

UNIVERSITÉ MOHAMED KHEIDER BISKRA
FACULTÉ DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR
DÉPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N°d'ordre:.....

Série:.....



MÉMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Génie civil

Option : Matériaux

Présenté par

AZZOUZ Hocine

THEME

**Etude des bétons à base
des sables de dune**

Soutenue le : 03/05/2009

□ **DEVANT LE JURY**

<i>Président :</i>	Mekki MELLAS	<i>Pr.Ha</i>	UNIVERSITE DE BISKRA
<i>Rapporteur :</i>	Bouzidi MEZGHICHE	<i>M. C</i>	UNIVERSITE DE BISKRA
<i>Examineurs :</i>	Abdelhamid GUETTALA	<i>Pr</i>	UNIVERSITE DE BISKRA
	Abdallah ZATAR	<i>M.C</i>	UNIVERSITE DE BISKRA

REMERCIEMENTS

Je remercie Monsieur **B. Mezghiche** pour l'aide précieuse et l'intérêt constant qu'il a bien voulu montrer pour ce travail qu'il a guidé par de judicieux conseils.

J'exprime ma profonde gratitude au chef de département Monsieur **Mekki Mellas** pour leur encouragement et leur assistance qu'ils n'ont cessés de me prodiguer.

J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur **M. Mellas** le président de jury pour l'honneur qu'il me faisait en présider le jury de soutenance, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres de jury pour l'honneur qu'il me faisait en participant à ce jury et de bien vouloir juger ce travail.

✓ **A. Guettala,**

✓ **A. Zatar.**



INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. CONTEXTE

Les pratiques de l'industrie du béton sont conditionnées par les ressources locales et sont relativement routinières. Cependant, l'industrie du béton est confrontée ces dernières années à des changements importants : utilisation d'adjuvants de plus en plus performants, développement de nouveaux bétons (bétons à hautes performances, béton auto-compactant). Dans notre pays, s'ajoute un bouleversement supplémentaire : l'emploi d'un nouveau type de sable. Trois familles de sables se distinguent :

- Les sables roulés siliceux, dit ronds, sont issus d'un processus naturel d'érosion. En général, ils sont dragués dans les Oueds. Leur usage est courant depuis des années et est même recommandé. Cependant, les réserves disponibles sont proches de l'épuisement ou protégées par de nouvelles règles environnementales en matière de dragage des Oueds. Ce matériau est donc devenu moins intéressant économiquement.
- Les sables de concassage calcaires sont le produit d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières, la contrainte du coût de revient élevé, le rends économiquement moins intéressant.
- Le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, constitue la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir qui peut remplacer par excellence les deux types de sables suscités

Les granulats peuvent faire varier les prix du produit « béton », il faut tendre à maximiser la proportion des granulats dans le mélange pour en minimiser ainsi le coût. Aussi faut-il veiller également à ce que les granulats soient autant que possible exempt de substances nuisibles, en effet, ces substances peuvent entraver la prise de la pâte de ciment et réduire la résistance et la durabilité des bétons.

En Algérie, la plupart des bétons courants sont actuellement fabriqués avec des granulats siliceux alluvionnaires. Face à une demande fort croissante, les ressources potentielles en alluvions, bien qu'importantes, sont épuisables et les gisements sont soumis à des contraintes environnementales de plus en plus rigides faisant croître leur coût d'exploitation déjà élevé.

Tous ces facteurs incitent les acteurs du secteur du génie civil à rechercher la valorisation d'autres matériaux locaux de substitution qui soient aptes à fournir, si possible, des bétons de qualité équivalente aux bétons ordinaires.

Dans notre pays, malgré l'abondance de sable de dune dans le sud, ce matériau reste inconnu. Sa quantité se chiffre en milliards de m³. Il est disponible dans près de 60% du territoire. Certaines de ses caractéristiques physico-chimiques laissent penser qu'il pourrait être adopté en tant que matériau de construction : indice de propreté élevé et absence dans sa composition de matières organiques et autres matières indésirables telles que les sulfates, sulfures ou carbonates.

Les ressources en granulats sont rares dans la majorité des régions, ceci nous encourage à chercher des techniques permettant de valoriser des matériaux disponibles localement, et de les utiliser dans les différents domaines de construction, d'où l'intérêt tant économique qu'écologique que pourrait présenter l'utilisation de sable de dunes pour la formulation des bétons dont il serait le constituant principal.

2. OBJECTIFS VISÉS

Le but de ce travail est d'évaluer expérimentalement l'influence des sables de dune sur les caractéristiques physico-mécaniques, de la déformabilité et de la durabilité des bétons à base des sables de dune.

3. MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique.
- Le deuxième chapitre fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, et minéralogiques des matériaux utilisés (ciment, sable de dune, sable d'Oued, gravier, adjuvants & ajouts).
- Le troisième chapitre consiste à l'étude de béton à base des sables de dunes.
- En fin, une conclusion générale reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude et rapporte les intérêts pratiques qui en découlent.



CHAPITRE I

REVUE DE LA DOCUMENTATION

CHAPITRE I

REVUE DE LA DOCUMENTATION

I.1. INTRODUCTION

Ce chapitre bibliographique expose en premier lieu les caractéristiques physico-chimiques des composants du béton : l'eau, les granulats, le ciment, les adjuvants et les ajouts, l'état actuel de connaissance sur les bétons de sable, ainsi que les transformations physico-mécaniques liées aux processus d'hydratation, telles que la porosité, l'état de l'eau présente dans le matériau, le ressuage, le retrait et la perméabilité, suivis par des synthèses bibliographiques sur les performances de durabilité et de déformabilité.

I.2. CONSTITUANTS ET FABRICATION DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES

Les caractéristiques physico-mécaniques du béton à l'état frais et à l'état durci dépendent de sa composition et des différentes actions mécaniques auxquelles il est soumis lors de sa fabrication. Le béton est sujet à un ensemble de mécanismes de structuration (hydratation, floculation, etc.) et de déstructuration (malaxage, vibration, écoulement, etc.).

I.2.1. CONSTITUANTS

Les trois composants de base d'un béton sont l'eau, le ciment et les granulats. Des additifs peuvent y être rajoutés dans le but de modifier les propriétés telles que la maniabilité et la résistance.

Le béton est donc un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange.

I.2.1.1. CIMENT.

Grâce à la simplicité de sa technologie, le ciment Portland est, de nos jours, le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Le ciment Portland est un mélange composé suivant le cas de clinker, de gypse (CaSO_4) finement broyé et d'ajouts éventuels. Pour

favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques microns) dans des broyeurs à boulets.

La taille des grains du ciment Portland ordinaire varie de quelques microns à 150 microns. Ses caractéristiques granulaires sont exprimées au travers de sa granulométrie et de sa finesse.

Cette finesse est souvent caractérisée par sa surface massique où surface spécifique Blaine qui représente la surface totale des grains de ciment rapportée à la masse. Elle s'exprime en cm^2/g . La finesse habituelle est de l'ordre de $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, elle passe à $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge.

Le clinker est obtenu par cuisson à 1450°C suivi d'une trempe rapide d'un mélange d'environ 80 % de calcaire (CaCO_3) et 20 % d'argile. L'argile est composée de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'autres phases qui sont présentes à de faibles proportions telles que l'oxyde de fer (Fe_2O_3), le magnésium (MgO), l'oxyde de potassium (K_2O), l'oxyde de sodium (Na_2O). Ces oxydes sont présents dans le clinker sous forme de cristaux de silicate tricalcique C_3S dénommé alite, de silicate bicalcique C_2S ou bélite, d'aluminate C_3A ou célite, d'aluminoferrite tétracalcique C_4AF ou Felite, et d'autres phases mineures. Le C_3S est le principal constituant du clinker et représente 50 à 70 % de sa masse.

Le C_2S , le C_3A et le C_4AF représentent respectivement 15 à 30 %, 5 à 10 % et 5 à 15 % du clinker classique. (Pour plus de détails voir [42]). Ces compositions sont représentées au (tableau (I.1)). Ces composées ont refroidi, broyés et mélangés au gypse pour former le

Composition approximative	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\beta\text{-}2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_4.\text{Fe}_2\text{O}_3$
Formule abrégée	C_3S	$\beta\text{C}_2\text{S}$	C_3A	C_4AF
Nom	Alite	Bélite	—	Phase ferrite
Principales impuretés	MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ...	MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ...	SiO_2 , MgO , Alcalis...	SiO_2 , MgO ...
Forme cristalline commune	Monoclinique	Monoclinique	Cubique Orthorhombique	Orthorhombique
Proportion des composés présents (%)	35-65	10-40	0-15	5-15
Moyenne dans le ciment normal	50	25	8	8
Réactivité avec l'eau	Rapide	Lente	Rapide	Moyenne
Contribution à la résistance :				
• Bas âge	Bonne	Faible	Bonne	Bonne
• Long terme	Bonne	Excellente	Moyenne	Moyenne
Chaleur d'hydratation typique (kJ/kg)	Moyenne 120	Basse 60	Élevée 320	Moyenne 100

ciment [26].

Tableau (I.1) : Propriétés des principaux constituants du ciment portland, d'après [26]

I.2.1.2. SQUELETTE GRANULAIRE

C'est-à-dire le mélange de sable et de graviers, intervient dans la résistance finale du béton, occupent près de la 3/4 du volume du béton et influent donc sur ses propriétés. Ils permettent aussi de diminuer la quantité de ciment utilisée.

Les granulats proviennent dans la plupart des cas des roches naturelles. Leur utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible coût volumique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau (A. M. Neville [5]).

La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent d'une manière considérable sur le comportement du béton à l'état frais.

La dimension de ces granulats varie d'un dixième à plusieurs dizaines de millimètres. La norme française XP P 18-540 donne une définition des principales divisions granulométriques des granulats :

- Sable 0/D avec $1 \text{ mm} < D \leq 6,3 \text{ mm}$.
- Gravillon d/D avec $d \geq 1 \text{ mm}$ et $D \leq 125 \text{ mm}$.
- Grave 0/D avec $D > 6,3 \text{ mm}$.

La résistance du béton est fonction du rapport eau/liant, la maniabilité du béton frais est quant à elle surtout affectée par la granulométrie des granulats. La granulométrie désirée est déterminée selon la surface spécifique du granulat, le volume relatif occupé par le granulat, la maniabilité du mélange et la tendance à la ségrégation et réduisent le [ressuage](#) du béton frais. [Neville, 2000].

La majorité des granulats peut être considérée comme inerte et inactive (développement d'un lien avec le ciment sans influence significative sur le procédé de durcissement ni la solidité). Les granulats réactifs peuvent avec des parties de ciment entraîner des dommages nuisibles pour le béton en raison de l'[alcali-réaction](#). Plus les granulats sont arrondis, meilleure est l'ouvrabilité du béton frais. Plus les grains sont anguleux, meilleure sera la résistance à la traction-flexion du béton. Plus la résistance des granulats est importante, plus la résistance définitive du béton sera élevée.

Les granulats sont le constituant de base de tout travaux de Génie Civil. Il est donc important de maîtriser l'ensemble de leurs propriétés (et influences); tant du point de vue de leurs élaborations, que de leurs utilisations (mise en œuvre); et ce, afin de maîtriser au mieux le coût tout en respectant des critères de qualité.

La nature des gisements conditionne les propriétés intrinsèques (résistance, porosité, etc...) des granulats. Par contre, les caractéristiques géométriques (granularité, forme, etc ...) et de propreté sont fonction du processus d'élaboration. Pour fabriquer des produits ayant les qualités requises, les producteurs de granulats utilisent des installations de plus en plus complexes, faisant appel à des technologies bien maîtrisées (fragmentation, séparation gravitaire, lavage, etc...).

Les sables sont des granulats de dimension maximale « D » n'excédant pas 5mm. On distingue:

- les sables naturels ou alluvionnaires
- les sables artificiels produits par concassage d'une roche massive au niveau d'une carrière.

On peut classer les sables selon trois paramètres dont:

a) La granularité : permet de séparer les sable en trois catégories sont:

- Sables fins.
- Sables moyens.
- Sables grossiers.

b) La propreté et la teneur en fines : elle est appréciée par la valeur de l'équivalent de sable.

c) La nature minéralogique : En général, les sables peuvent être classés comme suit:

- Sables siliceux.
- Sables silico-calcaires.
- Sables calcaires.

Dans le cas d'utilisation de sable de site terrestre, il est recommandé d'éliminer la couche superficielle généralement souillée (salie) de matières organiques qui affectent son mouillage par l'eau de gâchage.

On entend par sable, tous les granulats 0/D conformes aux définitions des normes P 18-541 et P 18-103. Il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu de concassage d'une roche massive ou détritique. [10].

Du point de vue de la granularité, aucun critère granulométrique n'est a priori exigible pour confectionner un béton; on peut utiliser aussi bien un sable fin même homométrique, type sable de dunes, qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier. [10].

Une particule individuelle est appelée grain de sable. Les sables sont classés selon leur [granulométrie](#) (la grosseur des grains). Le sable se caractérise par sa capacité à s'écouler. Plus les grains sont ronds, plus le sable s'écoule facilement.

Le sable artificiel, obtenu par découpage ou broyage mécanique de roches, est principalement composé de grains aux aspérités marquées. On peut également différencier un sable qui a été transporté par le vent d'un sable transporté par l'eau. Le premier est de forme plus anguleuse que le deuxième qui est plus ronde. De plus, le sable éolien possède une couleur plus opaque que le sable aquatique plus translucide, dûe aux multiples impacts que subit le sable aérien lors de son transport.

Le sable est souvent le produit de la décomposition du [granite](#) du fait de l'[érosion](#). Ainsi, le plus fréquent de ses composants est-il le [quartz](#), le constituant le moins altérable du granite.

Les grains de sable sont assez légers pour être transportés par le [vent](#) et l'[eau](#). Ils s'accumulent alors pour former des [plages](#), des [dunes](#). Un vent violent qui se charge en sable est une « [tempête de sable](#) ».

Le sable est utilisé pour faire du [béton](#) et comme matière première du [verre](#). Il peut être utilisé pour [filtrer](#) les liquides. Du fait de sa facilité de manipulation, il est également employé lorsque l'on a besoin d'acheminer de la matière (peu importe sa nature) dans un endroit, par exemple pour servir de lest ou pour protéger (sac de sable contre les éclats d'[explosion](#) et les balles).

I.2.1.2.1. SABLE DE DUNE

A/- Mécanismes de formation

Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la végétation (désert, plage, lit fluvial à l'étiage). Le sable est érodé et pris en charge par le [vent](#) ([déflation](#)). Il est transporté aux ras du sol par [saltation](#), puis s'accumule quand la compétence du vent chute ([versant](#) sous le vent). Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposer.

B/- Types des dunes

1. les avant-dunes (foredune pour les anglophones), qui sont des bourrelets plus ou moins fixés par la végétation (oyats par exemples), parallèles au trait de côte et solidaire de la plage, c'est à dire échangeant du sable avec elle, dans un même système sédimentaire. À ne pas confondre avec une ancienne arrière dune en cours d'érosion, ou avec une dune formée par du sable venant de terre sur un secteur ou une avant-dune active ne pourrait pas se former. En Espagne et en Tunisie, ces avant-dunes sont systématiquement considérées comme faisant partie du domaine public maritime, ce qui facilite leur protection. l'avant-dune se forme à partir de fixation du sable en haut de plage, par des plantes pionnières [psammophiles](#).
2. les falaises dunaires (dune cliff pour les anglophones) n'est pas une vraie dune mais un profil résultant de l'érosion marine d'une dune ancienne fixée par une pelouse ou un boisement qui ont été à l'origine de la formation d'une couche d'humus ou de sol sableux.
3. les dunes perchées, (cliff-top dune pour les anglophones), qui apparaissent au sommet d'une falaise vive; alimentée en sable par le vent à partir de l'estran, voire à partir du profil de pente, quand il s'agit d'une falaise dunaire.
4. les cordons dunaires artificiels, qui sont construits de main d'homme, généralement comme élément de protection contre la mer ou d'une zone cultivée et/ou construite. Ils nécessitent un entretien permanent, sans lequel ils se désintègrent en quelques décennies. Certains cordons sont semi-naturels (ex : avant-dunes plus ou moins dégradés rectifiées par des engins et fixées par des oyats à [Sangatte](#) dans le nord de la France.).

C/- Physique des dunes

Nous connaissons tous, au moins par des photos ou les images de télévision, les étendues majestueuses de dunes ressemblant à une mer de sable dans le désert.

Leurs formes répétitives modelées par le vent couvrent d'immenses surfaces et leurs déplacements menacent aussi bien les zones de cultures que les routes ou même les villes. Malgré cela, le mouvement des dunes était encore très mal compris.

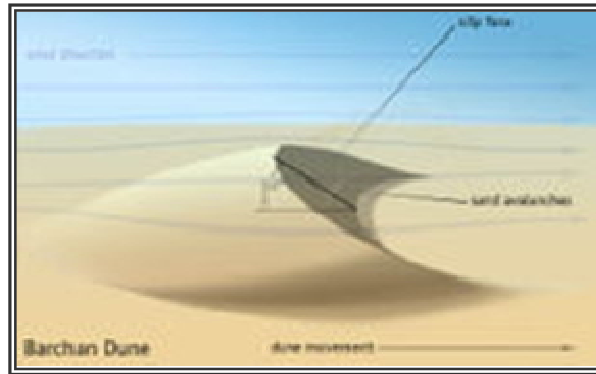
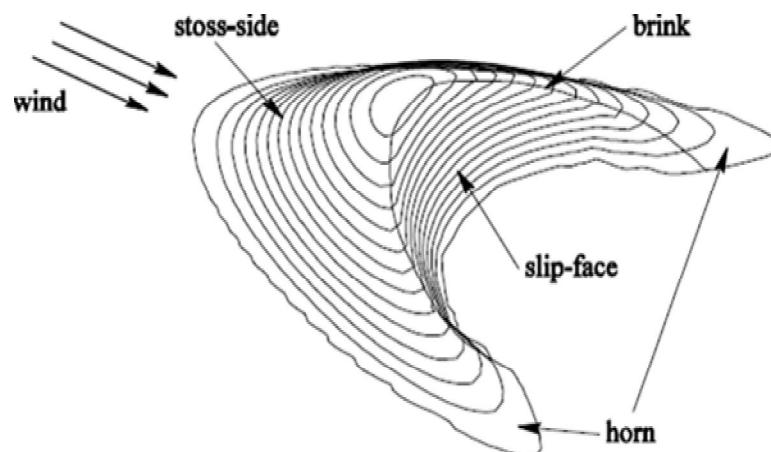


Figure (I.1): La barkhane

Une barkhane est une **dune** de la forme d'un croissant allongé dans le sens du vent. Elle naît là où l'apport de **sable** est faible et sous des vents unidirectionnels.

