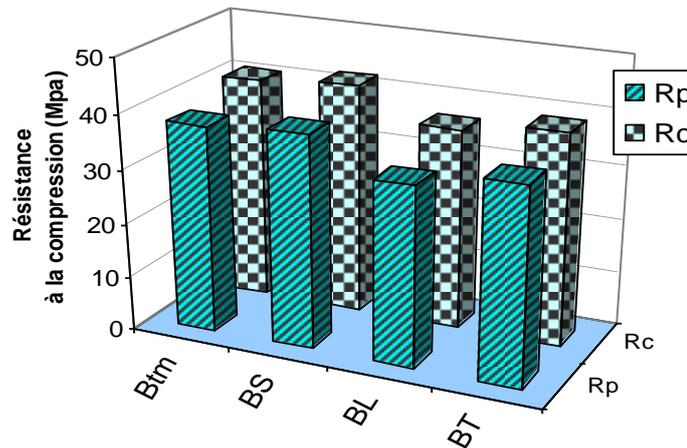


Figure 3.43 : Résistance mécanique à la compression cubique (Rc) et prismatique (Rp) en fonction du type de sable pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et le rapport E/C=0,5

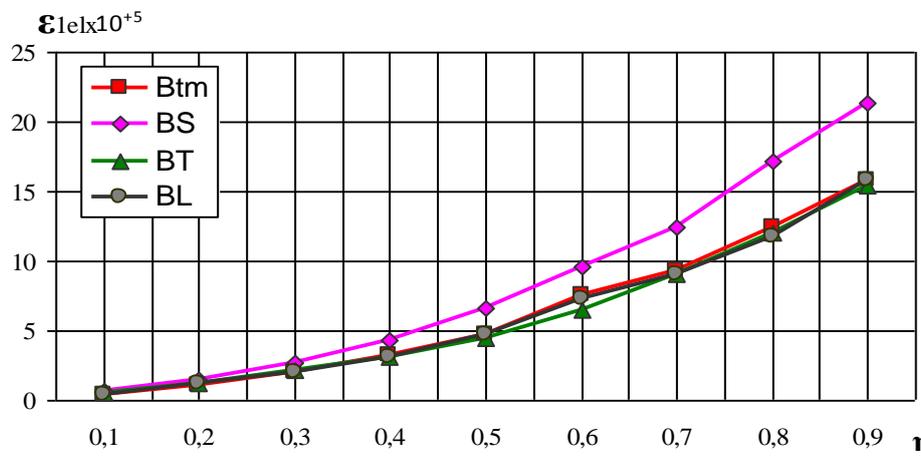
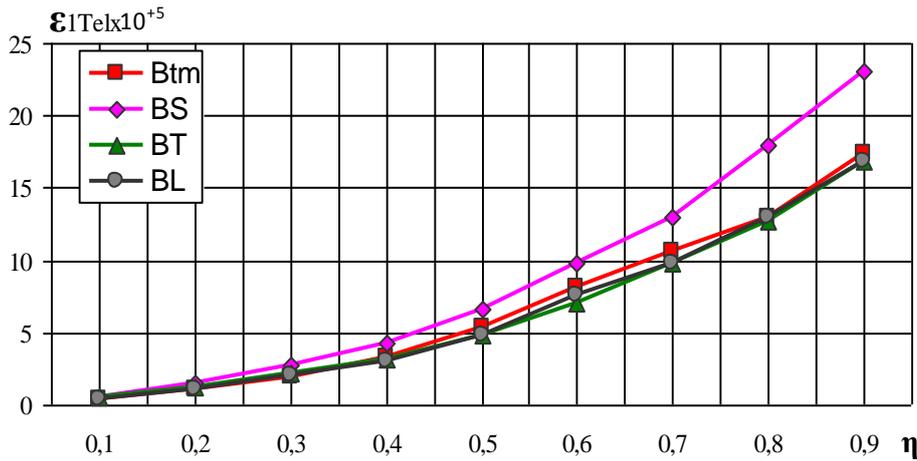
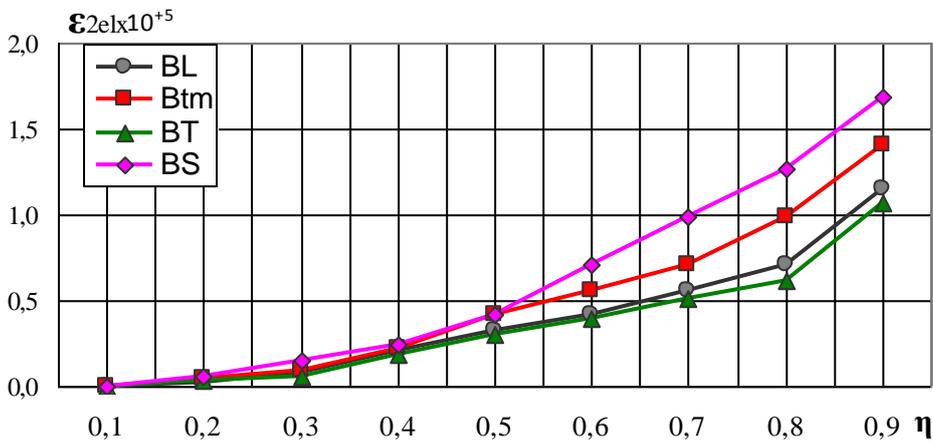