Le vent fait rouler le sable pour qu'il remonte la pente du dos de la dune jusqu'à la crête et vienne former de petites avalanches sur le versant plus pentu du front. Ce phénomène fait avancer la dune.

Les dunes les plus simples ont une forme de croissant et portent le nom arabe de barkhane (voir fig. I.1). Elles se forment dans des conditions particulières avec des volumes de sable limités et se déplacent sur un substrat stable sous l'action d'un vent qui vient toujours de la même direction. Leur crête sépare le dos de la dune, incliné de 5 à 20° et le front nettement plus raide (32 à 35°) qui se prolonge par deux cornes dans la direction du vent (voir fig. I.2).



D/- Diverses utilisations

Les sables sont un élément essentiel du processus sédimentaire et représentent une ressource très importante du point de vue économique: remblais, granulats pour béton, matériaux de construction, sables siliceux pour l'industrie. Ces derniers (appelés autrefois sables industriels) constituent l'essentiel de la matière première de l'industrie du verre, des moules, des noyaux de fonderie; ils entrent aussi dans la fabrication des céramiques et des mortiers spéciaux.

Le sable est aussi le milieu naturel où s'accumulent les minéraux lourds alluvionnaires; ces concentrations minéralisées sableuses sont dénommées placers (un mot espagnol) et l'on y extrait de l'or, des diamants, de la cassitérite (minerai d'étain), de la magnétite (oxyde de fer), de l'ilménite (oxyde de titane et de fer), etc. Les placers d'ilménite, ou «sables noirs», sont importants économiquement pour la fabrication des pigments de la peinture blanche (gisements côtiers en Australie) et comme source du titane-métal.

Les sables jouent également un grand rôle comme réservoirs potentiels pour les nappes d'eau (aquifères) ou les hydrocarbures. Il importe que l'exploitation du sable, souvent anarchique, soit réglementée pour éviter de perturber de fragiles équilibres naturels: érosion des plages dont l'alimentation naturelle en sable a été coupée; destruction à terre de la nappe phréatique, etc.

E/- Propriétés

Le sable forme naturellement des pentes stables jusqu'à environ 30°, au delà de cet angle, il s'écoule par avalanches successives pour retrouver cette pente stable. Cette propriété peut être exploitée pour étudier des formes parfaites générées par l'écoulement du sable sur des plaques de formes différentes. Par exemple, en faisant couler du sable sur un socle de forme carrée, le sable va former une pyramide parfaite avec des pentes de 30°.

Le sable est utilisé pour faire du **béton** et comme matière première du **verre**. Il peut être utilisé pour **filtrer** les liquides.

Du fait de sa facilité de manipulation, il est également employé lorsque l'on a besoin d'acheminer de la matière (peu importe sa nature) dans un endroit, par exemple pour servir de lest ou pour protéger (sac de sable contre les éclats d'**explosion** et les balles). Il est aussi utilisé comme **abrasif** dans des usines pour nettoyer des pièces métalliques.

Le sable est également un élément important de l'industrie touristique, lorsqu'il est présent sur les **plages** et les **dunes** où il est également un élément indispensable à la protection de la côte.

F/- Silice « quartz »

La silice (quartz) est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule SiO₂.

La silice pure se présente sous la forme d'un minéral dur et existe sous des formes variées dans la nature:

- principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès), elle représente 27% de la croûte terrestre ;
- fréquente dans les roches métamorphiques ;
- fréquente dans les roches magmatiques : quartz dans les roches magmatiques acides, crystallisé ou amorphe dans les roches volcaniques.

La silice se présente soit sous forme de cristaux non-moléculaires formés de motifs tétraédriques SiO₄ liés entre eux par les atomes d'oxygène de façon régulière, comme dans le quartz, soit sous forme amorphe, comme dans le verre.

I.2.1.3. EAU

L'eau présente dans le béton joue deux fonctions principales : Elle lui confère sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation du ciment.

L'eau est constituée de molécules polaires de H₂O dont la taille est approximativement égale à 1 angström. Ces particules exercent les unes sur les autres des forces d'attraction qui jouent un rôle fondamental sur ses propriétés rhéologiques. L'eau étant un milieu diélectrique, elle modifie les forces inter-granulaires. Son action n'est pas négligeable pour les grains très fins (tels que les ciments et les fines).

L'eau donne au béton sa maniabilité, d'une part par son action lubrifiante sur les différents grains, d'autre part par la cohésion due à la pâte provoquée par l'association des grains fins (ciment et fines) avec elle. [15].

Le dosage en eau doit donc être limité au «juste nécessaire» à l'hydratation du liant et aux exigences d'ouvrabilité. L'eau est le mal nécessaire de réglage le plus simple de la consistance,

mais son augmentation entraîne une diminution de la résistance à la compression de béton et affecte la durabilité.

I.2.1.4. ADJUVANTS

I.2.1.4.1. DEFINITION

On distingue essentiellement les adjuvants hauts réducteurs d'eau (superplastifiants). Le dosage en adjuvants n'excède pas 5 % de la masse du ciment. Ils ont pour rôle de maintenir une maniabilité donnée tout en diminuant la quantité d'eau dans le béton. Ils permettent ainsi d'obtenir un béton plus résistant en raison de la réduction de l'eau. A titre indicatif, les superplastifiants permettent de réduire la teneur en eau de 25 à 35 % tout en gardant une même maniabilité. [21]. Parmi les superplastifiants les plus connus on citera :

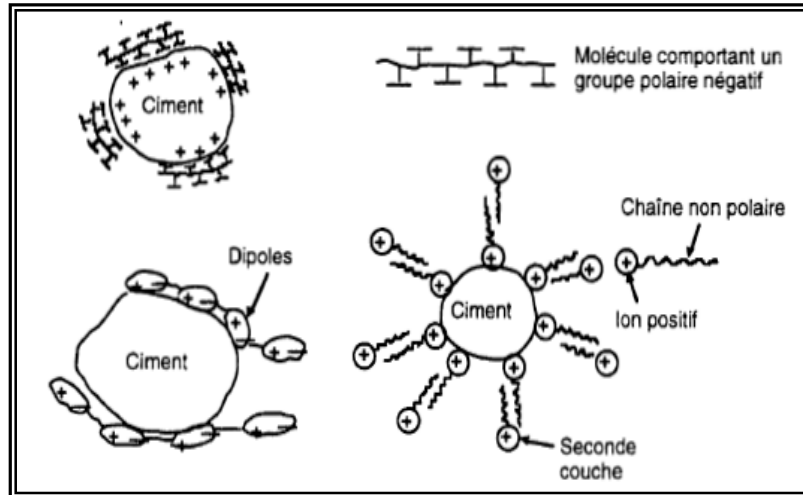
- Les polynaphtalènes sulfonés (PNS).
- Les sulfonâtes de mélamine (MS).
- Les polymères carboxyliques d'éther (PCE).

I.2.1.4.2. MODE D'ACTION

En contact des grains de ciment. D'une manière générale, les superplastifiants enrobent le grain de ciment pendant l'hydratation pour augmenter une charge négative sur la surface de la particule de ciment. [21].

L'adjonction d'un superplastifiant peut se traduire également par une augmentation notable de la vitesse de durcissement, à 24 h après le gâchage, le mortier a atteint plus de la moitié de sa résistance à 28 jours. [37].

Plusieurs publications traitent du mode d'action des superplastifiants, surtout des polynaphtalènes et des polymélamines. Bien que les mécanismes d'action commencent à être mieux compris, certains points concernant leurs propriétés physico-chimiques et leurs effets sur l'hydratation du ciment restent encore à

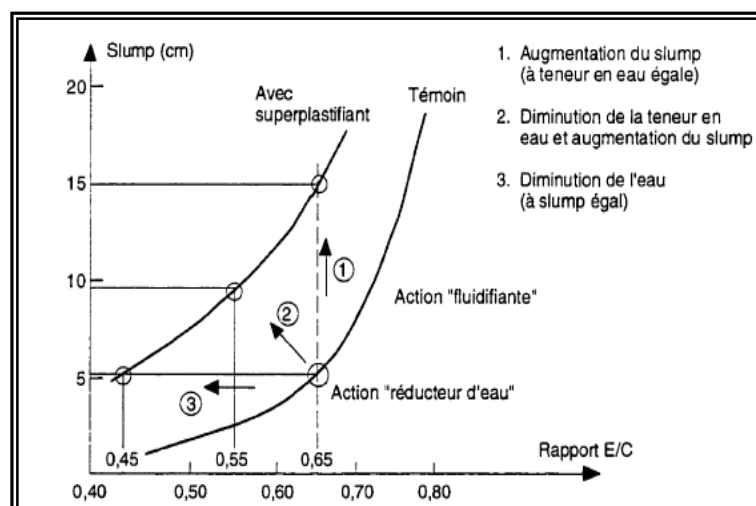


élucider.

Figure (I.3) : Mode d'action des réducteurs d'eau suivant leur nature ionique

I.2.1.4.3. CARACTERES GENERAUX

- Mise en œuvre: Augmente la maniabilité du béton et le maintien de la rhéologie.
- Performances mécaniques: Réduction d'eau importante, augmente considérablement les résistances mécaniques à court et moyen termes.
- Compacité du béton et durabilité.
- Augmentent la viscosité du béton afin d'éviter toute ségrégation.
- Modifier la viscosité du béton a fin d'éviter tout effet de lessivage pour le cas des bétons coulés dans l'eau.



(D'après la Notice technique, Edition avril 2004 ; Sika France S.A.).

Figure (I.4) : Les utilisations des superplastifiants, d'après [11].

I.2.1.4.4. AVANTAGES

A/- Avantages économiques

La propriété de la plupart des adjuvants chimiques de réduire l'eau est recherchée pour deux raisons. En abaissant la quantité d'eau de gâchage nécessaire, ils augmentent la résistance à la compression pour une teneur en ciment et un affaissement donnés. Ceci permet également de réduire la teneur en ciment pour une résistance et un affaissement donnés. Cette dernière caractéristique est très intéressante du point de vue économique, étant donné que le ciment est l'ingrédient le plus cher dans la composition du béton. Il ne faut toute fois pas pousser trop loin l'économie de ciment, cela pourrait nuire à la qualité du béton, par exemple, quant à l'absorption, la perméabilité et la durabilité. [8].

B/- Avantages écologiques

Les superplastifiants peuvent réduire la porosité du matériau en rendant le béton maniable avec moins d'eau. Cela accroît considérablement la durabilité du béton, qui prolonge la durée de vie de l'infrastructure dans laquelle il est utilisé, réduisant ainsi l'impact écologique du secteur de la construction. [8].

C/- Avantages architecturaux

Le béton, bien qu'il soit relativement bon marché, est unique comme matériau de construction parce qu'il peut être coulé dans différentes formes et tailles. Par ailleurs, comme l'utilisation de superplastifiants améliore la maniabilité et les propriétés mécaniques par réduction d'eau, les architectes peuvent désormais exploiter des modèles complètement nouveaux pour des structures élégantes possédant des capacités portantes normales. [8].

I.2.1.4.5. INFLUENCE SUR LE MOMENT D'ADDITION DE SUPERPLASTIFIANT DANS LE BETON

L'addition du superplastifiant ne doit jamais se faire sur un béton sec (c'est-à-dire avant l'ajout de l'eau). Il sera absorbé par les agrégats et le sable d'où son inefficacité avec le ciment. Le superplastifiant est plus efficace lorsqu'il est ajouté après l'humidification du

béton (environ 75% de l'eau de gâchage) ou fractionné dans le cas d'un E/C très bas : 1/3 dans l'eau de gâchage, 2/3 vers la fin du malaxage.

Le temps optimal d'addition du superplastifiant dans le béton est 2 minutes après le mélange eau-ciment-agrégats. A ce moment, le superplastifiant reste suffisamment disponible pour jouer son rôle de dispersant du C₃S et C₂S, et ce qui explique l'augmentation de la fluidité. [21].

I.2.1.4.6. INCOMPATIBILITE (SUPERPLASTIFIANT-CIMENT)

Ces phénomènes d'incompatibilité (Ciment-Superplastifiant) sont dus à une interaction entre le superplastifiant et le sulfate de calcium (gypse-CaSO₄-2H₂O) contenu dans le ciment, en empêchant ce dernier de débloquent l'hydratation du C₃A en formant une coquille d'étringite. Ce problème d'incompatibilité se présente surtout dans les bétons à faible E/C (BHP). Dans tel cas on remarque une perte de fluidité (Affaissement) rapide. Cependant, cette incompatibilité est très rarement remarquée dans les bétons avec un E/C > 0,5. [21].

I.2.1.5. LES AJOUTS

I.2.1.5.1. DEFINITION

Les ajouts pour béton sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au **ciment**, quelque fois également au béton. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des **propriétés spécifiques**.

Les ajouts 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.

Des ajouts, tels que les cendres volantes, les fillers, les laitiers, etc., entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques. On obtient ainsi un liant de composition binaire voire tertiaire. Les pays industrialisés tels que les États-Unis, la Russie, la France, l'Allemagne, le Japon et l'Angleterre, sont les plus grands producteurs de cendres volantes, de fumée de silice et de laitier de haut fourneau. La Chine et l'Inde produisent également des quantités importantes de cendres de balles de riz. [17].

I.2.1.5.2. CLASSIFICATION DES AJOUTS

L'un des moyens efficaces qui existe à augmenter la production du ciment est d'utiliser des ajouts qui peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs. [37]. Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique,

Type	Réactivité	Matériaux
hydraulique	fortement réactif	ciments spéciaux, chaux hydraulique
hydraulique latent	fortement réactif	laitier granulé (laitiers de haut fourneaux vitreux granulé), cendres riches en calcium (cendres volantes calciques)
pouzzolanique	fortement réactif	fumée de silice
pouzzolanique	moyennement réactif	cendres volantes pauvres en calcium (cendres volantes siliceuses), pouzzolanes naturelles (verres volcaniques, tufs volcaniques, trass, phonolithe, terres à diatomées)
pouzzolanique	faiblement réactif	scories cristallines
inerte	pas réactif	filler (farine calcaire et poudre de quartz), fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétiques

hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. Les ajouts se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau (I.2).

Tableau (I.2) : Classification des ajouts selon leur réactivité, d'après [20].

Actuellement, les textes normatifs distinguent (4) types d'additions :

- Additions calcaires "NFP 18-508".
- Cendres volantes pour béton "NF EN-450".
- Laitier vitrifié moulu de haut fourneau "NFP 18-506".
- Fumées de silice "NFP 18-502".

I.2.1.5.3. BENEFCES DE L'UTILISATION DES AJOUTS MINERAUX.

A/- Bénéfices fonctionnels

- Incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse).
- Peuvent modifier la nature et la texture des hydrates formés.
- Prise et durcissement pour les ajouts qui interviennent dans le processus réactionnel du ciment avec l'eau.

- Il y a une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton.
- Il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

B/- Bénéfices économiques

- La plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation.
- Comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton pour le coût du combustible.

C/- Bénéfices écologiques et environnementaux

- Diminution de l'émission du (CO₂) par l'industrie cimentière.
- Elimination des sous-produits de la nature.

I.2.1.5.4. LA POUZZOLANE

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés économiques. Elles sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. [7, 23].

Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers: Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques, en renforcement l'imperméabilité et de la durabilité, à la réduction des réactions alcalins agrégats et du retrait au séchage.

Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland.



(La réaction pouzzolanique forme le CSH stable dans l'eau), [22].

I.2.1.5.5. LE LAITIER

Dans le procédé de production de fonte dans les hauts fourneaux, le laitier qui surnage au dessus de la fonte est tout de suite refroidi après la coulée et par conséquent rapidement

vitriifié. La majorité des éléments tels que Ca, Mg, Si, et Al sont sous forme de phase non cristalline. Une fois broyé à environ 400 m²/kg à 500 m²/kg, ce produit développe de bonnes propriétés cimentaires. La production des laitiers est liée à celle des fontes à partir des quelles seront élaborés les aciers.

Les laitiers de haut fourneau trouvent leur utilisation surtout dans les ciments et pour les travaux routiers. Il existe d'autres laitiers métallurgiques provenant de métaux non ferreux et qui pourraient être utilisés [24].

I.2.1.5.6. LES CENDRES VOLANTES

Lors de sa combustion dans les centrales thermiques, le charbon pulvérisé passe à travers une zone de très haute température dans le four. Les composants volatiles et le carbone sont brûlés, tandis que les impuretés minérales tel que l'argile, le quartz et le feldspath passent en fusion. Les produits en fusion sont rapidement entraînés vers la zone froide où ils se solidifient en de petites sphères de verre. La majorité de ces sphères sont emportées par le courant gazeux vers l'extérieur. Ces cendres sont récupérées dans un précipiteuse électrostatique. [17].

Les particules de cendres volantes se présentent sous forme de petites sphères de diamètre allant de 1 µm à 100 µm (50 % < 20 µm). La forme et la granulométrie des cendres volantes ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais.

I.2.1.5.7. LES FILLERS

Les normes Françaises (1979) définissent les fillers de la façon suivante : Produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basaltes, laitiers, cendres volantes..) naturels ou non. Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment Portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers. Selon la norme NF P 15-301, la teneur en filler calcaire est limitée à 5 % de la masse du ciment. Compte tenu des liaisons électriques entre cations et anions rompus par broyage du clinker et du gypse, on trouve à la surface des grains de ciment des sites chargés électriquement. Ces grains sont généralement chargés négativement. Selon Bombléd: [6]. IL y a trois fois plus de charges négatives que positives.

Les fillers se différencient les uns des autres par : leurs origines, 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.

Les fillers sont inertes, s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau, ils sont actifs s'ils ont même partiellement, des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques en présence de ciment et d'eau.

I.2.1.5.8. POUDRE DE SILICE.

Jusqu'en 1985, cette silice n'était pas valorisée. Ces «poussières» étaient d'abord rejetées dans l'atmosphère puis, pour protéger l'environnement, récupérées par filtration des fumées et placées en décharge. Dans les années 1990, la dégradation des infrastructures a placé l'accent sur des préoccupations au niveau de la durabilité du béton et ainsi, la fumée de silice a trouvé application dans la production de béton à haute performance.

Aujourd'hui, la fumée de silice est peut-être un matériau de choix pour les ingénieurs qui conçoivent des bétons aptes à résister à des conditions d'exposition agressives. L'utilisation de la fumée de silice au Canada et discute des nombreuses possibilités d'applications pour les quelles l'usage de la fumée de silice a un effet bénéfique. Les fumées de silice jouent un rôle particulier du fait, de leur composition (taux de silice) à (70 %) et, d'autre part de leur finesse (supérieure à 10 000 m²/Kg).

Explique Pierre-Claude Aïtcin : La dernière génération de (BHP), les bétons de poudres réactives (BPR) faits de sable, de quartz et de fumée de silice broyés, le tout soigneusement dosé, pousse la performance encore plus loin.

La maîtrise de cette technologie permet d'obtenir des bétons dont la résistance à la compression varie de 200 à 800 MPA, ce qui se compare aux meilleurs aciers et composites sur le marché ! Les BPR sont déjà très compacts, beaucoup moins poreux que les autres BHP et ils constituent une barrière quasi impénétrables contre le sel.

La fumée de silice (silica, silica fume) est une poussière très fine avec un effet fortement pouzzolanique, utilisée en qualité d'[ajout](#) et de [stabilisateur](#). Les microsiles sont un sous-produit de la fabrication du silicium et du ferro-silicium.

Au cours de ce processus, on vaporise du sable siliceux à l'arc électrique et puis il est condensé sous forme de fumée de silice dont la taille des particules est comprise entre 0.05 et 0.5 µm. Les microsiles sont composés à 85-95 % d'oxyde de silicium vitreux / hyalin (SiO₂ amorphe), ont une très grande surface spécifique, qui est avec 10-25 m²/g du même ordre de grandeur que la fumée de cigarettes. [20].

I.2.1.5.8.1. EFFET

La fumée de silice est l'ajout pouzzolanique le plus réactif. Contrairement aux [cendres volantes](#), le SiO_2 amorphe commence à réagir après 2 à 3 jours environ. Elle se précipite sous forme de silicate de calcium hydraté (CSH-Gel) avec l'hydroxyde de calcium qui se forme lors de l'[hydratation du ciment](#).

La consommation d'hydroxyde de calcium lors de la réaction pouzzolane conduit à une diminution du PH par rapport à un béton exempt de silices. C'est la raison pour laquelle, il convient dans le cas du béton armé de limiter la quantité maximale de poussières de silice admissibles, par exemple à 11% de la teneur en matières solides de silice, pris par rapport à la quantité de ciment, afin de garantir la protection anticorrosion de l'armature.

Les propriétés rhéologiques exceptionnelles de la fumée de silice, par la forme sphérique de ses grains, permirent de la substituer à l'eau et d'obtenir des matériaux à faible porosité, augmentent ainsi la compacité du béton. En comblant les interstices laissés entre les particules fines et les granulats, elle joue un rôle de lubrifiant. [4].

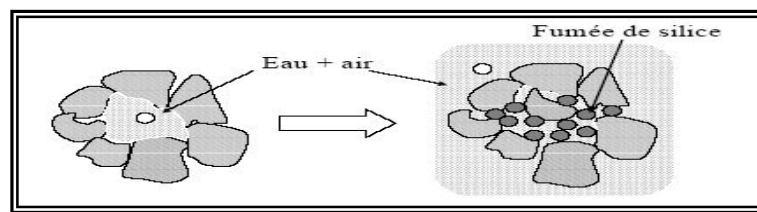


Figure (1.5): Effet de la fumée de silice sur le compactage d'un mélange liant-granulats, d'après [4]

Dans le béton frais les fumées de silice induisent les effets suivants:

- Faible tendance au [ressuage](#), à la sédimentation.
- Meilleure cohésion interne, légèrement thixotrope.
- Bon [pouvoir de rétention d'eau](#)
- Faibles pertes d'air pour le béton à air entraîné.
- Meilleure adhérence sur le support.
- Réduction du rebond et amélioration de la résistance du béton projeté.
- Augmentation du [besoin en eau](#).
- [Consistance](#) plus ferme.
- Le béton frais devient plus «collant».
- L'introduction de pores d'air artificiels est plus difficile.
- Risque accru de fissures liées au retrait précoce.
- Durée de la cure plus importante.

La surface spécifique très élevée implique une augmentation de la quantité d'eau nécessaire à la mise en œuvre du béton. Pour éviter cet excès d'eau, Il est important de noter qu'un superplastifiant est utilisé pour contrôler le retrait au séchage et ajuster la maniabilité du béton sur une période de temps qui permet la mise en place, habituellement entre 15 et 30 minutes et une diminution du potentiel de ségrégation. (Morency & Paradis, 2001).

Les microsilices sont 50 à 100 fois plus fines que le ciment et agissent en qualité de filler entre les grains de ciment. Ceci rend la structure de la pâte de ciment plus homogène et beaucoup plus étanche. La diminution de la perméabilité à l'eau par la fixation de C-H. Améliore les performances mécaniques à longs termes : Résistances en compression et traction. Augmente la résistance contre le gel et/ou les produits de déverglaçage et améliore la résistance contre les agressions chimiques (sulfates, chlorures, etc.). Et la résistance à la réaction alcali-granulat. [Neville, 2000].

I.2.1.5.8.2. LA FUMEE DE SILICE CONFERE AUX BETONS LES PROPRIETES SUIVANTES

- Améliore les performances mécaniques à longs termes : résistances en compression, flexion et traction.
- Augmente le module d'élasticité.
- Réduit le fluage.
- Améliore la résistance à l'abrasion et à l'érosion.
- Améliore la durabilité en milieux agressifs.
- Diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes d'alcali-réaction.
- Diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides.
- Facilite le pompage de tous les bétons mêmes peu dosés en ciment.
- Réduit les risques de ségrégations.
- Réduit la teneur en hydroxyde de calcium, ce qui diminue le risque de lixiviation.

(D'après la Notice technique, Edition avril 2004 ; Sika France S.A.).

I.2.2. FABRICATION

I.2.2.1. COMPOSITION

Le mélange de ciment et d'eau constitue ce qu'on appelle «la pâte de ciment». En y rajoutant du sable, on obtient «un mortier». En y additionnant du sable et un granulat plus gros on obtient «un béton».

La pâte présente à l'intérieure du béton joue à la fois le rôle de liant et de remplissage. C'est l'élément actif du béton et elle représente environ 30 % du volume d'un béton. Les granulats constituent un squelette inerte dispersé dans cette pâte. La présence des granulats dans le mélange limite la propagation des fissures de la pâte due au retrait.

Le choix de la formulation d'un béton impose un compromis entre trois objectifs : une facilité de mise en oeuvre définie par son ouvrabilité, une résistance visée à différents stades de maturation du béton et une durabilité vis-à-vis des agressions physico-chimiques du milieu ambiant.

I.2.2.2. MALAXAGE

Les divers constituants d'un béton sont malaxés de façon à avoir un matériau de composition homogène, ayant par la suite des propriétés uniformes.

Lors d'un essai en laboratoire, il est nécessaire d'adopter rigoureusement une même procédure de malaxage des mélanges afin d'avoir des matériaux ayant des propriétés quasi constantes pour chaque gâchée. Cela concerne à la fois le temps de malaxage, la vitesse de malaxage et la séquence d'introduction des constituants dans le malaxeur. Selon Neville [5], ces paramètres influent de manière significative sur la teneur en air du mélange.

I.2.2.3. TRAITEMENT DE CURE

On entend par traitement ultérieur d'un béton toutes les mesures appropriées visant à protéger le béton mise en oeuvre jusqu'à ce qu'il atteigne une résistance suffisante. Les principaux objectifs du traitement ultérieur sont la protection contre [43, 44]:

- La dessiccation prématurée du béton liée au vent, au soleil et à la faible humidité de l'air.
- Les températures extrêmes et les changements de température rapides.
- Les précipitations.
- Les vibrations, secousses et autres sollicitations mécaniques.
- L'effet prématuré des substances nuisibles.

Les traitements de cure appropriés sont [28, 44]:

- Laisser le béton dans le coffrage.
- Recouvrir et détacher le béton à l'aide de films.
- Mise en place d'un traitement de cure liquide externe.

- Pulvérisation d'eau.
- Ajout d'un produit de cure interne comme dans le béton frais.

Une cure en température a une influence sur la cinétique d'hydratation aux jeunes âges : la formation des hydrates est accélérée avec l'augmentation de la température. Cette accélération influence la texturation et la vitesse de durcissement du matériau.

Si la température de cure dépasse une température seuil (autour de 50°C), les propriétés mécaniques sont diminuées. Sans que cela puisse entièrement expliquer le comportement mécanique du matériau, la distribution de la nanoporosité est légèrement modifiée : la grosse porosité a tendance à augmenter. [36].

I.3. MATURATION DU BÉTON

I.3.1. HYDRATATION

I.3.1.1. DEFINITION

Après le malaxage de l'eau et du **ciment** la pâte de ciment fluide durcit parce que l'eau est absorbée dans les minéraux de clinker amorphes en formant la pâte de ciment. Les réactions chimiques qui se déroulent à cette occasion sont appelées hydratation.

I.3.1.2. ASPECTS CINETIQUES ET PRISE

Les grains de ciment réagissent à leur surface avec l'eau de gâchage, la réaction chimique commence. De très petits produits d'hydratation en forme d'aiguille précipitent et enveloppent les différents grains de ciment (couche fine).

Pour que l'hydratation se poursuive, l'eau doit diffuser à travers les **pores de gel** de la couche de gel de ciment devenant de plus en plus dense et de plus en plus épaisse, jusqu'à ce qu'elle atteigne le noyau non-hydraté. L'hydratation qui est de plus en plus lente n'est jamais entièrement achevée. Une petite partie du ciment reste non-hydraté.

Le grain de ciment hydraté grossit et double à peu près son volume initial. La modification de la résistance à la **déformation** ou l'augmentation de la résistance pendant l'hydratation se subdivise en plusieurs phases. Au fil du temps, le béton frais perd sa **consistance initiale** et prend, jusqu'à ce qu'il ne soit plus ouvrable. Puis le béton se solidifie. Enfin, lorsque la résistance devient mesurable (env. 0.1 N/mm²) on parle de béton durci. [20].

La vitesse d'hydratation dépend de : d'après, [20].

- la température du béton frais et de la température ambiante,
- la nature et de la finesse du ciment,
- de la teneur en ciment et du rapport E/C du béton,
- la nature et du dosage des adjuvants.

L'hydratation d'un matériau cimentaire fait référence à l'ensemble des réactions entre les différentes phases du ciment (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) et l'eau de gâchage. Ces réactions sont exothermiques et sont responsables de la prise et du durcissement des matériaux cimentaires. Le matériau passe alors d'un état de suspension de particules flocculées à celui de solide viscoélastique.

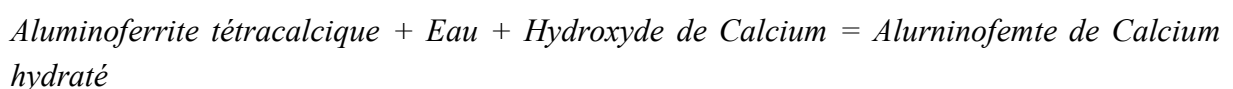
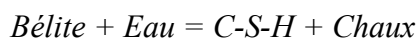
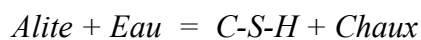
L'hydratation du ciment est un processus très complexe du fait que les réactions de ses différents constituants se déroulent simultanément à des cinétiques différentes et que celles-ci peuvent s'interférer (ex: couplage thermique des réactions).

Dès le contact avec l'eau, les différentes phases du ciment se dissolvent superficiellement et libèrent des ions de calcium (Ca^{2+}), des ions d'hydroxyde (OH^-), des ions silicates ($SiO_4H_2^{2-}$, $SiO_4H_3^-$, $SiO_7H_4^{2-}$), des ions aluminates ($Al_5(OH)^{4-}$, AlO_2^-) et des ions sulfates (SO_4^{2-}).

La vitesse d'hydratation des diverses phases du ciment est différente.

L'aluminate (C_3A) réagit très rapidement et cette réaction est fortement exothermique. En absence de sulfate (provenant du gypse), l'écran d'ettringite ainsi formé bloque l'hydratation des autres constituants du ciment et plus particulièrement le C_3S . Par rapport au C_3S , le C_2S réagit beaucoup plus lentement (10 à 20 fois plus lent) et il n'a pas de rôle majeur sur la structuration de la pâte de ciment à l'état frais.

Voici donc les principales transformations du ciment Portland:



N'y a pas ou plus de sulfates:

Aluminates Tricalcique + Eau = Hydrogrenats

I.3.1.3. CHIMIE D'HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND AVEC AJOUTS

Les différents ajouts minéraux affectent la cinétique de la réaction d'hydratation en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que la forme de leur élément.

La réaction pouzzolaniques se produit par consommation de portlandite, les fumées de silice (SiO_2) permet une réduction de la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et par conséquent une augmentation de la résistance du mélange.

On même temps que l'on mélange le clinker portland et le laitier de haut fourneau. Une petite réaction immédiate du laitier se produit et qui libère des ions calcium et aluminium dans la solution. Par la suite, le laitier de haut fourneau réagit avec les hydroxydes alcalins puis avec l'hydroxyde de calcium libéré par le clinker Portland pour former alors les CSH.

Les bétons dans lesquels des pouzzolanes remplacent une partie du ciment portland témoignent d'un développement de la résistance plus lent que les bétons avec clinker portland, et d'un plus fort durcissement ultérieur en prenant de l'âge, et exige un apport d'humidité suffisant pendant plus long temps [3].

Parmi les facteurs qui caractérisent l'influence des pouzzolanes sur les propriétés du ciment et béton durci : La réaction relativement lente, la consommation d'hydroxyde de calcium, et l'action sur la structure poreuse de la pâte de ciment durcie.

I.3.2. LE DEGRE D'HYDRATATION

Les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux cimentaires dépendent de l'état d'avancement des réactions d'hydratation. Une manière de quantifier l'état d'avancement des réactions d'hydratation du ciment est de calculer son degré d'hydratation qui est défini comme étant égal au rapport de la quantité de ciment ayant réagi sur la quantité de ciment anhydre initiale. [31].

I.3.3. MICROSTRUCTURE DES MATERIAUX CIMENTAIRES

Le processus d'hydratation d'un ciment conduit à un matériau durci composé de plusieurs «phases» [18] de l'agencement desquelles résulte la structure et la texture de la pâte. Ces différentes "phases" peuvent être :

- Des particules de ciment non hydraté ou partiellement hydraté.
- La pâte de ciment, elle-même de microstructure complexe, contenant plusieurs types d'hydrates, de la portlandite et des pores.
- Des bulles d'air, qui constituent une sous-famille spécifique de pores.

Il existe une relation aujourd'hui bien comprise entre la microstructure des ciments et leurs propriétés mécaniques. Elle concerne l'influence néfaste des pores capillaires (porosité à l'échelle supérieure au micromètre) sur la résistance du matériau [9].

I.3.3.1. LA COMPOSITION DU CIMENT HYDRATE

Donc la pâte de ciment hydraté est formée par :

- Les hydrates (CSH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sulfoaluminates).
- Les grains de ciment non hydraté.
- Des espaces capillaires.
- Des bulles d'air.

I.3.3.2. LA COMPOSITION DES HYDRATES

Les hydrates comprennent:

- Les silicates de calcium hydratés (C-S-H).
- La chaux hydratée (portlandite).
- Les aluminates hydratés.
- De l'eau adsorbée sur certains cristaux.
- Des impuretés.

I.3.3.2.1. LES SILICATES DE CALCIUM HYDRATE (CSH)

- Le C-S-H est un gel solide poreux ayant une structure en feuillet et formé de cristaux très petits (20 à 30 angströms). Les forces de Van der Waals sont en partie responsables de la cohésion de ce gel.
- Le PH de la solution interstitielle contenant les C-S-H est très alcalin (voisin de 13). A des PH plus faibles, il peut y avoir lixiviation des ions Ca^{2+} .
- Les C-S-H subissent alors des transformations qui peuvent augmenter leur porosité et diminuer les propriétés mécaniques.
- La porosité du gel de C-S-H représente environ 28 % du volume total du gel.
- Les pores de gel sont extrêmement fins, ils contribuent très peu à la perméabilité de la pâte et du béton.
- La famille des C-S-H est formée d'une grande variété de silicates de calcium hydratés. Une des caractéristiques importantes qui différencie ces espèces est le rapport molaire entre la quantité de calcium et de silicium (rapport C/S). Dans une pâte de ciment ce rapport est compris entre 1,5 et 1,9 [18]).
- Pour des C-S-H de synthèse (C-S-H non formés à partir de ciment), il est compris entre 0,5 et 2 suivant les conditions de synthèse. Certains auteurs [18]) considèrent qu'il existe plusieurs " phases " C-S-H différenciées par leur rapport C/S. Que ce soient les C-S-H (I) et C-S-H (II) pour Taylor [18] ou les C-S-H (α) et C-S-H (β) pour Nonat [12]. Toutefois, leur différenciation dans une pâte de ciment n'a pas encore été démontrée.

I.3.3.2.2. LA CHAUX HYDRATE (CH OU PORTLANDITE)

- La portlandite joue un rôle primordial sur la durabilité du béton mais participe peu au développement de sa résistance mécanique.

- La portlandite à une morphologie hexagonale prismatique (la morphologie est très variable en fonction des paramètres de composition du béton).
- Elle est produite à la suite de l'hydratation du C_3S et C_2S .
- Dans la pâte de ciment hydraté, elle devient instable (lixiviation) lorsque le PH devient inférieur à environ 12,5.

I.3.3.2.3. LES ALUMINATES HYDRATE

Ils occupent de 15 à 20 % du volume de la pâte hydraté. On les retrouve généralement sous deux formes : Ettringite (trisulfoaluminates) aiguilles prismatiques ; Monosulfoaluminates (plaquettes hexagonales). [3].