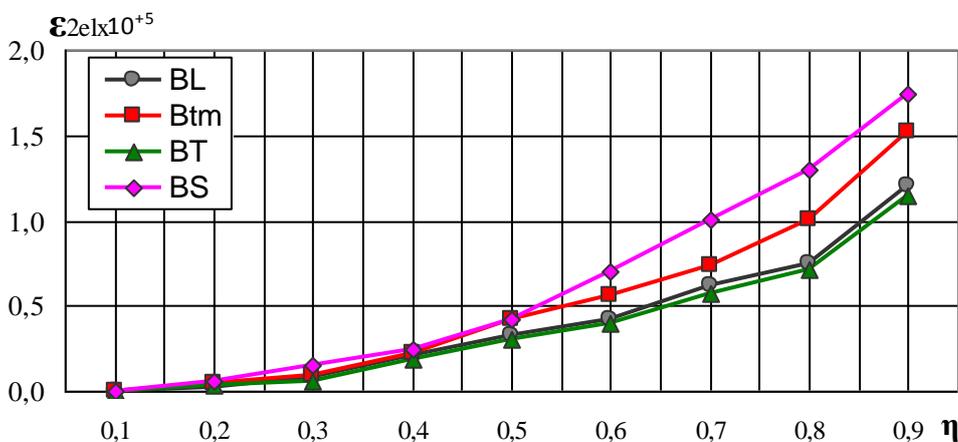
Figure 3.44 : Déformations élasto-instantanées longitudinales du béton  $\epsilon_{1el}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Btm, BS, BT et BL pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et le rapport E/C=0,6



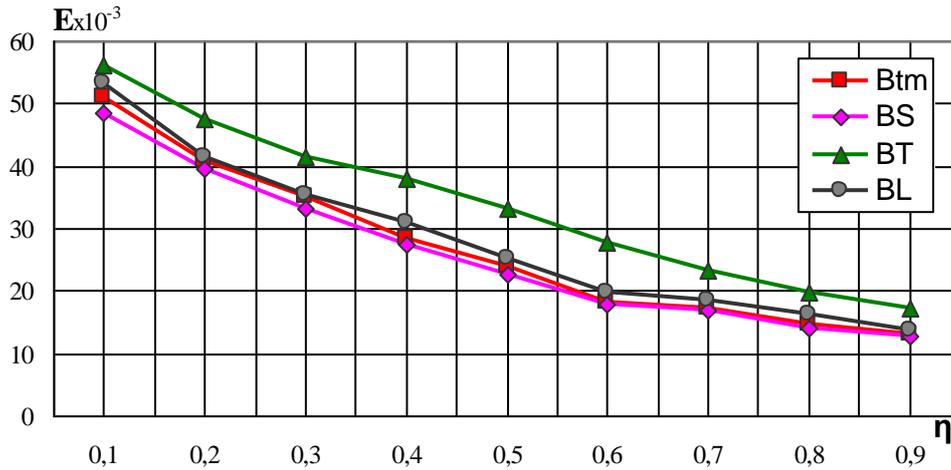
**Figure 3.45 :** Déformations élasto-instantanées totales longitudinales du béton  $\epsilon_{1Tel}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Btm, BS, BT et BL pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et le rapport E/C=0,6