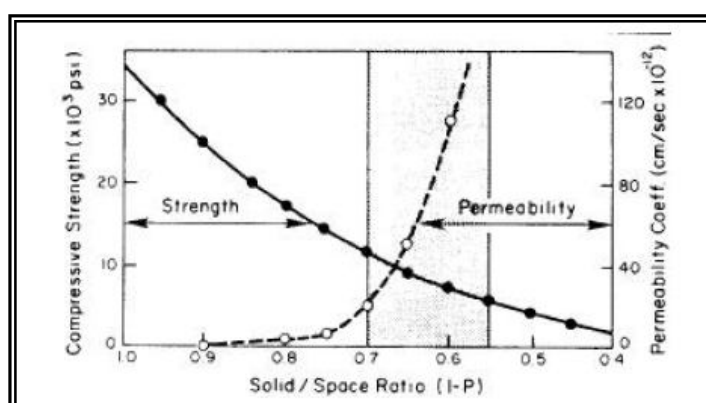
I.3.4. LES PORES

I.3.4.1. DEFINITION

Les pores sont des cavités vides ou remplies d'eau dans le béton durci. La porosité C'est le rapport entre le volume de vides V_v et le volume total V_t d'un corps. La porosité est une propriété volumétrique représentant le contenu des pores qui ne sont pas nécessairement interconnectés, alors que la perméabilité est une propriété d'écoulement qui caractérise la facilité avec laquelle un matériau poreux se laisse traverser par un fluide.

FAGERLUND (1973) a déterminé la courbe représentant la résistance en fonction de la porosité pour des différents mortiers et béton il trouva les courbes obtenues entre la résistance du béton et la porosité du béton et mortier ont les mêmes formes que celles de la résistance de la pâte de ciment.

La porosité est une caractéristique importante des matériaux cimentaires qui lui confèrent plusieurs caractéristiques telles que sa perméabilité, sa résistance, sa durabilité et son comportement rhéologique. On distingue les pores contenus dans les granulats de ceux se trouvant dans la pâte de ciment. La taille et le volume des pores situés à l'intérieur des granulats n'évoluent pas avec le temps et influent sur la résistance du béton à la corrosion. Plus la porosité diminue, plus les propriétés mécaniques augmentent et plus la perméabilité



diminue (Figure (I.6)). Les bétons faiblement poreux sont en général plus durables puisque leur faible perméabilité retarde la pénétration de l'eau, et des autres agents potentiellement agressifs (sulfates, CO_2 , Cl^- , etc....).

Figure (I.6): Relation entre perméabilité, résistance à la compression et niveau de porosité du béton, [25]

Le volume des pores inclus dans la pâte diminue avec la progression d'hydratation et on distingue :

A/- Pores de gel ($\text{Ø} < 40$ angströms)

Il subsiste de petites cavités liées et remplies d'eau appelées pores de gel entre les particules de ciment constituées lors de **l'hydratation**. Dans les conditions climatiques normales, les pores de gel sont remplis d'eau, et quasiment imperméables aux liquides et aux gaz. Les pores de gel contiennent de l'eau qui est en partie adsorbée à la surface des feuillettes de C-S-H. Cette eau est relativement stable et il est difficile de l'extraire par séchage. Les pores de gel n'ont pas une grande influence sur la perméabilité.

B/- Pores capillaires ($0,01 \mu\text{m} \leq \text{Ø} \leq 0,5 \mu\text{m}$)

Le nombre de pores capillaires dépend directement du **rapport E/C** : A partir d'un rapport E/C d'environ 0.40, l'excédent d'eau dans le béton frais est tel que la totalité de l'eau ne peut plus être liée par voie chimique ou physique lors du durcissement.

L'excédent d'eau reste dans le béton en durcissement et donne ainsi lieu à une formation de pores capillaires relativement grands, de forme oblongue et reliés en réseau. Lorsque le béton durci est exposé à un climat sec, l'eau peut s'évaporer des pores capillaires.

Après la pluie, les pores capillaires se remplissent d'eau et d'éventuels sels de déverglaçage ou autres substances toxiques peuvent être transportées dans le béton. En hiver, le gel de l'eau dans les pores capillaires peut provoquer la destruction de la structure du béton sous l'effet de la pression exercée par la glace.

Une cure à température trop élevée ou avec un rapport E/C trop grand augmente la porosité et diminue les propriétés mécaniques, l'ajout de fumée de silice densifie le matériau. [36].

La perméabilité du matériau est essentiellement dépendante du volume et de la taille de ces pores capillaires. Les pores capillaires peuvent être réduits à l'aide de superplastifiant, qui pour une **ouvrabilité** équivalente, permettent d'obtenir un rapport E/C inférieur.

C/- Pores d'air artificiels ($10 \mu\text{m} \leq \text{Ø} \leq 1 \text{mm}$)

Les pores d'air artificiels sont de forme sphérique et isolés les uns par rapport aux autres. Ils sont introduits dans le béton frais par des **entraîneurs d'air (LP)**, pour interrompre les pores capillaires et augmenter la résistance au gel et au sel de déverglaçage. Ces bulles occupent 5 à 20% du volume du béton frais dans le coffrage. [39].

D/- Pores de compactage

Les pores de compactage restent après la mise en oeuvre, se **compactent** involontairement dans le béton frais et réduisent la résistance à la compression comme les pores d'air artificiels. Les pores de compactage sont éliminés dans la mesure du possible par un compactage effectué dans les règles de l'art.

I.3.4.2. L'INFLUENCE DE RAPPORT E/C SUR LA POROSITE

Le rapport eau/ciment exerce une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydraté car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage. Sur la figure (I.7), on voit clairement que plus le rapport E/C est faible, plus, initialement, les grains de ciment sont rapprochés les uns des autres.

Les espaces à combler entre les grains de ciment sont moins grands et il y a moins de chance d'avoir un grand vide ne pouvant pas être complètement rempli par les hydrates.

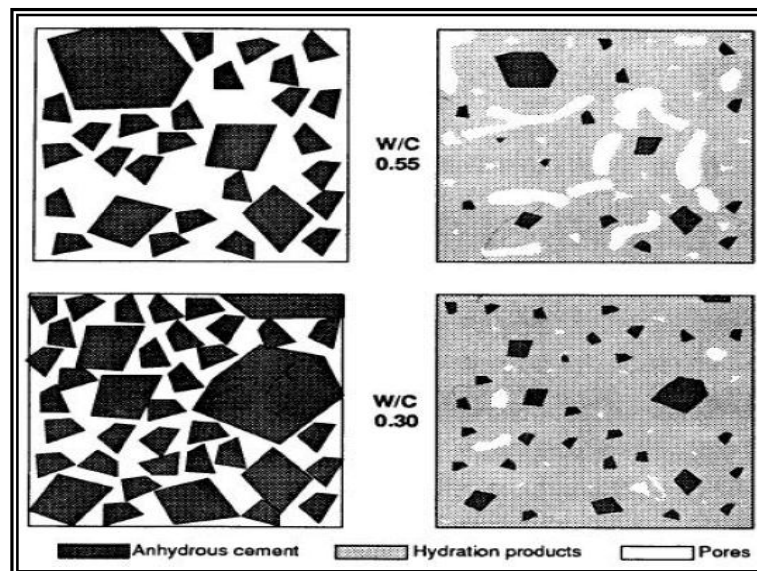


Figure (I.7) : Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci, [16]

Même une très faible quantité d'hydrates peut permettre de combler les espaces inter granulaires. C'est en partie ce qui explique que les bétons avec E/C faible développent très rapidement leur résistance.

L'influence du paramètre E/C sur l'avancement de l'hydratation est très complexe. D'après Boivin [38], de faibles valeurs du rapport E/C entraînent un ralentissement des réactions d'hydratation au jeune âge. Une concentration élevée en C-S-H est obtenue plus rapidement quand la quantité d'eau interstitielle est faible.

Au-delà de cette période, une baisse du E/C produit l'effet contraire. Powers [33] explique ceci par le fait qu'à faible teneur en eau, la quantité d'eau disponible pour l'hydratation devient rapidement très rare une fois que l'eau contenue dans les pores capillaires est épuisée. Ce manque d'eau se traduit alors par un ralentissement des réactions d'hydratation. Selon Acker [35] et Barognel-Bouny [42], cette théorie de Powers n'est pas justifiée étant donné que l'eau retenue entre les feuillets de C-S-H (Eau zéolitique) reste encore disponible pour l'hydratation lorsque la totalité de l'eau capillaire est consommée.

La porosité du matériau dépend de sa teneur en eau initiale. La taille des pores est d'autant plus petite que le rapport E/C est faible. Selon Barognel-Bouny [42], les pores des gels sont d'autant moins importants que le rapport eau/solide est faible. Or, plus les pores sont fins, plus les dépressions capillaires sont élevées et les pressions baissent beaucoup plus rapidement.

□ Intuitivement on peut effectuer le raisonnement suivant :

A) Supposons que l'on utilise une très grande quantité d'eau pour une très faible masse de ciment (E/C élevé). Les grains de ciment seront donc très éloignés les uns des autres et, après s'être complètement hydratés, il restera un surplus d'eau important, Donc, une porosité capillaire très importante. La perméabilité du béton sera très grande et ses propriétés mécaniques seront très faibles.

B) Inversement, si la quantité d'eau est très faible par rapport à la masse de ciment (E/C faible). Les grains de ciment sont très près les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très peu de porosité capillaire.

La perméabilité du béton sera très faible et les propriétés du béton seront très élevées. Cependant, on aura utilisé beaucoup trop de ciment car une grande partie de celui-ci n'aura pas pu réagir par manque d'eau.

A partir de mesures expérimentales de base, on peut calculer plus précisément la relation entre le E/C et volume de la porosité capillaire (composition et hydratation du ciment Portland [Pigeon, 1981]). Sachant que:

- L'eau combinée chimiquement représente 23 % du poids du ciment non hydraté.

- Le volume des produits d'hydratation est égal au volume du ciment non hydraté plus 0,746 fois le volume d'eau combiné chimiquement.
- La porosité de l'ensemble des hydrates est de 28 % (eau).

D'un point de vue strictement chimique, en équilibrant les réactions d'hydratation du ciment, un rapport E/C = 0,22 suffit pour hydrater tout le ciment. Cependant, Powers a montré que pratiquement, et d'un point de vue physicochimique, il faut un rapport E/C minimal de 0,42 (système scellé).

En effet, pour que la réaction d'hydratation se poursuive, une certaine quantité d'eau doit être adsorbée par les hydrates (eau de pores de gel) sans que celle-ci soit liée chimiquement, sa présence dans les hydrates étant absolument nécessaire à leur formation

La figure (I.8) permet de résumer l'influence du E/C sur la porosité de la pâte de ciment hydraté. On y présente la fraction volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 100 % d'hydratation (conservation dans l'eau).

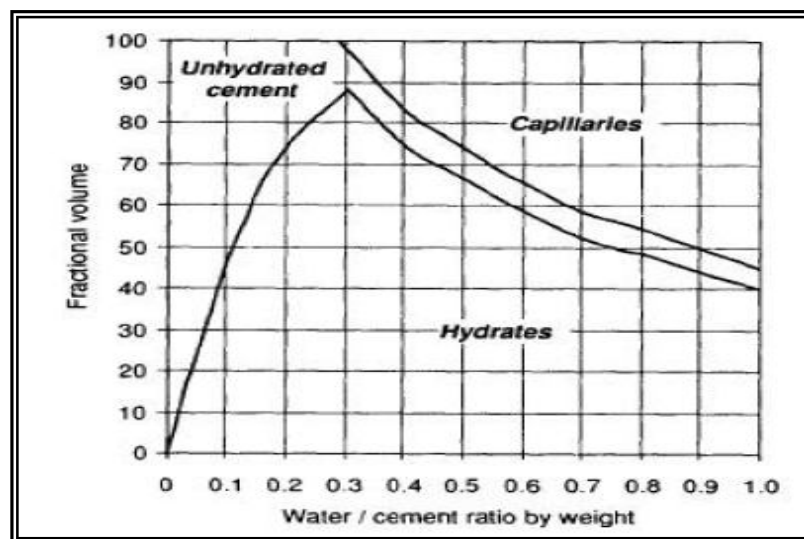


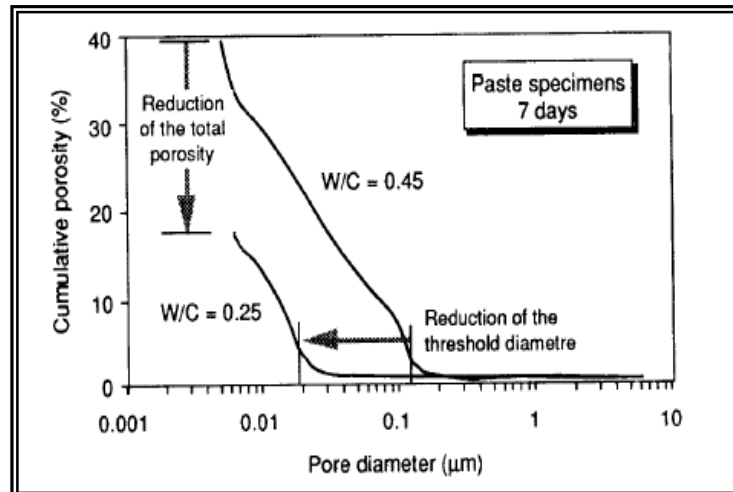
Figure (I.8) : Proportion volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 80 % d'hydratation dans l'eau, [19]

En pratique, l'hydratation n'est jamais complète car les plus gros grains de ciment ne s'hydratent jamais complètement. A un certain stade de leur hydratation, ils sont recouverts d'une coquille d'hydrates très dense qui empêche l'intérieur du grain de réagir avec l'eau environnante. C'est pour cette raison qu'en pratique, même dans les pâtes fabriquées avec un E/C très faible (0,25) il subsiste toujours une certaine porosité capillaire.

La réduction du rapport E/C permet non seulement de diminuer le volume total des pores capillaires mais elle permet aussi de réduire leur diamètre. Pour un E/C plus faible la porosité

capillaire est en fait constituée d'un réseau de pores plus fin et plus discontinu. Ce phénomène est illustré sur la figure (I.9).

En réduisant le E/C de 0,45 à 0,25, le volume total de la porosité passe de 40 % à moins de 20 % et, en même temps, le diamètre moyen des plus gros pores est diminué par un facteur de



l'ordre 10.

Figure (I.9) : Courbe de porosimétrie au mercure de deux pâtes de ciment conservées pendant 7 jours dans l'eau, [16]

En général, il est préférable que le réseau de pores capillaires soit constitué de pores les plus petits possibles car le degré d'interconnexion y est plus faible. La perméabilité de la pâte s'en trouve alors considérablement diminuée car il y a très peu de chemins préférentiels pour le passage des liquides, des gaz ou des ions potentiellement agressifs.

I.3.5. LE RESSUAGE

Le ressuage est une forme de ségrégation du béton frais. On entend par ressuage ou séparation/rejet d'eau, la propriété de sédimentation du béton frais entre le moment du [compactage](#) et le [début de la prise](#). La durée de ce phénomène est d'environ deux à trois heures pour le béton, mais elle peut dans des circonstances exceptionnelles atteindre cinq à six heures.

En vertu de la loi de gravitation, les matières solides ont tendance à s'enfoncer, tandis qu'une partie de l'[eau de gâchage](#) remonte à la surface de la masse de béton frais. Le risque de ségrégation est d'autant plus important que la teneur en eau du béton est élevée. Le ressuage du béton s'accompagne d'un "tassement" du béton frais, le béton durci présentant alors un volume inférieur à celui du béton frais. [20].

Le ressuage entraîne une détérioration de l'homogénéité du béton, étant donné que l'eau de gâchage refoulée contient de fines particules de ciment et de sable très fin. La solution aqueuse constituée de ciment et «d'eau de ressuage» stagne à la surface. La réaction chimique entre l'hydroxyde de calcium dissous et dans «l'eau de ressuage» et le dioxyde de carbone contenu dans l'air provoque un dépôt calcaire à la surface (carbonatation). Les dépôts (calcaire, [ciment](#) et sable très fin), également appelés lait de ciment, sont reconnaissables par une coloration grise/blanche visible à la surface du béton et indiquent une résistance inférieure à celle d'une surface en béton standard. [20].

Il est possible de réduire la tendance au ressuage du béton en augmentant le [pouvoir de rétention d'eau](#). Par ailleurs, une modification du déroulement de la construction et de la géométrie de l'élément peut avoir des influences favorables. Plusieurs mesures basées sur la technologie du béton et permettant la diminution du ressuage sont : [20].

- Augmentation de la surface spécifique par l'emploi d'un ciment plus fin.
- Augmentation de la [teneur en matières fines](#) par une teneur en ciment plus importante (rapport eau/fines < 0.40).
- Augmentation de la teneur en matières fines par l'adjonction d'[ajouts](#) ayant une granulométrie très fine (rapport eau/fines < 0.40).
- Réduction de la teneur en eau par adjonction d'un superplastifiant.

I.3.6. RETRAITS

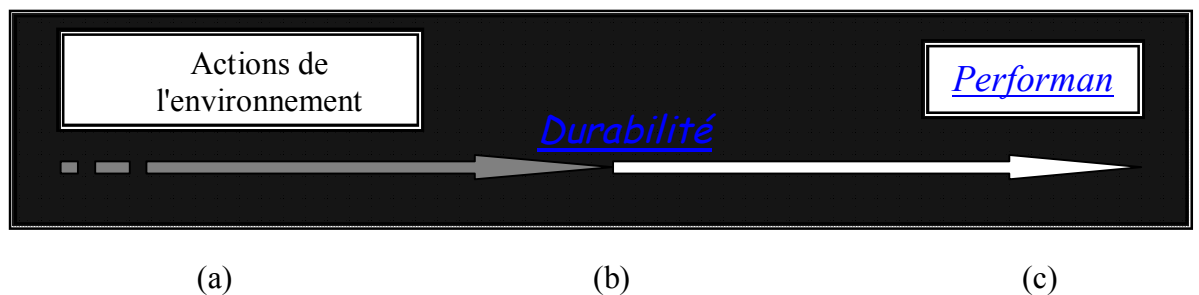
Le retrait et le gonflement sont de lentes modifications du volume du béton en durcissement ou durci qui dans le cas du béton à [granulats denses](#) sont liés à la modification de l'état d'humidité de la pâte de ciment.

Le gonflement étant une augmentation du volume résultant de l'absorption de l'humidité. Le retrait constitue une diminution du volume consécutive à l'évacuation d'humidité, on distingue une composante exogène, due à des gradients hydriques ou thermiques régnant entre le matériau et le milieu environnant, et une composante endogène générée par le matériau lui-même sans échange avec l'extérieur, et le retrait de carbonatation et le retrait autogène.

I.4. LA DURABILITÉ

Des termes qualitatifs ont été utilisés, comme l'indique Sjoström (1983), pour décrire la recherche ou les tests qui reflètent la mesure de la longévité des matériaux de construction dans un sens large. Ces termes sont durabilité, performance et durée de vie.