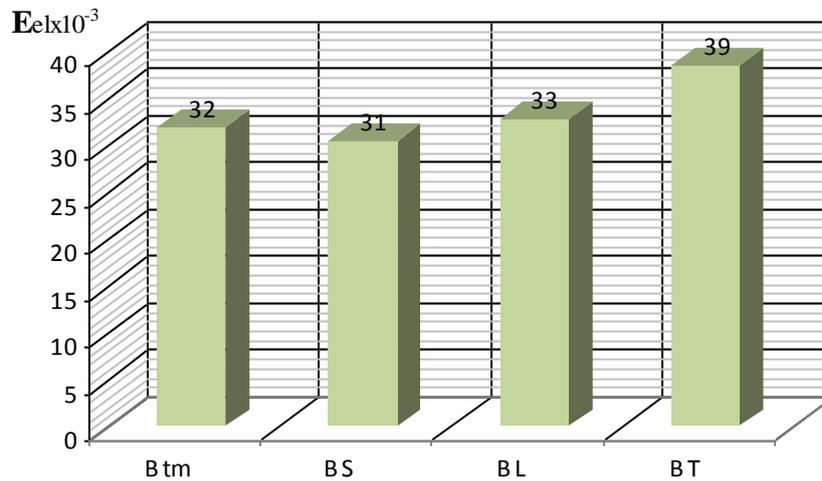
**Figure 3.46 :** Déformations élasto-instantanées transversales du béton  $\epsilon_{2el}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Btm, BS, BT et BL pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et le rapport E/C=0,6



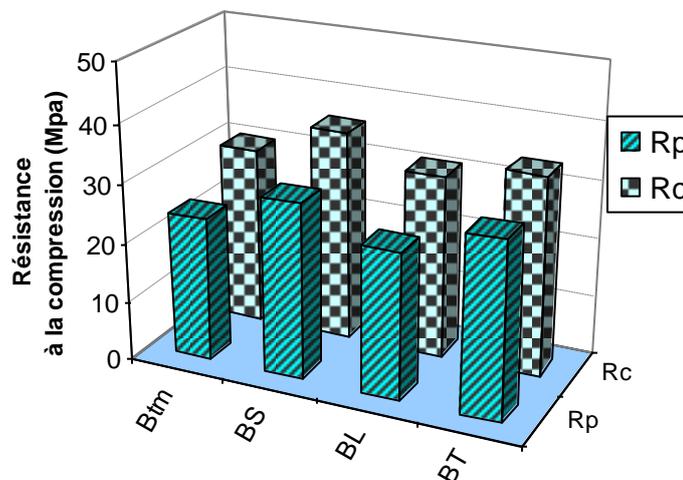
**Figure 3.47 :** Déformations élasto-instantanées totales transversales du béton  $\epsilon_{2Tel}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Btm, BS, BT et BL pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et le rapport E/C=0,6



**Figure 3.48 :** Module de déformabilité E du béton en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Btm, BS, BT et BL pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et le rapport E/C=0,6



**Figure 3.49 :** Module d'élasticité des bétons Btm, BS, BT et BL pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et le rapport E/C=0,6



**Figure 3.50 :** Résistance mécanique à la compression cubique (Rc) et prismatique (Rp) en fonction du type de sable pour le dosage de 350 Kg/m<sup>3</sup> et le rapport E/C=0,6

### 3.11. Conclusion

Le but de notre travail a porté essentiellement sur l'étude de la possibilité de l'utilisation du sable des carrières comme substitution au sable d'oued pour la fabrication du béton ainsi que l'effet d'adjuvant fluidifiant (superplastifiant) et un ajout minéral (pouzzolane naturelle) sur les propriétés mécaniques et rhéologiques de ce genre du béton. L'étude présente une démarche expérimentale visant à déterminer les performances des types du béton composé à base de différents types du sable de carrières dans le but de tenter de comprendre les influences de substitution du sable d'oued par le sable des carrières sur les différentes caractéristiques du béton. Les influences sur l'ouvrabilité, l'absorption, coefficient de ramollissement, la résistance à la compression, la résistance à la traction et la déformabilité sont les paramètres retenus dans cette étude.

D'après cette étude, on conclut que la présence des fines en proportion modérée dans un sable concassé est une nécessité, les résultats obtenus avec différents pourcentages de fines, ont mis en évidence l'intérêt de l'ajout des fillers calcaires pour l'amélioration des performances mécaniques des mortiers et bétons. Le béton à base de sable concassé ne se distingue pas particulièrement, sur l'aspect mécanique, des bétons classiques.