- La durabilité définit la durée de la persistance de certaines caractéristiques et allure de leur évolution dans le temps sous l'effet des agents agressifs de l'environnement.
 - La performance décrit l'ensemble des caractéristiques physico-mécaniques, de la résistance aux agressions et de la durabilité vis-à-vis d'exigences imposées.
 - La durée de vie décrit la période de temps après sa mise en oeuvre durant laquelle toutes les propriétés d'un matériau dépassent le seuil minimal acceptable. Un matériau a une durée de vie limitée car il subit graduellement des modifications chimiques, physiques et mécaniques qui réduisent sa performance.
- Pour mieux assimiler ces définitions, l'auteur a proposé le schéma suivant:



- (a) Comprend tous les facteurs de dégradation affectant un matériau, traduit la résistance du matériau à la dégradation.
- (b) Déterminer les caractéristiques spécifiques à mesurer qui seront considérées comme indicateurs de dégradation.
- (c) Est une fonction qui décrit la variation dans le temps des propriétés spécifiques de mesure choisies.

I.4.1. LA PERMEABILITE

I.4.1.1. DEFINITION

La perméabilité du béton est un autre paramètre fondamental contrôlant la durabilité des structures. Est l'aptitude d'un corps à se laisser pénétrer et traverser par l'air, par la vapeur d'eau ou par l'eau à l'état liquide. 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. Un écoulement de cette eau capillaire interstitielle apparaît lorsque le matériau subit une dessiccation ou lorsqu'il est soumis à un gradient de pression ou de concentration.

I.4.1.2. L'INFLUENCE DE RAPPORT E/C SUR LA PERMEABILITE

Le rapport E/C exerce une très grande influence sur la perméabilité à l'eau de la pâte de ciment hydraté (Figure (I. 10)).

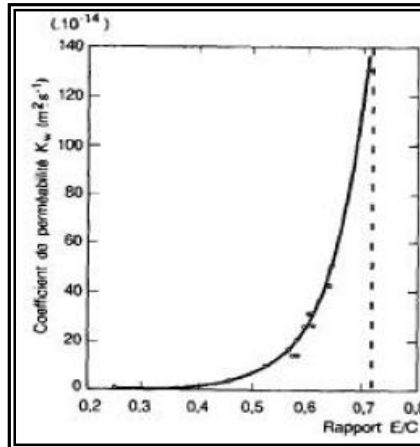


Figure (I.10) : Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydraté et le rapport E/C, d'après [33]

Plus le E/C est faible, plus la perméabilité de la pâte diminue. La chute est très rapide entre 0,7 et 0,6 puisque c'est dans cette plage que le réseau de pores capillaires devient discontinu.

La fumée de silice permet de réduire considérablement la perméabilité à l'eau du béton. Cet effet s'explique, une fois de plus, par le fractionnement de la porosité capillaire.

Le remplacement de 10 % du ciment par de la fumée de silice rend pratiquement imperméable à l'eau un béton fabriqué avec un rapport E/L de 0,45.

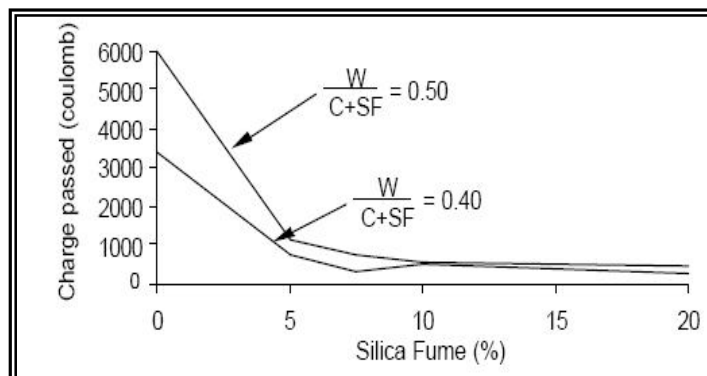


Figure (I.11) : Influence du dosage en fumée de silice sur la charge totale mesurée après 6h. D'après [34]

La fumée de silice diminue très significativement la charge totale après 6h (figure (I. 11)). Le taux de remplacement optimal est d'environ 10 % puisque des taux de remplacement supérieurs ne produisent pas de réduction significative de la charge totale après 6h.

La perméabilité des bétons avec un E/C faible est beaucoup moins sensible à la durée du mûrissement humide (figure (I.12)). Du point de vue de la perméabilité à l'air, les bétons avec un E/C faible sont moins pénalisés par des conditions de mûrissement défavorables.

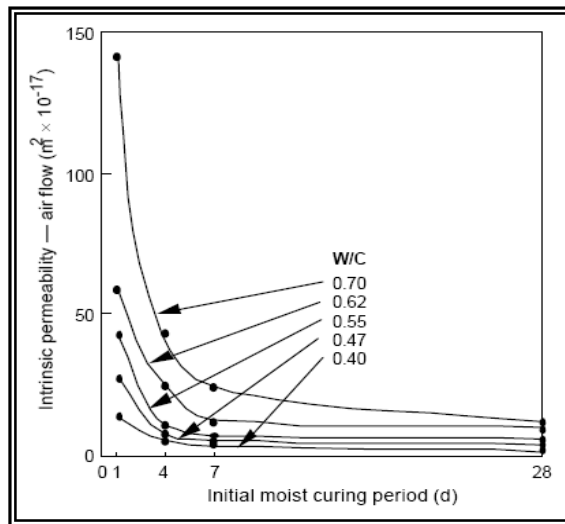
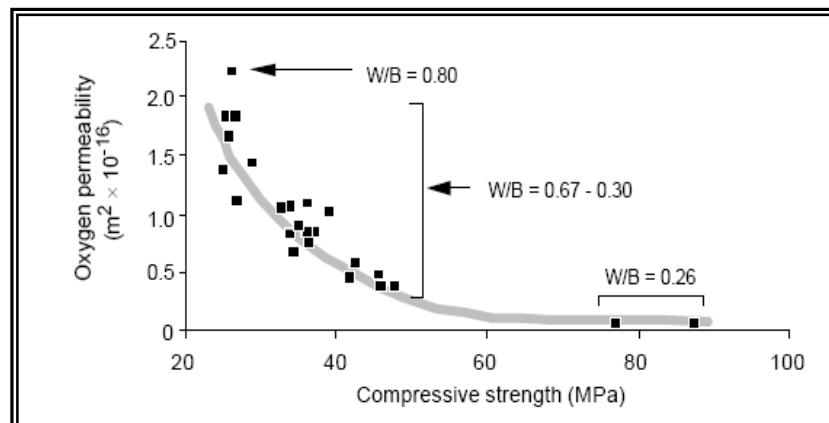


Figure (I.12) : Perméabilité à l'air du béton en fonction du E/C et de la durée du mûrissement humide, d'après [13]

Puisque que la résistance à la compression est étroitement liée à la valeur du E/C, on trouve aussi qu'il existe une relation très nette entre la perméabilité à l'air et la résistance à la compression. La figure (I.13) présente des résultats obtenus avec tout un ensemble de bétons fabriqués avec ou sans ajouts minéraux



(fumée de silice, cendres volantes) et avec des rapports E/L compris entre 0,26 et 0,80.

Figure (I.13) : Perméabilité à l'oxygène de bétons fabriqués avec et sans ajouts minéraux (fumée de silice et cendres volantes) Note : W/B = E/L, d'après [40]

La perméabilité à l'air diminue très peu et semble atteindre une valeur minimale lorsque le rapport E/L devient inférieur à environ 0,30, ou lorsque la résistance à la compression dépasse 60 MPA. (Figure (I.13)). Le remplacement ciment par de la fumée de silice peut réduire la perméabilité à l'air du béton. (Figure (I.14)).

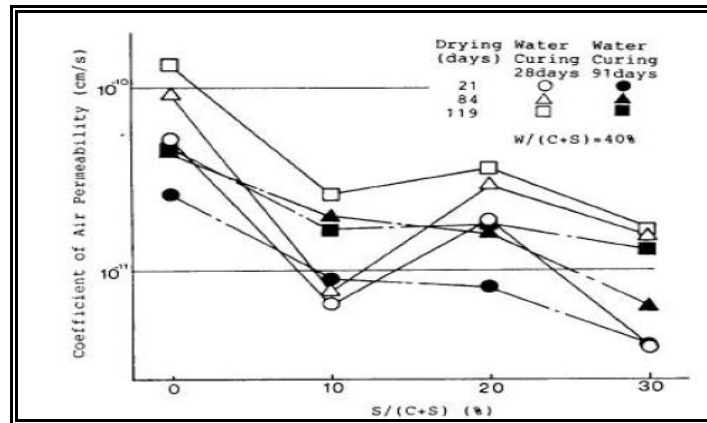


Figure (I.14): Effet du remplacement du ciment par de la fumée de silice sur perméabilité à l'air du béton, d'après [29]

Cet effet peu s'expliquer par le raffinement et la segmentation de la porosité capillaire engendrés par l'hydratation des sphères de fumée de silice (germes de cristallisation). Le taux de remplacement optimal se situe aux environs de 10 %. Pour des taux de remplacement plus élevés, l'effet sur la perméabilité devient très faible.

Le remplacement de 10 % à 20 % du ciment par de la fumée de silice peut réduire de coefficient de diffusion par un facteur de 5 à 10, particulièrement si le E/L est relativement élevé.

I.5. LA DÉFORMABILITÉ

Le béton est un matériau en évolution : ses propriétés se modifient constamment au cours de son existence, l'hydratation du ciment se poursuit pendant longtemps, augmentant ainsi les résistances mécaniques et les modules de déformation. [41].

Le béton soumis à l'action d'une charge assez faible subit une déformation pratiquement instantanée élastique, réversible. Il suit la loi de Hooke bien connue : $\sigma = E \cdot \varepsilon$ Avec :

- σ : Contrainte appliquée.
- E : Module d'élasticité ($1/E$ est le module de rigidité).
- ε : Déformation.

Au-delà d'une certaine charge apparaît une zone plastique. Après suppression de la charge. Il subsiste une déformation permanente. Lorsque la charge est appliquée pendant un certain temps, la "viscosité" du béton qui est très élevée intervient. Il y'a fluage du béton, il se comporte alors comme un corps élasto-visco-plastique. [41].

Certains chercheurs ont même remarqué que pratiquement la fluage ε_f variait comme le carré du rapport en poids (E/C), soit : $\varepsilon_f = K (E/C)^2$. C'est ainsi que le fluage serait doublé en passant d'un rapport E/C = 0.45 à un rapport E/C = 0.65. La compacité joue un rôle important. Certains auteurs ont trouvé qu'une revibration du béton diminuait sensiblement à la fois le retrait et le fluage. [41].

Il a été prouvé par voie expérimentale que pour pouvoir obtenir des bétons basiques à base de laitier granulé possédant une résistance suffisante aussi bien que de bonnes caractéristiques de déformation (Module d'élasticité initial), le liant devrait être dosé à 340-350 kg de liant par unité de volume, la macrostructure est très compacte ou les agrégats sont bien liés au conglomérat fin ainsi les grains d'agrégats sont répartis régulièrement. [27], et cette étude a permis de préciser un certain nombre de points :

- Le module de déformation diminue avec l'augmentation de la contrainte relative.
- La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations élasto-instantanées du béton revêt un caractère rectiligne dans l'intervalle ($\eta = 0 - 0.5$).
- La relation entre contraintes relatives (η) et les déformations totales est curviligne ce qui signale le développement dans les bétons des déformations irréversibles de fluage.

- Une attention particulière doit être prêtée au choix optimal de la microstructure des bétons de manière à ce que la résistance et la déformabilité s'y combinent convenablement. En négligeant ce facteur on risque de compromettre les caractéristiques de déformation que ce soit celles d'un béton à laitier basique ou de toute autre sorte de béton.

I.5.1. LES DEFORMATIONS INSTANTANÉES

Cette courbe [Contrainte-Déformation] s'obtient par enregistrement de F_{bc} - ϵ_{bc} au cours d'un essai de compression sur éprouvette (16×32) cm^2 :

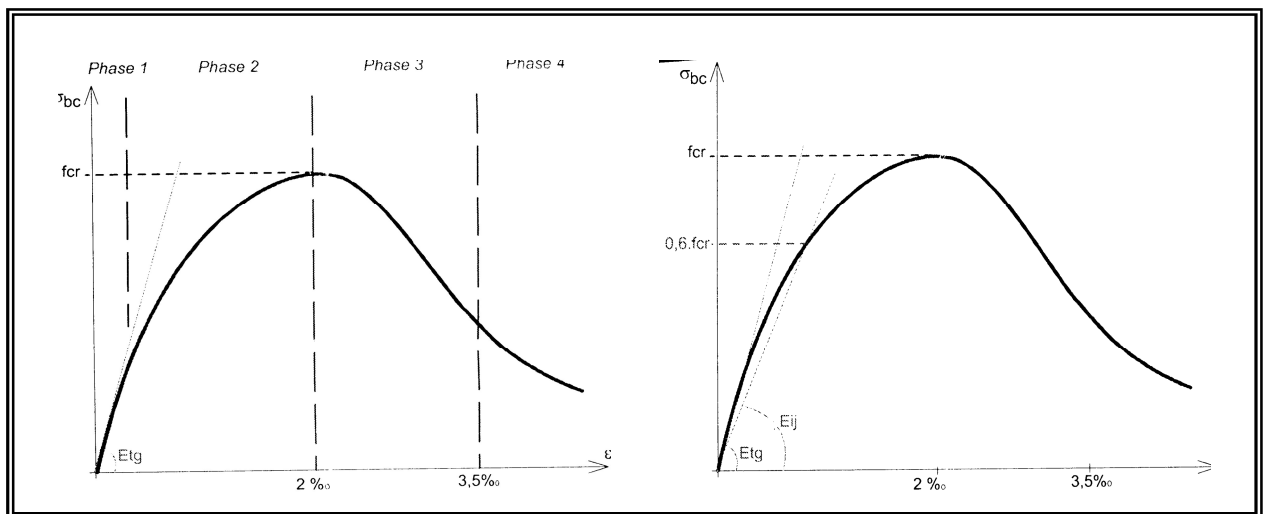


Figure (I.15) : La courbe expérimentale [Contrainte-Déformation] au cours d'un essai de compression sur éprouvette (16×32) cm^2 , d'après [15]

Phase 1 : Le béton se comporte à peu près comme un matériau homogène et élastique, cela se traduit par une relation linéaire : $\sigma_{bc} = E_{tg} \cdot \epsilon_b$ (E_{tg} : Module de déformation tangent).

Phase 2 : Une micro-fissuration due à des tractions transversales se développe, d'où une incurvation progressive de la courbe jusqu'à la résistance F_{cr} . Pratiquement, pour F_{cr} correspond $\epsilon_b = 2 \text{‰}$ (cette déformation est quasiment indépendante de F_{cr}). Puis, la rupture se produit plus ou moins brutalement.

Phase 3 : La fissuration longitudinale se généralise et la courbe redescend lentement pour un béton non fragile, et rapidement dans le cas contraire. L'allure de cette courbe renseigne sur le caractère plus ou moins fragile du phénomène.

Phase 4 : La phase finale a peu d'intérêt.

On définit un module de déformation instantanée sécant E_{ij} pour une contrainte de courte durée ($t < 24h$) et au plus égal à $0.60.f_{cj}$: $E_{ij} = 11000 \cdot \sqrt[3]{F_{cj}}$.



CHAPITRE II
CARACTÉRISTIQUES
DES MATÉRIAUX UTILISÉS
& MÉTHODES D'ESSAIS

CHAPITRE II

CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS & MÉTHODES D'ESSAIS

Ce chapitre présente les différents constituants utilisés, ainsi que leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques.

II.1. CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉES

Afin de définir les caractéristiques des composants du béton, nous avons réalisé les essais suivants :

- Masse volumique absolue et apparente,
- Analyses chimiques,
- Equivalent de sable (ESP & ESV),
- Analyse granulométrique,
- Module de finesse,
- Los Angeles,

II.2. SABLES

Dans notre étude, on a utilisé deux sables de dunes et un sable d'oued dont le prélèvement s'est effectué dans la région de Biskra :

- Sable de dune de la région de Lichana « SD1 »
- Sable de dune de la région de Aïn Bennaoui (El-Hadjeb) « SD2 »
- Sable d'Oued Djedaï de la région de Lioua « SO »

II.2.1. SABLE DE DUNE

Nous avons utilisé le sable de dune prélevé de deux sites différents de la W.Biskra.

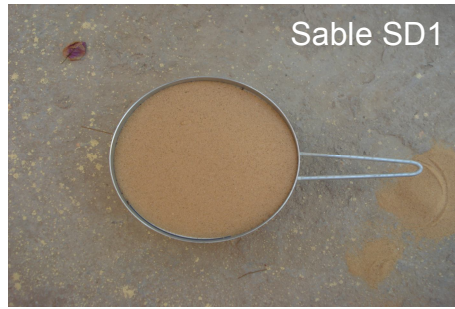


Photo (II.1) : Sables de dunes

II.2.1.1. SABLE DE DUNE 1

II.2.1.1.1. Analyse chimique

Les analyses chimiques sont effectuées au niveau de laboratoire de la cimenterie de AIN-TOUTA, elles sont résumées dans le tableau II.1.

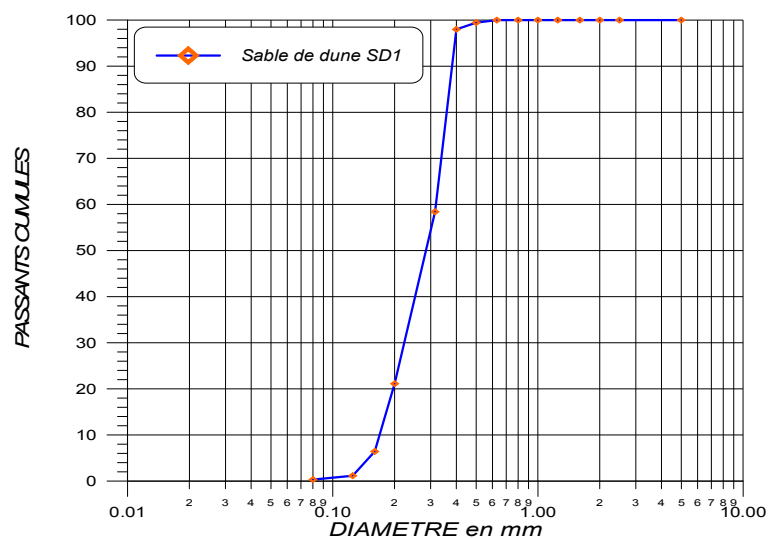
Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	NaCl	CaCO ₃	CO ₃	PAF
(%)	95.31	0.82	0.29	1.69	0.74	0.85

Tableau II.1: Analyse chimique du sable de dune

II.2.1.1.2. Analyse Granulométrique

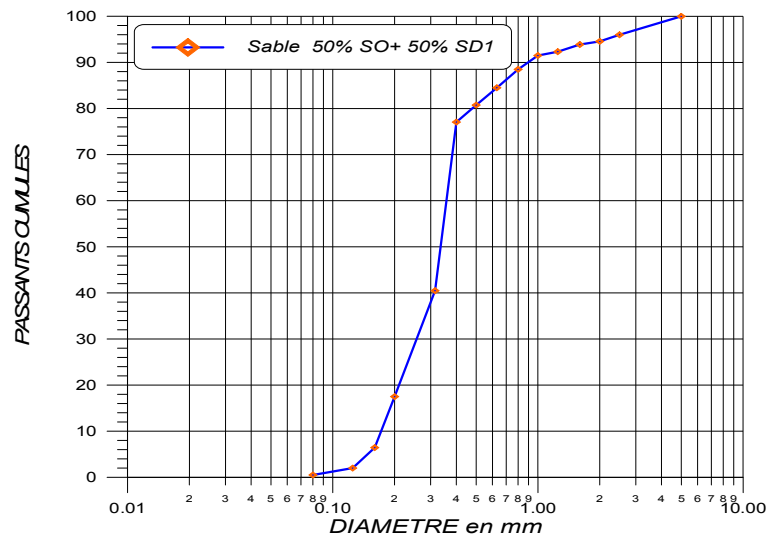
La granulométrie est la caractéristique physique essentielle pour l'identification des matériaux puisqu'elle permet de déterminer la répartition des grains suivant leur grosseur.

Analyse granulométrique sable de dune « SD1 »



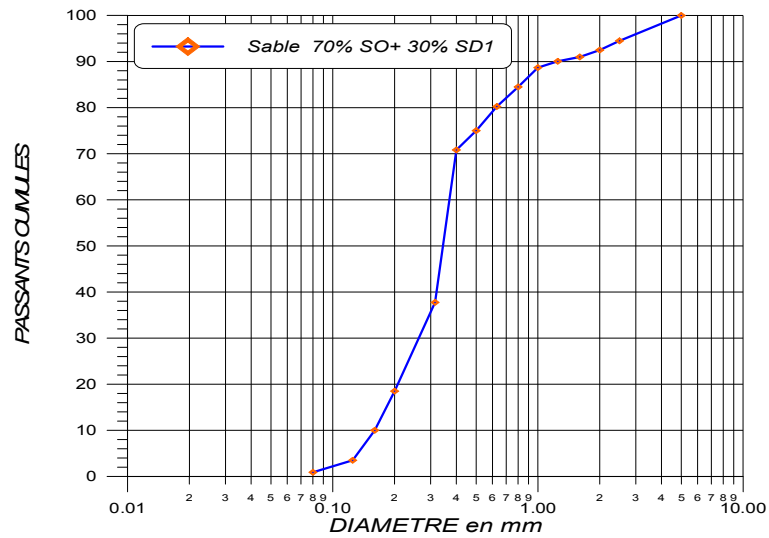
Graphe II.1 : Analyse granulométrique sable de dune « SD1 »

Analyse granulométrique « 50% SO + 50% SD1 »



Graph II.2 : Analyse granulométrique « 50% SO + 50% SD1 »

Analyse granulométrique « 70% SO + 30% SD1 »



Graph II.3 : Analyse granulométrique « 70% SO + 30% SD1 »

II.2.1.1.3. Propriété physique

- Masse volumique apparente = 1330 kg/m³
- Masse volumique absolue = 2760 kg/m³
- Equivalent de sable (ESP/ESV) = 75/93
- Module de finesse = 1.36

II.2.1.2. SABLE DE DUNE 2

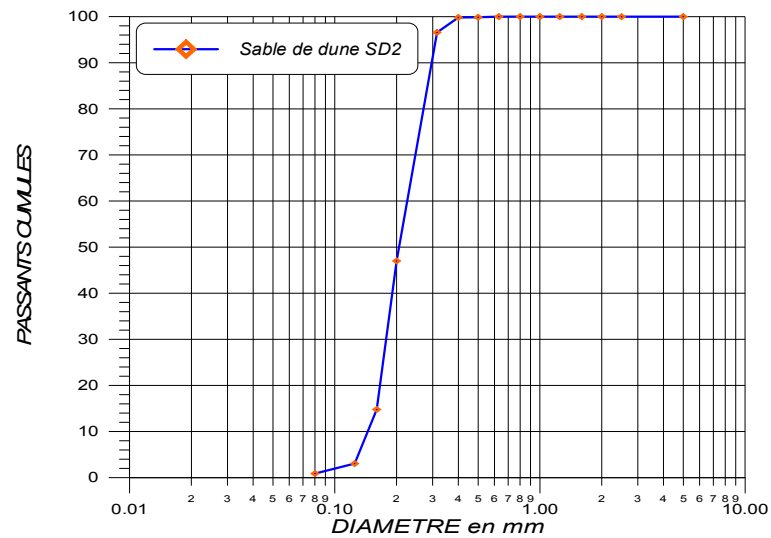
II.2.1.2.1. Analyse chimique

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	NaCl	CaCO ₃	CO ₃	PAF
(%)	87.46	1.25	0.23	4.23	1.86	4

Tableau II.2: Analyse chimique du sable de dune

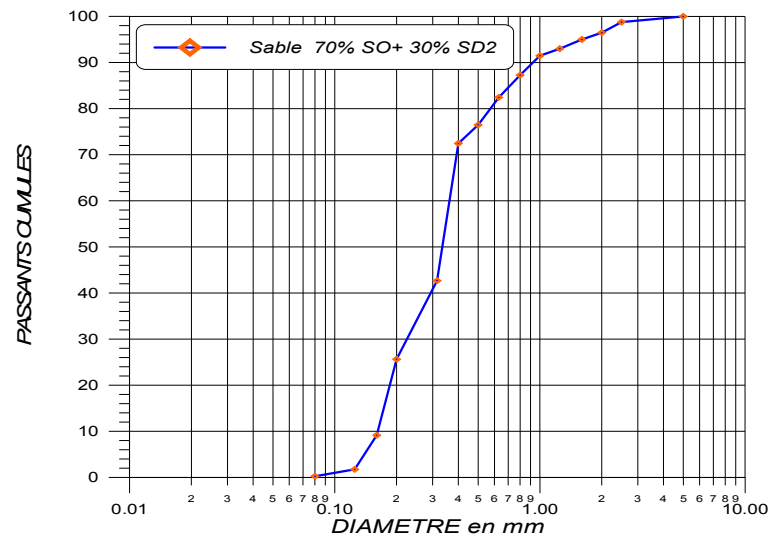
II.2.1.2.2. Analyse Granulométrique

Analyse granulométrique sable de dune « SD2 »



Graphique II.4 : Analyse granulométrique sable de dune « SD2 »

Analyse granulométrique « 70% SO + 30% SD2 »



Graphique II.5 : Analyse granulométrique « 70% SO + 30% SD2 »

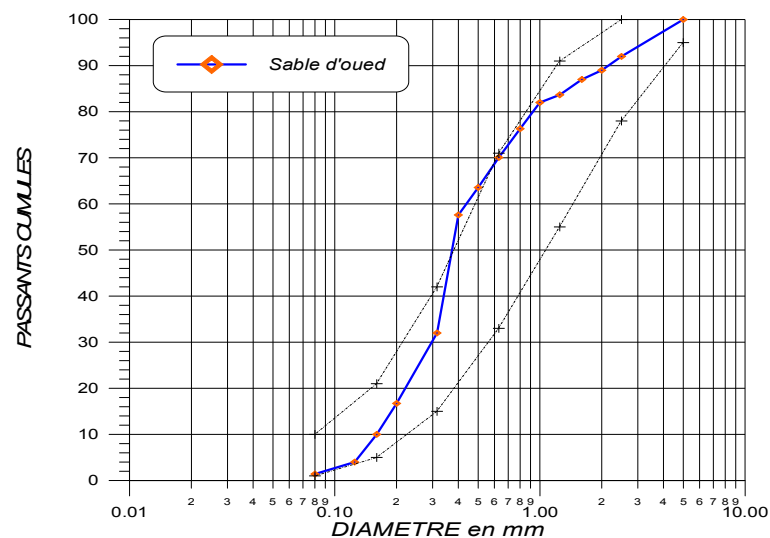
II.2.1.2.3. Propriété physique

- Masse volumique apparente = 1285 kg/m³
- Masse volumique absolue = 2580 kg/m³
- Equivalent de sable (ESP/ESV) = 71/89
- Module de finesse = 1.22

L'analyse granulométrique des deux sables de dune utilisés « SD1 & SD2 » a montré que ceux sont des sables fins en raison du pourcentage élevé des éléments fins (>75%). L'étude des caractéristiques chimiques des sables de dunes utilisés a montrée que ces sables pourraient donner des résistances acceptables grâce à leur propreté et leur composition chimique siliceuses (la nature siliceuse donne souvent de meilleures performances).

II.2.1.3. SABLE D'OUED DE LIOUA

II.2.1.3.1. Analyse granulométrique



Graphe II.6 : Analyse granulométrique sable d'Oued « SO »

II.2.1.3.2. Propriété physique

- Masse volumique apparente = 1480 kg/m³
- Masse volumique absolue = 2550 kg/m³
- Equivalent de sable (ESP/ESV) = 73/80 (sable propre).
- Module de finesse = 2.17
- La courbe granulométrique de notre sable « SO » s'inscrit dans le fuseau recommandé pour la confection des bétons courants. (Graphe II.6).

II.3. CIMENT

II.3.1. Ciment portland avec ajout

Le ciment qu'on a utilisé est un ciment portland avec ajout (CPJ-CEM II/42.5A) de la cimenterie de AIN-TOUTA.

II.3.1.1. ANALYSE CHIMIQUE ET MINÉRALOGIQUE

Elle est contenue dans le tableau II.3.

Composition chimique (%)									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Résidu insoluble	SO ₃	Chaux libre	Cl ⁻	PAF
20.43	5.37	3.00	61.69	1.80	1.12	2.20	0.97	0.027	5.03
Composition minéralogique (%)									
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF			
64.14		10.54		9.16		9.12			

Tableau II.3: Composition chimique et minéralogique de (CPJ-CEM II / 42.5A)

- L'analyse chimique du ciment montre qu'il est conforme à la norme NFP 15-301 à savoir :
% [MgO + CaO (libre)] < 5 % et faible taux de (Cl⁻ < 3.5 %).
- Résistance à la compression à 28 jours : 49.5 MPA.
- Résistance à la flexion à 28 jours : 08.5 MPA.

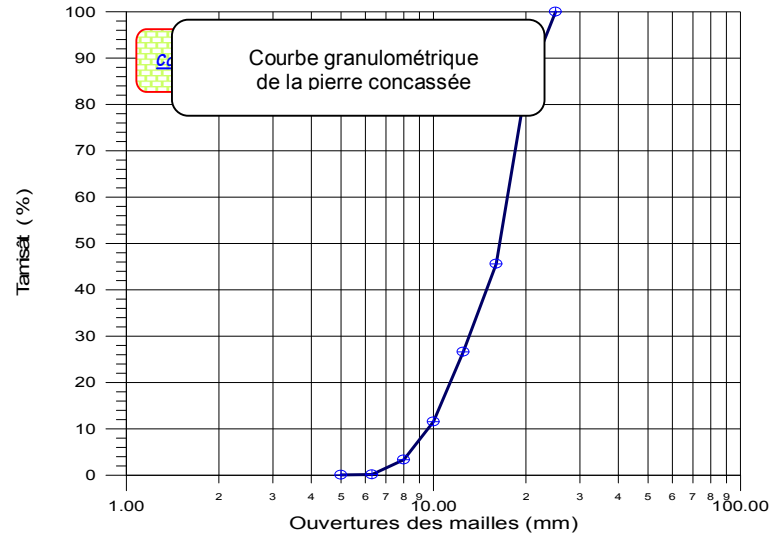
II.3.1.2. PROPRIÉTÉ PHYSIQUE

- Masse volumique apparente = 1080 kg/m³
- Masse volumique absolue = 3150 kg/m³
- Surface spécifique = 4050 cm²/g

II.4. LA PIERRE CONCASSÉE

Dans notre étude, on a utilisé des pierres concassées de fraction 7/15 et 15/25 de la région de AIN-TOUTA.

II.4.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE (GRAPHE II.7).



Graphe II.7 : Courbe granulométrique de la pierre concassée

II.4.2. PROPRIETE PHYSIQUE

- Masse volumique apparente = 1440 kg/m^3
- Masse volumique absolue = 2640 kg/m^3
- Coefficient de Los Angeles = 20 % (Dur).

II.5. L'EAU

L'eau de gâchage utilisée pour la totalité de nos essais de formulation de béton, est une eau courante de robinet, dépourvue des excès de sels, de sulfates et des acides.

Les caractéristiques physiques et chimiques de cette eau sont données par la norme AFNOR P18-303 :

II.5.1. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

L'eau contient des matières en suspension au-delà de :

- 2g/l pour les bétons de type A & B,
- 5g/l pour les bétons de type C.

II.5.2. CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

L'eau ne doit pas contenir les sels dissous au-delà de :

- 15g/l pour les bétons de type A & B,
- 30g/l pour les bétons de type C.

Type A : Béton de haute qualité à forte résistance,

Type B : Béton à grande imperméabilité,

Type C : Béton courant peu ou non armé.

II.6. LES ADJUVANTS

L'adjuvant que nous avons utilisé pour la confection du béton est un superplastifiant « MEDAFLOW 30 ». Cet adjuvant à base de polycarboxylates présente les caractéristiques physiques et chimiques suivantes :

- Densité : 1.07 + 0.01
- PH : 6.00 – 6.50
- Teneur en chlore (g/l) : < 1.00

La principale action pour ce superplastifiant est d'améliorer considérablement les propriétés du béton, il s'agit de fluidifier le mélange de béton par dispersion rapide des particules de ciment qui sinon ont tendance à rester agglomérées au contact de l'eau seule. Cet effet dispersant est obtenu grâce à la répulsion électrostatique créée par la présence de molécules plastifiantes de signe identique qui viennent se coller à la surface des grains de ciment. Dans nos essais, on a utilisé trois taux différents de cet adjuvant pour la confection du béton, soient : 0.50% et 1% à partir du poids du ciment.

II.7. LES AJOUTS

On a utilisé comme ajout au ciment, la fumée de silice désignée par « MEDAPLAST HP » à base de micro silice sous forme de poudre grise commercialisée par GRANITEX. Elle présente les caractéristiques suivantes :

- Densité apparente : 1.87
- Densité absolue : 0.5
- Surface spécifique : 15500 cm²/g

Dans nos essais, on a utilisé un taux fixe de 8% de fumée de silice à partir du poids du ciment.

II.8. MÉTHODES D'ESSAIS

Pour analyser les caractéristiques physico-mécaniques de béton nous avons appliqué les différents essais, qui sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Type d'essai	Norme	Formule	Appareillage	Type de moule
Masse volumique absolue (sable, gravier)	GOST 6427-75	$\varphi = \frac{M}{V_2 - V_1}$	Eprouvette Graduée	----
Masse volumique apparente (sable)	GOST 6427-75	$\varphi = \frac{M}{V}$	Cylindre de volume 1L	----
Masse volumique apparente (pierre Concassée)	GOST 6427-75	$\varphi = \frac{M}{V}$	Récipient de 14 L	----
Coefficient Los angeles	NF-P 18-573	$L_A = \frac{m}{M} \cdot 100$	Appareil Los Angeles	----
Equivalent de sable	NF-P 08-501	$\frac{h_2}{h_1} \times 100$	Eprouvettes Graduées	----
Analyse granulométrique	GOST 8736-77	----	Tamiseuse électrique et les Tamis	----
Consistance (Affaissement)	NF-P18- 451	----	Cône d'abrams	----
Résistance à la compression	GOST 10180-78	$R_c = \frac{F}{S} \cdot \alpha$	Presse Hydraulique	10×10×10 cm ³
Résistance à la traction par flexion	GOST 10180-78	$R_{fl} = \frac{F.L}{b^3} \cdot \delta$	Machine de Flexion	10×10×40 cm ³
Résistance à la traction par fendage	NF-P 18-104 1981	$\sigma = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot L}$	Presse hydraulique	15×30 cm ²
Absorption d'eau	GOST 12730.3-78	$W_m = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$	----	10×10×10 cm ³
Perméabilité	GOST 12730.5-84	$K_p = \frac{Q.H}{S.(P_1 - P_2). \xi} \cdot \eta \cdot K$	Perméamétrie	15×30 cm ²
Déformabilité	----	----	mesurée au moyen d'indicateurs à cadran	10×10×40 cm ³



CHAPITRE III

ÉTUDE DU BÉTON

CHAPITRE III

ÉTUDE DU BÉTON

III.1. INTRODUCTION

Le béton est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime d'un squelette granulaire et d'un liant qui est la pâte de ciment hydratée. L'étude de la technique du béton amène à celle de la structure du mélange et des facteurs déterminant la résistance, la durabilité du béton.

L'accroissement des performances mécaniques et la stabilité de béton obtenu par la réduction de la porosité. On devra rechercher un mélange compact, c'est-à-dire une haute compacité et une faible quantité d'eau de gâchage.

Si l'on recherche une résistance à la traction, on devra en outre, s'assurer d'une bonne adhérence entre les liants et l'agrégat et d'un parfait enrobage.

Une qualité qui paraît avoir aussi une grande importance est l'étanchéité, celle-ci s'oppose au passage des fluides et à la corrosion des armatures. Le béton est d'autant plus étanche, qu'il est plus compacte et qu'il a été gâché avec moins d'eau.

Dans le béton, d'une manière générale, les granulats jouent le rôle d'ossature dans laquelle la pâte assure dans un premier temps un rôle rhéologique (cohésion et fluidité), puis un rôle de colle permettant de développer les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau durci. Ainsi, la formulation d'un béton consiste à optimiser le squelette granulaire par un choix judicieux de proportions de sable et de gravier puis combler la porosité de cet empilement avec la pâte de ciment.

Cette pâte étant elle-même déterminée par le rapport E/C pour viser une résistance et une durabilité à long terme. Améliorer les performances d'un béton, en particulier sa durabilité, revient à lui assurer une meilleure compacité; la durabilité étant négativement affectée par la compacité d'échange avec le milieu extérieur. Mathématiquement la compacité est définie comme étant le volume solide sur le volume total du béton et est égale à $(1 - \text{la porosité})$. Cette compacité qui dépend de la granulométrie du mélange et de sa teneur en eau.