Finalement on constate que les meilleures performances généralement reviennent aux bétons à base de sable de carrières tamisé (BT). Les autres bétons présentent eux aussi des qualités de maniabilité et de résistances acceptables en présence des facteurs qui améliorent ces deux propriétés notamment le superplastifiant et la pouzzolane.

Par conséquent, on peut conclure que, le sable de concassage constitue une solution idéale au problème d'approvisionnement. Ainsi, on peut conclure que ces matériaux locaux (sable de concassage) peuvent remplacer avantageusement le sable siliceux. Mais à l'influence importante de pourcentage des fines, on peut bien améliorer la qualité du ce type de béton en incorporant des adjuvants fluidifiants et des ajouts minéraux.

---

## CONCLUSION GENERALE

### 1. Généralités

Le sable est un élément essentiel entrant dans la composition du béton. Son utilisation permet d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton. La demande sans cesse croissante sur les granulats a provoqué un épuisement rapide des sabliers et une exploitation anarchique des sables de mer causant ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages en ayant des répercussions directes sur les ressources naturelles, l'érosion des berges d'oued et l'avancée de mer.

Les données extraites de la synthèse bibliographique et les résultats recueillis lors de notre démarche expérimentale démontrent la faisabilité technique de substituer, moyennant quelques précautions, le sable alluvionnaire par le sable des carrières lors de la fabrication du mortier ou du béton. Cette possibilité est d'autant plus intéressante que dans les régions riches en ce matériau.

En les années récentes, un changement s'est produit, dirigé parfois par le besoin aigu d'un produit qui puisse valoir les propriétés du sable naturel dans le béton. Plusieurs recherches et projets de développement ont été initiés à travers le monde. En général, on a trouvé de bonnes possibilités de remplacement du sable naturel par le sable concassé, ainsi d'autres effets positifs sur le béton.

Le contenu en fines du sable concassé est encore important. Il est souvent très élevé dans le sable concassé que le sable naturel parce que les fines de ce dernier ont été lavées au cours de sa production naturelle. Les normes industrielles, comme ASTM C33 et les spécifications d'agrégats des producteurs du béton, permettent des taux limités de fines dans le sable. Malgré que des recherches récentes et des exemples commerciaux davantage indiquent les avantages d'utiliser des taux élevés des fines, le taux optimal des fines varie en fonction du type du béton à fabriquer. Désormais, il y a un besoin de séparer les fines du sable puis les ajouter, sans se soucier du taux désiré.

La conclusion la plus fréquemment notée dans les différentes recherches est de changer nos idées de l'esprit. Pour réussir, les producteurs d'agrégats ne doivent plus utiliser les déchets d'agrégats en substitution directe du sable naturel dans le béton et au lieu de ceci ils doivent revoir le processus complet exigé pour la production du sable avec des propriétés convenables. Cependant, pour un producteur d'agrégats, il n'est pas facile d'identifier les exigences de qualité d'un sable concassé. Alors qu'il y a des règles bien définies pour les normes décrivant les propriétés des gros agrégats, les exigences pour les agrégats fins ne sont pas aisées de les identifier.

## 2. Conclusions

L'objectif de cette recherche est de contribuer à apporter une meilleure alternative au problème d'approvisionnement en sable alluvionnaire par l'utilisation du sable des carrières dans la fabrication du béton. Les trois variantes proposées du sable de carrière étaient : sable sans modification (à son état initial), sable tamisé au tamis 0.16 mm et sable lavé ; le but de notre travail a porté également sur l'amélioration des propriétés des bétons à base du sable des carrières par l'incorporation d'adjuvant fluidifiant (superplastifiant) et un ajout minéral (pouzzolane naturelle).

D'après cette étude, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✓ La faisabilité technique de remplacer le sable alluvionnaire par le sable des carrières dans la fabrication des mortiers et bétons.
- ✓ la présence des fines en proportion modérée dans un sable concassé est une nécessité, les résultats obtenus avec différentes variantes du sable, ont mis en évidence l'intérêt de l'ajout des fillers calcaires pour l'amélioration des performances mécaniques des mortiers et bétons.
- ✓ Les meilleures résistances mécaniques sont celles du béton (BS) avec un taux des fillers calcaires de 12%.
- ✓ Le retrait minimal est celui du béton (BL) dépourvu des fillers calcaires.
- ✓ L'adjuvant superplastifiant et l'addition de pouzzolane donnent au béton à base de sable concassé des performances améliorées à l'état frais et durci.
- ✓ le béton à base de sable concassé tamisé BT présente un meilleur module d'élasticité par rapport aux autres types de béton.
- ✓ Finalement, pour compromettre une résistance élevée et un retrait minimum, le choix préféré

généralement revient aux bétons à base de sable de carrières tamisé (BT) avec un taux des fines de 4 %. Les autres bétons présentent eux aussi des qualités de maniabilité et de résistances acceptables en présence des facteurs qui améliorent ces deux propriétés notamment le superplastifiant et la pouzzolane.