III.2. DEROULEMENT DES ESSAIS AU LABORATOIRE

Notre méthode de travail se résume dans les points suivants :

- Les taux des trois sables utilisés dans la composition du béton sont résumés dans le tableau suivant :

<u>N°</u>	<u>SO</u>	<u>SD1</u>	<u>SD2</u>
<u>B01</u>	<u>100%</u>	<u>0%</u>	<u>0%</u>
<u>B02</u>	<u>0%</u>	<u>100%</u>	<u>0%</u>
<u>B03</u>	<u>0%</u>	<u>0%</u>	<u>100%</u>
<u>B04</u>	<u>70%</u>	<u>30%</u>	<u>0%</u>
<u>B05</u>	<u>70%</u>	<u>0%</u>	<u>30%</u>
<u>B06</u>	<u>50%</u>	<u>50%</u>	<u>0%</u>
<u>B07</u>	<u>50%</u>	<u>0%</u>	<u>50%</u>

Tableau III.1 : Combinaisons de sables

- Les dosages utilisés, pour les différentes combinaisons de sable, sont :
 - C = 350 kg/m³
 - C = 400 kg/m³
- On a confectionné les éprouvettes cubiques 10x10x10 Cm³, à 28 jours pour l'essai de compression.

III.3. COMPOSITION ET DOSAGE DU BÉTON

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal de différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage en cause. Devant la multiplicité des méthodes utilisables pour déterminer la composition du béton. On a cherché celle qui donne des résultats exacts et qui semble être la moins connue. C'est la méthode de B.SCRAMTAIV. Cette méthode repose sur le fait que la somme des volumes absolus des matériaux d'origine dans un mètre cube est égale au volume de la composition du béton damé.

A/- Données de base

- D_{\max} (granulats).
- Résistance à la compression après 28 jours.
- Ouvrabilité (A, C).
- Caractéristiques techniques des matières premières.

B/- Méthode de calcul

- *Détermination du dosage en eau*

$E = F(A, C, D_{\max}, \text{Nature des granulats})$

- *Calcul du rapport C/E*

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A \cdot R_c} + 0,5$$

Pour un béton courant : $C/E \leq 2.5$, pour béton plastique et fluide.

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A_1 \cdot R_c} - 0,5$$

Pour un béton de qualité : $C/E > 2.5$, pour béton fermé et très fermé.

R_b : La résistance à la compression après 28 jours de durcissement normal.

R_c : L'activité du ciment.

(A, A_1) : coefficients de qualité des matériaux utilisés (granulats et ciment)

- Bonne qualité : $A = 0,65$, $A_1 = 0,43$
- Qualité moyenne : $A = 0,60$, $A_1 = 0,40$
- Mauvaise qualité : $A = 0,55$, $A_1 = 0,37$
- *Calcul du dosage en ciment* $C = C/E \cdot E$
- *Calcul du dosage en agrégats (pierres concassées)* $G = 35G_1 + 65G_2$

G_1 : (7/15) ; G_2 : (15/25)

$$G = \frac{1000}{V_v \cdot \frac{\alpha}{\gamma_{app}^G} + \frac{1}{\rho_{abs}^G}}$$

V_v : porosité des pierres concassées.

Coefficient d'écartement de grains $\alpha = 1.24$ (d'après l'abaque).

- *Calcul du dosage en sable*

$$S = \left[1000 - \left(\frac{G}{\rho_{abs}^G} + \frac{C}{\rho_{abs}^C} + E \right) \right] \cdot \rho_{abs}^S$$

C/- Composition du béton

On désire réaliser un béton dont la résistance moyenne R_{b28j} et dont la consistance soit telle que son affaissement au cône soit de 5 cm. Dans tous les essais le rapport $C/E \leq 2,50$, $A = 0.6$, $D_{max} = 20$ mm et $G/S < 2.4$.

	R_{e28j} (MPa)	E/C	E	C (kg/m ³)	G (kg/m ³)	S (kg/m ³)
CPJ	42.5	0.5	175	350	1245	620

Tableau III.2 : Récapitulation de la composition du béton (C = 350 kg/m³)

	R_{e28j} (MPa)	E/C	E	C (kg/m ³)	G (kg/m ³)	S (kg/m ³)
CPJ	42.5	0.5	200	400	1245	550

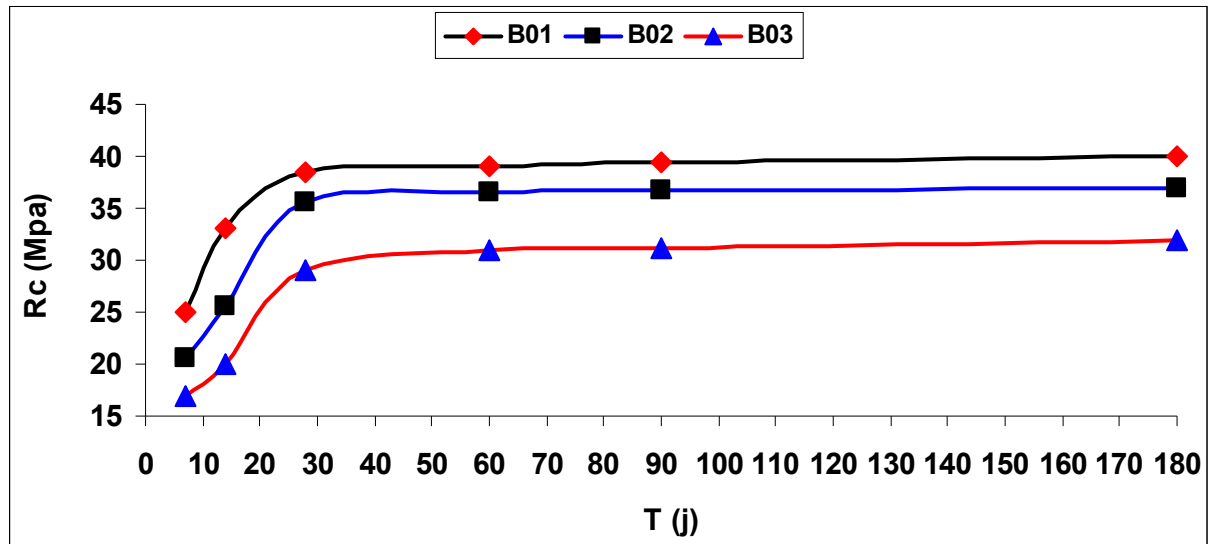
Tableau III.3 : Récapitulation de la composition du béton (C = 400 kg/m³)

III.4. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU BÉTON

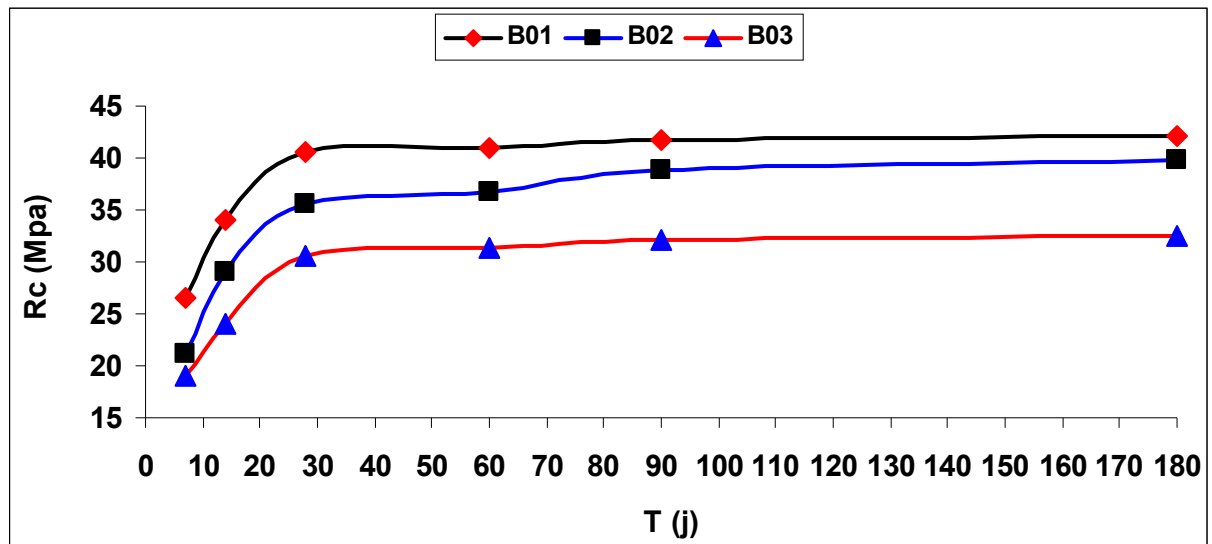
Dans cette partie, il s'agit des essais de compression, flexion et traction par fendage sur des éprouvettes cubiques (10×10×10) cm³, prismatiques (10×10×40) cm³ et cylindriques (16×32) cm², respectivement. Les éprouvettes ont été conservées à l'eau potable pour éviter tout échange d'eau avec l'extérieur, la température a été maintenue constante à 20°C±1°C, car l'évaporation précoce de l'eau peut interrompre rapidement l'hydratation du ciment.

III.4.1 RESISTANCE A LA COMPRESSEION (BETON SEUL)

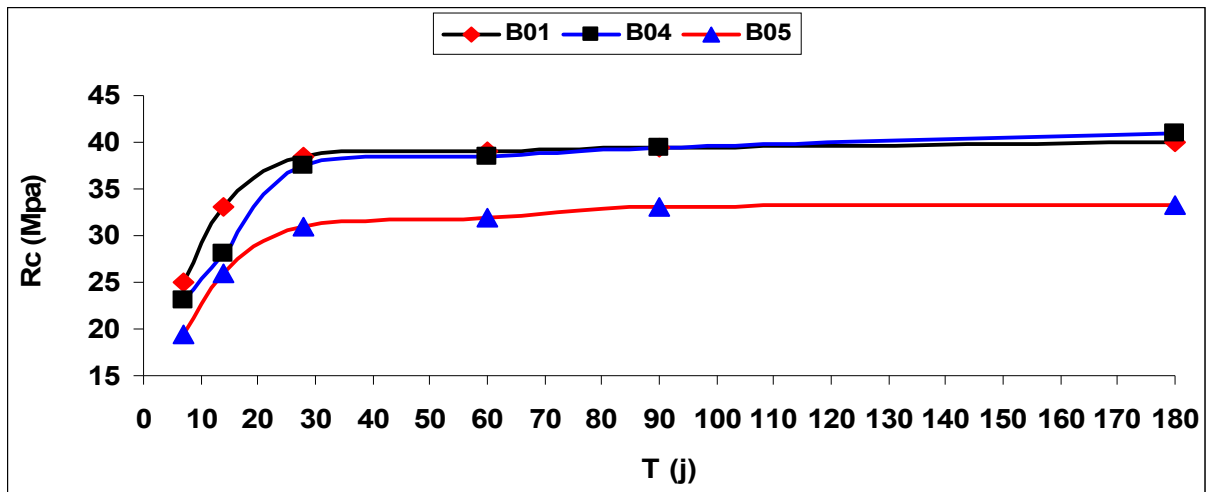
Les résultats obtenus des résistances à la compression à 7 j, 14 j, 28 j, 60 j, 90 j et 180 j, sont rapportés dans les graphes suivants :



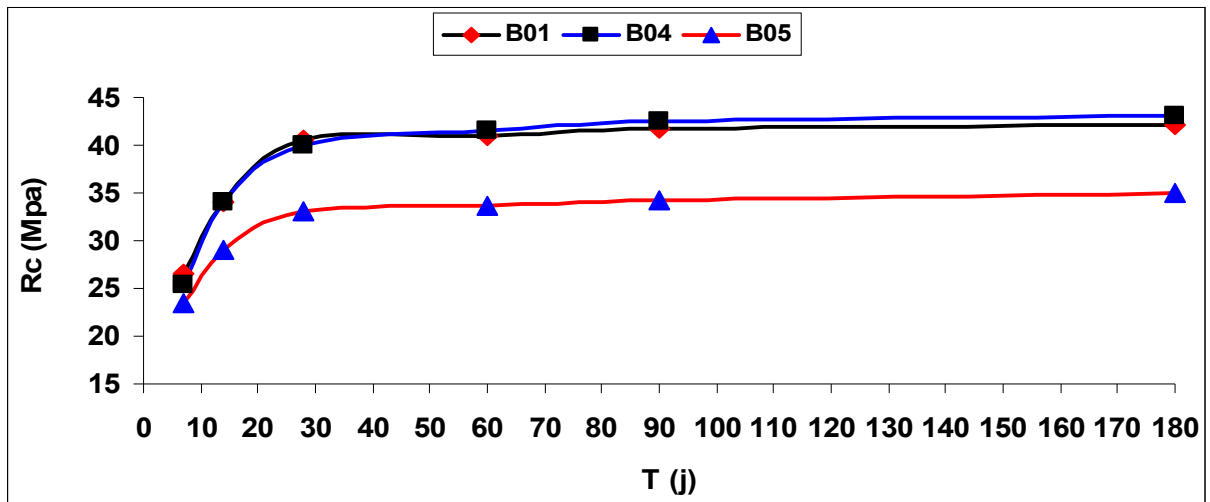
Graph III.1 : Résistance à la compression des bétons (B01, B02 et B03) en fonction du temps et du type de sable 350 Kg/m³



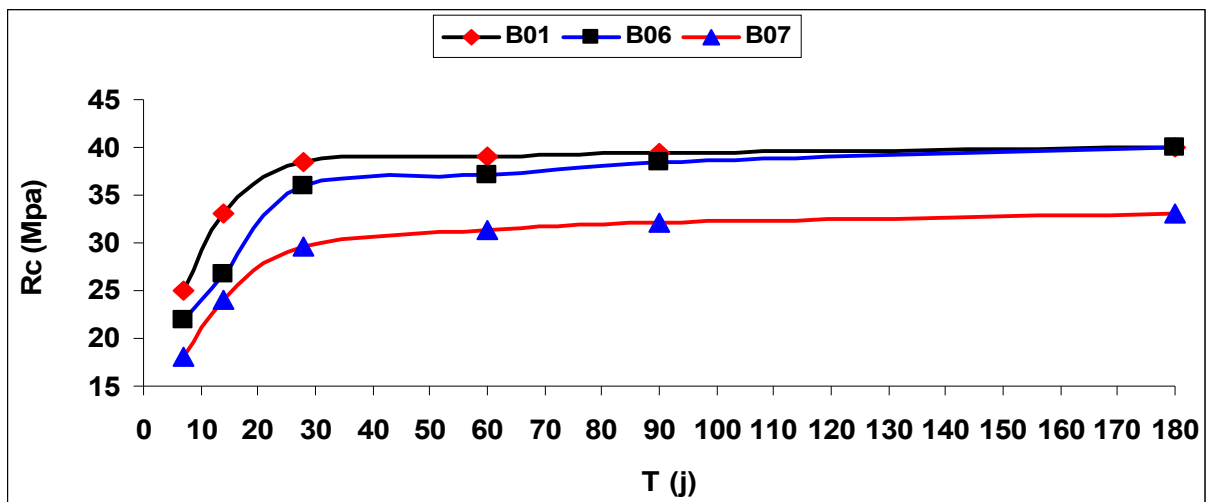
Graph III.2 : Résistance à la compression des bétons (B01, B02 et B03) en fonction du temps et du type de sable 400 Kg/m³



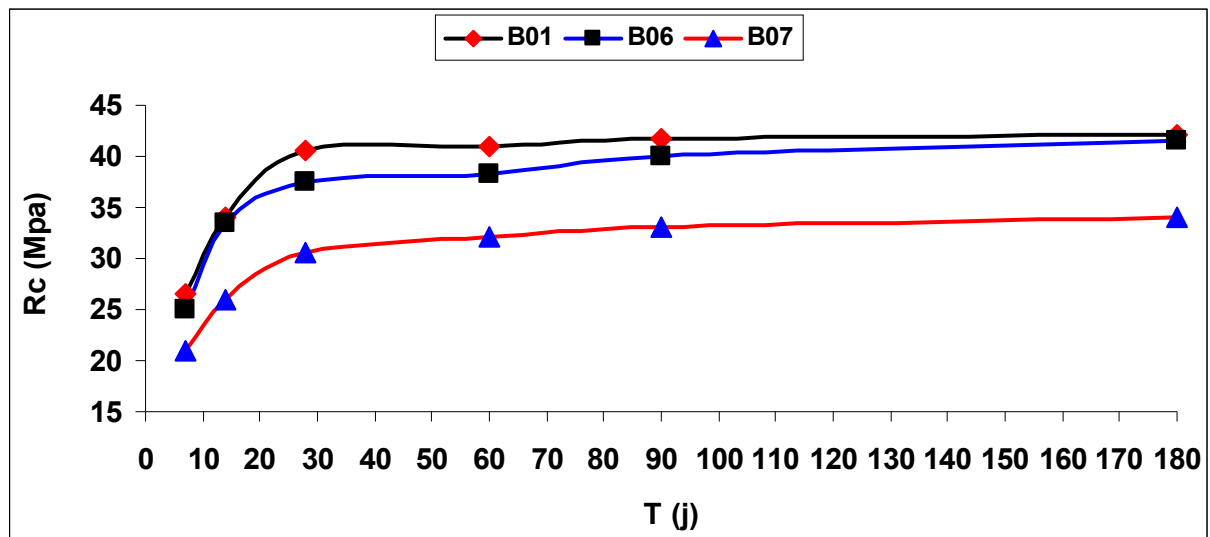
Graph III.3 : Résistance à la compression des bétons (B01, B04 et B05) en fonction du temps et du type de sable 350 Kg/m³



Graph III.4 : Résistance à la compression des bétons (B01, B04 et B05) en fonction du temps et du type de sable 400 Kg/m³



Graph III.5 : Résistance à la compression des bétons (B01, B06 et B07) en fonction du temps et du type de sable 350 Kg/m³



Graph III.6 : Résistance à la compression des bétons (B01, B06 et B07) en fonction du temps et du type de sable 400 Kg/m³