Par conséquent, on peut conclure que, le béton à base de sable concassé ne se distingue pas particulièrement, sur l'aspect mécanique, des bétons classiques. Le sable de concassage constitue une solution idéale au problème d'approvisionnement. Ainsi, on peut conclure que les matériaux locaux (sable des carrières) peuvent remplacer avantageusement le sable siliceux à condition de maîtriser le pourcentage des fines.

### 3. Perspectives et recommandations

La bonne source de roches et le bon processus de concassage et filtrage sont les facteurs clé de la réussite en production du sable concassé. Le choix des concasseurs et des filtres dépend du matériau d'alimentation et l'utilisation désirée du produit fini, par exemple béton prêt à l'emploi, sable du mortier, sable de bitume, ...etc.

Le sable concassé va jouer un grand rôle dans le futur vu la possibilité de prévoir la qualité du produit, en terme de forme des particules, granulométrie et teneur en eau, ce qui va aboutir à une grande économie.

Pour les producteurs du béton, une économie en ciment va être une motivation intéressante. Un niveau élevé de prédiction va provoquer des frais moindres vu la réduction des rejets.

Pour les futures études, il serait préférable de tester plusieurs types de sable concassé obtenus de différentes carrières afin de mieux comprendre le comportement rhéologique et mécanique des bétons à base de ces sables de carrières.

Finalement, pour que l'utilisation du sable des carrières dans la confection des bétons soit efficace, il faut veiller au respect des recommandations suivantes :

- ✓ Avoir un matériel plus performant au sein des carrières, c'est-à-dire le renouvellement des équipements de concassage pour obtenir des sables ayant un pourcentage en fines acceptable (maîtriser la teneur en fines dans les sables).
- ✓ Encadrement des organismes exploitants les carrières par des spécialistes dans le domaine
- ✓ Installer un laboratoire sur site, pour le contrôle facile et rapide des sables.

## INTRODUCTION GENERALE

### 1. Problématique

Les granulats occupent environ les trois quarts du volume du béton dont 20 à 30 % de granulats fins (sable), ce qui révèle l'importance accordée à l'approvisionnement par ces matériaux. Dans les derniers 15 ans, il est devenu clair que la disponibilité de sable de bonnes qualités est en décroissance à travers le monde. Avec quelques exceptions, il paraît que c'est une tendance mondiale. Les gisements existants du sable naturel sont en voie de disparition au moment où l'urbanisation et de nouveaux gisements sont tout proches des régions urbanisées ou très loin des sites où ils sont utilisés.

En Algérie, la demande sans cesse croissante de constructions a provoqué un épuisement rapide des sabliers et une exploitation anarchique des sables de mer causant ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages. Il faut savoir par ailleurs que 13 à 14 millions de tonnes de sable des oueds sont prélevés annuellement. Les matériaux alluvionnaires produits par les oueds couvrent, 40% des besoins nationaux. En outre, la surexploitation de ces sables peut conduire à des répercussions directes sur les ressources naturelles, l'érosion des berges d'oued et l'avancée de mer. Par conséquent deux décrets ministériels ont été approuvés en 1991 et 1999 par le ministère de l'équipement et le gouvernement interdisant l'exploitation abusive de sable de mer et de sable d'alluvions.

Parallèlement à cette situation préoccupante, il existe en Algérie environ 1010 carrières avec une capacité de production allant de 10 à 400 tonnes par heure et une production annuelle totale de 68 millions de tonnes. Ces carrières génèrent 15 millions de tonnes de sable comme un sous-produit. Ce sable n'est utilisé que partiellement dans la construction de routes et rarement utilisé dans les mortiers et bétons provoquant ainsi un problème de stockage au niveau des carrières. La raison principale de la non-utilisation de ce sable dans les mortiers et bétons est son taux élevé en fines (élément inférieur à 80 $\mu$ m) qui varie de 8 à 30 %.

Plusieurs pays dans le monde tels que la France, l'Espagne, l'Angleterre, L'Argentine et le Maroc ont le même problème dans certaines régions, et par conséquent des programmes de recherches ont été menés pour l'utilisation des sables de carrières dans la confection des mortiers et bétons. Ces études ont conduit ces pays à réviser leurs normes en particulier le taux de fines admissibles de 12 à 16 % [39]. Pour des dimensions au dessus de 4 mm, l'agrégat concassé peut remplacer le sable alluvionnaire dans la plupart des applications de construction sauf qu'il y a des exigences spécifiques pour les formes très arrondies et lisses. C'est pourquoi il y a eu lieu le changement vers l'agrégat concassé dans la plupart des marchés ces trois dernières décennies. Pour les agrégats fins (pour les normes européennes d'industrie, produits inférieures à 4 mm), la

substitution du sable alluvionnaire est davantage un problème complexe. Historiquement, les agrégats fins ont été des produits secondaires du processus de concassage et criblage. Du fait de leur rugosité, les particules plates et allongées et souvent d'une granulométrie insuffisante, ont une basse performance dans le béton. Le besoin en eau est très élevé pour l'ouvrabilité du béton. Cela certainement fait reculer plusieurs producteurs de béton de l'utilisation du sable concassé. Par conséquent, des programmes de recherches méritent d'être menés pour les utilisations des sables de concassage dans la fabrication des mortiers et bétons.

L'incorporation des adjuvants fluidifiants et additions minérales présente un intérêt majeur pour donner de meilleures performances rhéologique et mécaniques du béton en général, en particulier celui à base de sable des carrières. C'est maintenant une technique importante d'améliorer d'une part, les propriétés du béton telle que l'ouvrabilité, la résistance, la durabilité,...etc, ces additions minérales affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement liée avec le développement de la résistance, le module d'élasticité, la durabilité du matériau durci, et d'autre part, l'utilisation des additions dans la production des ciments portlands a résolu en grande partie le problème de pollution occasionnée par le gaz carbonique dégagé et par la forte consommation d'énergie lors de la fabrication du ciment, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique.

Les mécanismes à l'origine des modifications des propriétés rhéologiques et mécaniques des matériaux cimentaires causé par les ajouts paraissent particulièrement complexes, mais plusieurs études dans ce domaine s'accordent pour distinguer trois principaux effets qui se superposent pour influencer les propriétés du matériaux à l'état frais et durci : un effet granulaire qui résulte des modifications apportées par l'addition sur la structure granulaire du matériau en présence d'eau ou d'adjuvant, un effet physico-chimique et microstructural engendré par les différentes interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment et un effet chimique dû à l'activité chimique en milieu cimentaire de certaines phases minérales caractérisées par des propriétés pouzzolaniques ou hydrauliques.

## **2. Objectif de l'étude**

Notre travail de recherche a pour objectif de contribuer à apporter une meilleure solution alternative au problème d'approvisionnement en sable alluvionnaire par l'utilisation du sable des carrières dans la fabrication du béton. On a envisagé donc, de proposer trois variantes du sable de carrière à savoir : sable sans modification (à son état initial), sable tamisé au tamis 0,16mm et sable lavé ; en outre pour la comparaison un sable d'oued témoin. On a procédé par la caractérisation des différents matériaux entrant dans la composition des différents mélanges de mortier et béton. Il s'agit aussi de vérifier la faisabilité de béton de qualité courante en utilisant

les sables de carrières jusqu'à présent écartés, en raison de leur teneur en fillers généralement élevée. D'autre part, notre travail s'est intéressé plus particulièrement à l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques de ce genre de béton par l'incorporation d'un superplastifiant et un ajout de pouzzolane naturelle.

Finalement, à travers cette étude, on a tenté d'apporter une meilleure connaissance du comportement rhéologique et mécanique des bétons à base de sable des carrières de la région de Biskra en Algérie.

### 3. Plan du travail

Dans le but de maîtriser le sujet et arriver aux objectifs fixés précédemment, nous avons suivi un plan de travail qui se compose de :

- ✓ Une introduction générale qui fait définir la problématique du sujet ainsi que les objectifs visés.
- ✓ **Le chapitre 1 :** qui comporte une synthèse bibliographique sur les différents constituants du béton en particulier les agrégats concassés, les ajouts minéraux et les adjuvants. Les travaux antérieurs concernant l'utilisation du sable des carrières dans la fabrication du béton ont été ainsi mentionnés.
- ✓ **Le chapitre 2 :** concerne la caractérisation des matériaux utilisés et les méthodes expérimentales utilisées dans ce travail. On a spécifié également les différents mélanges utilisés dans les mortiers et les bétons.
- ✓ **Le chapitre 3 :** est consacré à la discussion des résultats concernant l'état frais et durci des différents mortiers et bétons étudiés. Tous les résultats obtenus font l'objet des commentaires et des interprétations.
- ✓ Finalement une conclusion générale sur cette étude, des perspectives et des recommandations sont présentées.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] **Andriamanantsilavo.N.R**, 2003 : comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage : expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation, thèse de doctorat à l'université de Bretagne sud.
- [2] **Baron.J, Olivier.J.P et Weiss.J.C**, 1996 : Les ciments courants, Les bétons, Bases et données pour leur formulation, sous la direction de Jacques Baron, Jean-Pierre Olivier, Ed. Eyrolles.
- [3] **Groupe ciments Français** ,1993 : Sous la direction de J.C. Bastide, la fabrication du ciment, Ed. Eyrolles.
- [4] **Dupain.R, Lanchon.R et Saint-Arromain.J.C**, 1995 : Granulats, sols, ciments et bétons, Paris ; Ed.Educavivre, 276 p.
- [5] **Aitcin.P-C** : Bétons Haute Performance, éditions Eyrolles, 2001.
- [6] **Andra, Dossier 2005** : référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue,Tome 2: matériaux cimentaires, document interne à l'Andra n° CRPASC040015T2\_A, 2005, 2005.
- [7] **Baroghel Bouny.V** : Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances, thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.
- [8] **Tazawa.E , Miyazawa.S , Kasai.T** : Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste, Cement and Concrete Research, 25, 2, 1995, p 288-292.
- [9] **Powers.T.C** : "The thermodynamics of volume change and creep", Materials and Constructions, vol.1, n°6, 1968.
- [10] **Guide, mars 2005** : d'application pratique de la nouvelle norme pour béton NF EN 206-1 sur chantier.
- [11] **Acker.P, Adam.M, Mamillan.M, Saulnier.J**, 1998 : caractères du béton, Techniques de l'ingénieur, traité Construction C2 250.
- [12] **Chanvillard.G** , 1999 : Connaissances générales sur le matériau béton, Ed. Aléas.
- [13] **CIM béton, 2000** : Le ciment et ses applications, Fiches techniques.
- [14] **De Larrard.F**, 2002 : construire en béton, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.

- [15] **Felekoglu.B, Turkel.S, Baradan.B** : Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Building and Environment*, 42, 2007, p 1795-1802.
- [16] **Yigitier.H, Yazici.H, Aydin.S** : Effects of cement type, water/cement ratio and cement content on sea water resistance of concrete, *Building and Environment*, 42, 2007, p 1770-1776.
- [17] **Kara Ali.R.** : "Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires", Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2002.
- [18] **Venuat.M** : La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.
- [19] **Sersale.R** : "Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes » thème VI-17ème Congrès International de la chimie des ciments - Volume 1- Paris 1980.
- [20] **Pichon.H, Gaudon.P, Benhassain.A, Eteradossi.O** : «Caractérisation et quantification de la fraction réactive dans les pouzzolanes naturelles », *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, N° 201- Jan-Fev 1996.
- [21] **Dreux.G, Festa.J**, 1998 : « Nouveau guide du béton et de ses constituants », Eyrolles, Paris.
- [22] **Coussot P, Grossierord J-L**, 2002 : « Comprendre la rhéologie de la circulation du sang à la prise du béton », EDP Sciences, pp.167-175.
- [23] **Legrand.C**, 1982 : « La structuration des suspensions de ciment », (dans « *Le béton hydraulique, connaissance et pratique* »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [24] **Bonneau.O** : Etude des effets physico-chimiques des superplastifiants en vue d'optimiser le comportement rhéologique des bétons à Ultra Hautes Performances. Thèse de doctorat, département de génie civil, université de Sherbrooke, Québec, Canada, 1997.
- [25] **Cassar.L**, 2005 : « Nouveaux matériaux bétons », Ecole thématique CNRS –ATILH « Matériaux cimentaires » du 25 – 30 septembre 2005, La Colle – sur–Loup.
- [26] **Dreux-Gorisse** : « Guide pratique du béton », Collection de l'ITBTP, 1970.
- [27] **Moret.L** : Précis de géologie. Masson et Cie – 1962.
- [28] **Arquié.G, Panet.M, Tourenq.C** : Granulats. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1990.
- [29] **Aïtcin.P-C, Jolicoeur.G, Mercier.M.** (1983) : Technologie des granulats. 1ère édition, les éditions Le Griffon d'argile p.372.

- [30] **Smith.MI., Collis, L.** (1993) : Aggregates: Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes, 2nd edition, The geological Society London p.339.
- [31] **Bodet.R** : Substitution des granulats alluvionnaires dans l'industrie du béton par les granulats marins, concassés ou recyclés. Rapport, CERIB, Réf. DDE 27, mai 2003.
- [32] **Rigan.J** : Problems with using crushed sand in concrete production – Compte rendu conférence – construction press – 1981.
- [33] **Bulletin du ciment n° 21** : Béton avec granulats de pierres concassées — septembre 1981.
- [34] **Newman.K** : Sea-dredged aggregates for concrete Cement lime gravel – octobre 1969.
- [35] **Schneider.U, Diederichs.U, Rosenberger.W** : Propriétés et utilisation de béton normal avec des granulats de basalte – 2<sup>e</sup> partie. Betonwerk fertigteil technik vol 48 n° 12-1982.
- [36] **Schneider.U, Diederichs.U, Rosenberger.W** : Propriétés et utilisation de béton normal avec des granulats de basalte – 3<sup>e</sup> partie. Betonwerk fertigteil technik vol 49 n° 1-1983.
- [37] **Coquillat.G , Lesage. R** : Recherche de développement d'emploi des sables issus de roches massives siliceuses et silicatées dans les bétons hydrauliques. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, N° 30.Paris 1984.
- [38] **Ahmed E.Ahmed , Ahmed A.El-Kourid** : Properties of Concrete Incorporating Natural and Crushed Stone Very Fine Sand- ACI, Materials Journal, V.86, No.4, July-August 1989.
- [39] **Sadhouari.F ,Goufi.N , Guezzouli.A** : Valorisation de l'utilisation des sables concassés par analyse des propriétés des mortiers et bétons ; SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries.ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.
- [40] **Hachaichi.S , Behim.M** :Substitution du sable roulé par les sables concassés et le laitier granule de haut fourneau dans les bétons de la région d'Annaba. Université d'Annaba - département de Génie Civil. Algérie, 2008.
- [41] **Makhloufi.Z , Bederina.M , Bouhicha.M** : Caractérisation et comportement mécanique du béton calcaire superplastifié et non superplastifié du turonien de l'atlas saharien (étude comparative) ; SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.
- [42] **R.B.A. Alshahwany** : Effect of Partial Replacement of Sand with Limestone Filler on Some Properties of Normal Concrete ; Al-Rafidain Engineering ,Vol.19,No.3, June 2011.
- [43] **Kherbache.S , Chelouah.N , Mehidi.K , Chikh amer.H , Tahakourt.A.K** : Etude de l'influence de l'ajout de particules fines contenues dans les sables concassés sur le retrait et la résistance des bétons. Université A/MIRA de BEJAIA. Algérie, 2007.

- [44] **Topličić Ćurčić.G, Grdić.Z, Despotović.I, Ristić.N** : Influence of crushed stone aggregate type on concrete consistency ; Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering Vol. 8, No 1, 2010, pp. 99 – 109.DOI: 10.2298/FUACE1001099T .
- [45] **Ltifi.M, Ben jamaa.N, Belhadj Ali.N, Akrouk.K** : Etude comparative des bétons hydrauliques à base de sable siliceux et sable calcaire de concassage.Colloque CMEDIMAT 2005.
- [46] **Sven-Henrik.N** : Sand solutions: Replacing natural sand in concrete. Special report,issue of Quarry Management Journal (QMJ, UK), June 2008.
- [47] **Komar .A** : «Matériaux et éléments de construction », Version française ; Editions Mir.Moscou, 540, (1978).
- [48] **Neville.A.M** : Propriétés des bétons, éditions Eyrolles, 2000.
- [49] **Achour . T** : Étude de l'influence de la nature des granulats sur les propriétés des bétons hydrauliques,cas des granulats calcaires tunisiens ; thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy Université & de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2007.