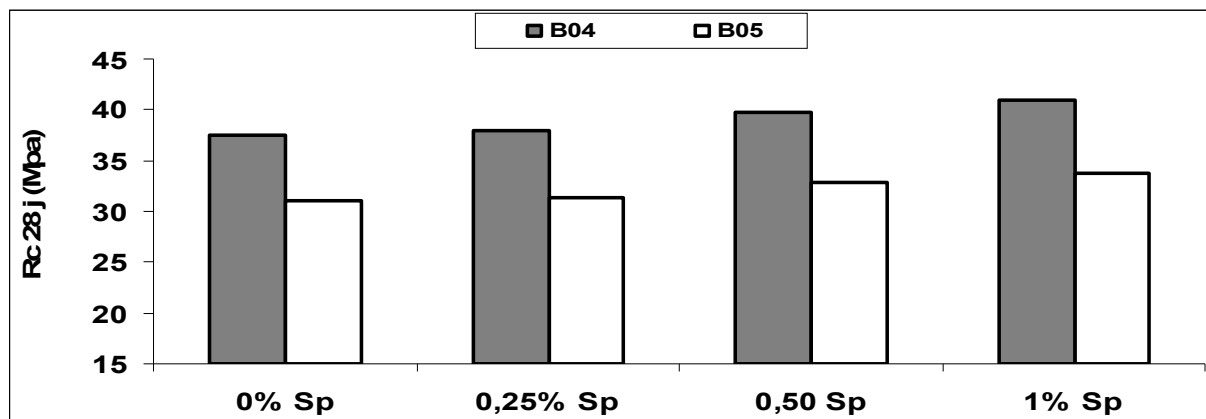
Commentaires :

A partir des résultats des graphiques présentant l'évolution de la résistance à la compression des bétons confectionnées avec les trois types de sables avec deux dosages en ciment différents, on remarque que :

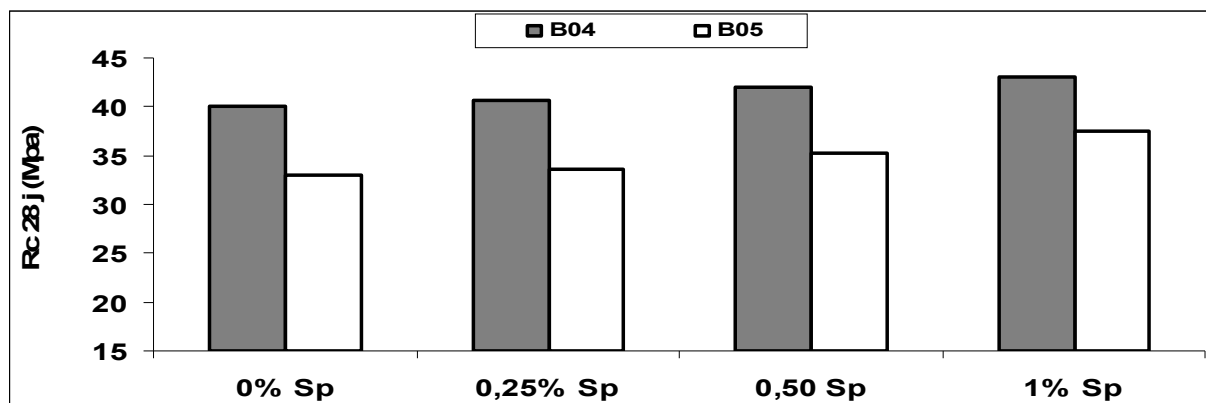
- Toutes les courbes ont la même allure :
- Avant 28 jours : augmentation rapide de la résistance à la compression en fonction du temps
- Après 28 jours : faible augmentation de la résistance à la compression en fonction du temps
- Les courbes des bétons où on a introduit le sable de dunes donnent des résistances inférieures à celle de la courbe de référence du béton confectionné avec le sable d'Oued au même âge et pour un même dosage sauf :
- Les bétons confectionnés à base de (50% SO + 50% SD1), donnent des résistances plus proches à ceux du béton de référence (100% SO), contrairement aux bétons (50% SO + 50% SD2) qui restent loin.
- Pour la courbe à (70% SO + 30% SD1) et pour les deux dosages, la résistance à jeune âge est presque confondue avec la courbe de référence (100% SO) avec une résistance approximative égale à 95% de celle-ci.
- Après 60 jours, la courbe à (70% SO + 30% SD1) et pour les deux dosages, coupe celle de (100% SO), et sa résistance devient proche à cette dernière.

- Pour les courbes où on a introduit SD2 et pour les deux dosages, la résistance reste faible et loin (70% de la résistance) des résultats de la courbe de référence.
- Les résultats ont montré que par l'augmentation de dosage de 350 Kg/m³ à 400 Kg/m³ les résistances à tous âges sont améliorées de 6%.

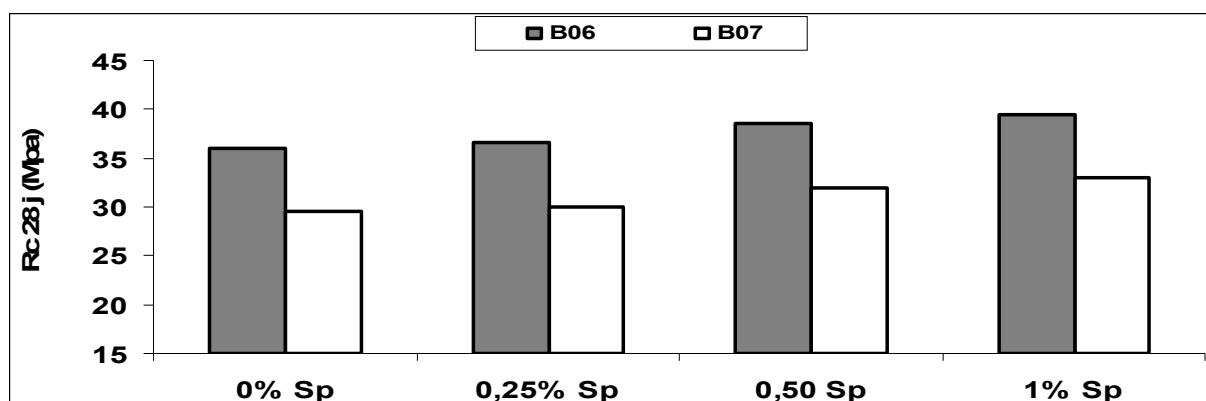
III.4.2 RESISTANCE A LA COMPRESSION (BETON AVEC SUPERPLASTIFIANT)



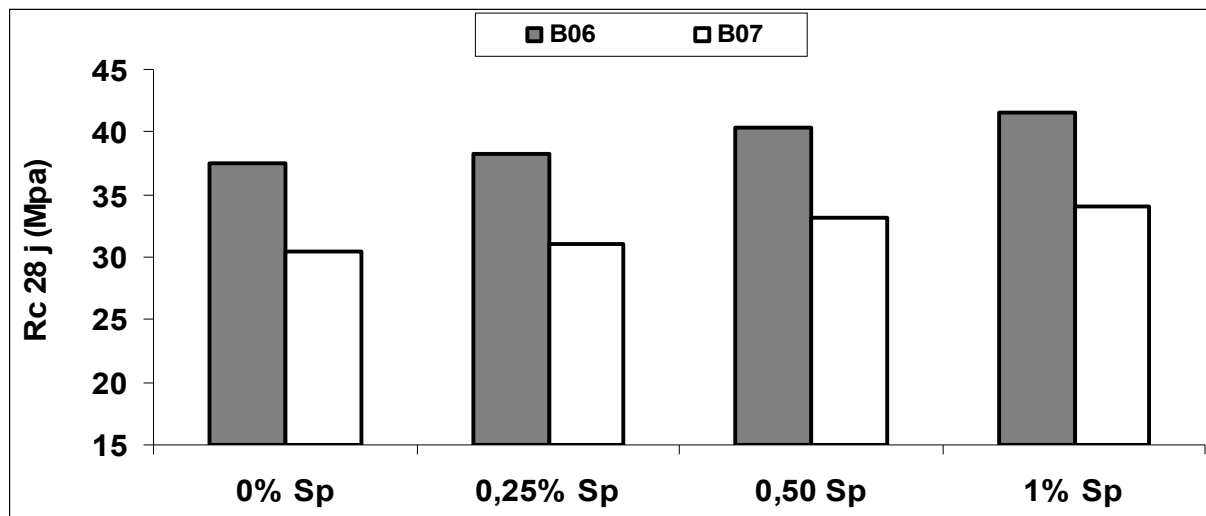
Graphes III.7 : Résistance à la compression des bétons (B04 et B05) dosé à 350 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant



Graphes III.8 : Résistance à la compression des bétons (B04 et B05) dosé à 400 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant



Graphe III.9 : Résistance à la compression des bétons (B06 et B07) dosé à 350 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant



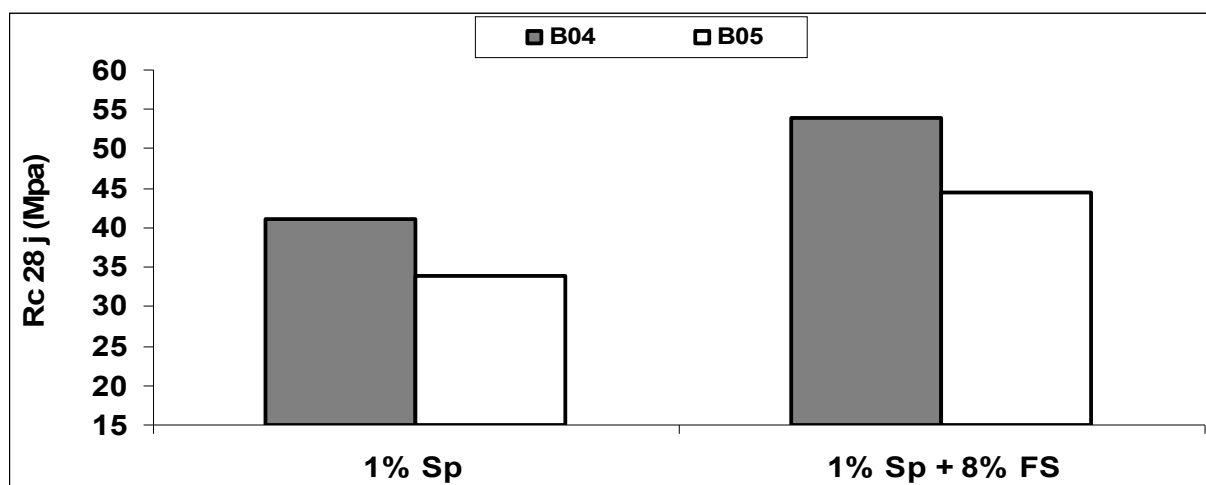
Graphe III.10 : Résistance à la compression des bétons (B06 et B07) dosé à 400 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant

Commentaires :

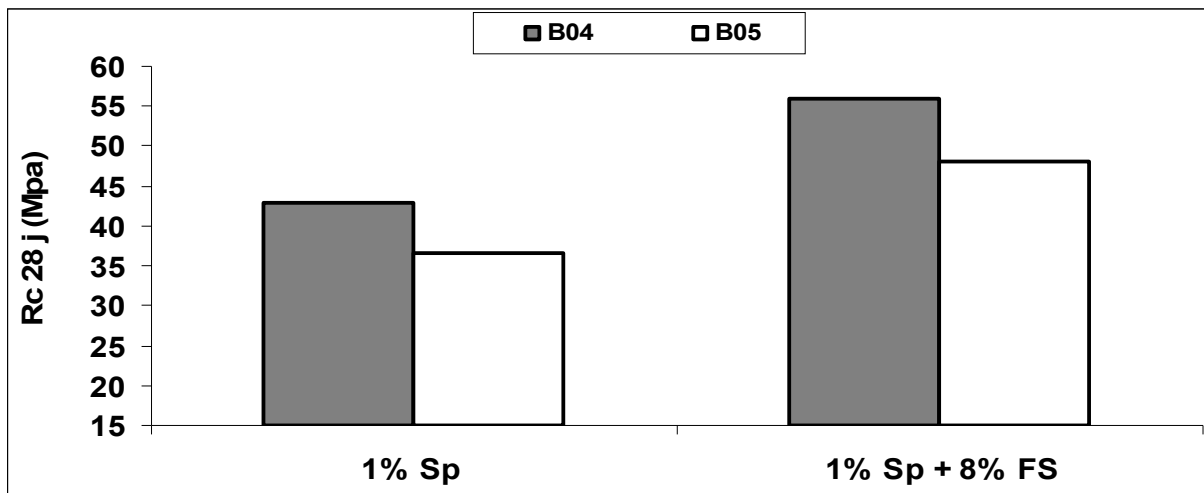
On distingue à travers les Graphes que :

- La résistance à la compression du béton augmente au fur et à mesure que le taux d'adjuvant « superplastifiant » augmente dans la composition du béton (exp. : pour un ajout de 1% de superplastifiant, on bénéficie de 13% de résistance de plus qu'un béton sans adjuvants).
- Le béton à base de SD1 donne de meilleures résistances que celui à base de SD2 et cela pour les deux dosages 350 kg/m³ et 400 kg/m³.

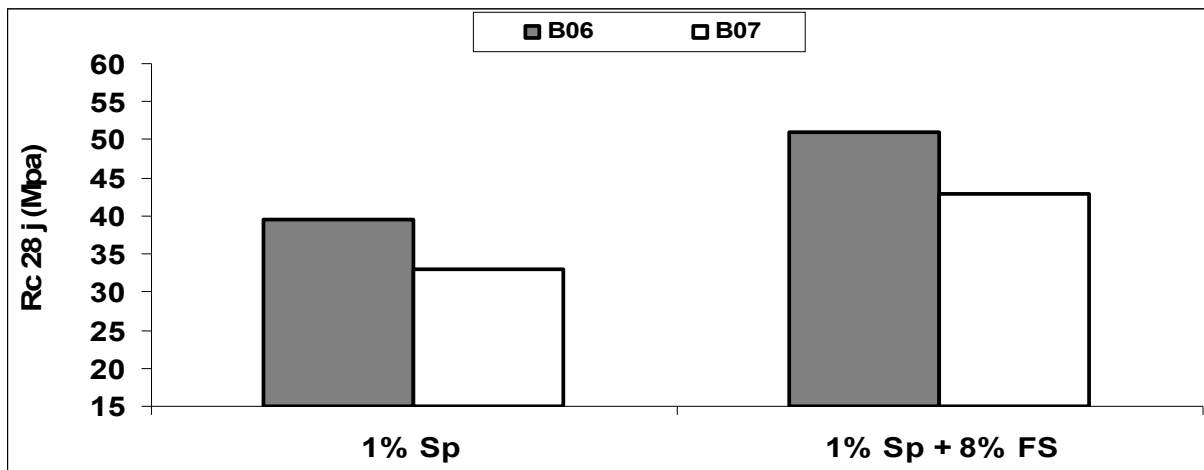
III.4.3 RESISTANCE A LA COMPRESSION (BETON+SUPERPLASTIFIANT+FUMEE DE SILICE)



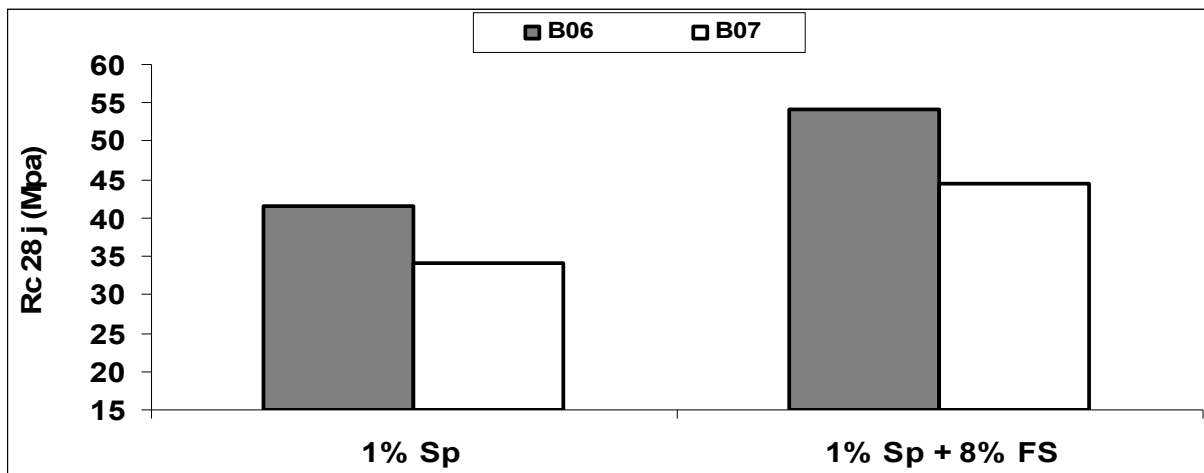
Graphe III.11 : Résistance à la compression des bétons (B04 et B05) dosé à 350 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant + Fumée de silice



Graphe III.12 : Résistance à la compression des bétons (B06 et B07) dosé à 400 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant + Fumée de silice



Graphe III.13 : Résistance à la compression des bétons (B06 et B07) dosé à 350 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant + Fumée de silice



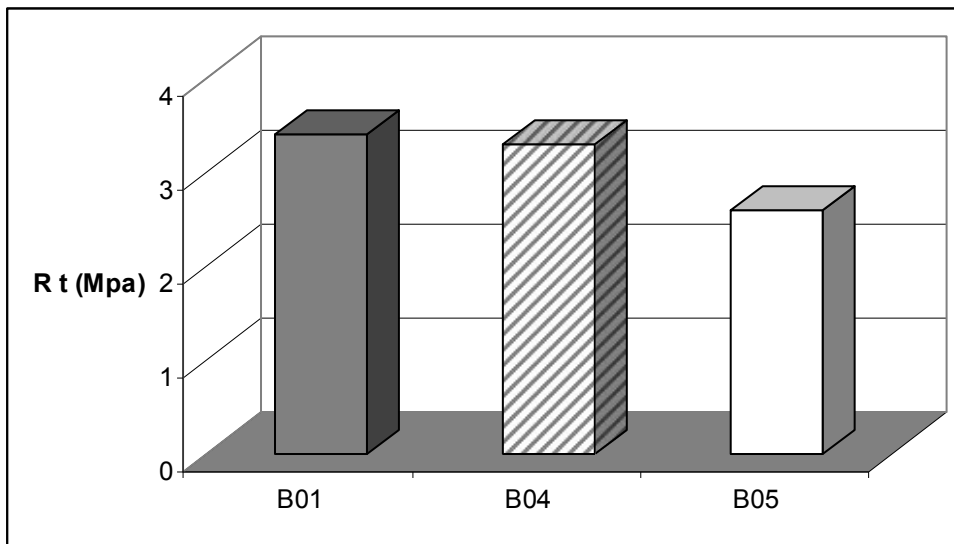
Graphe III.14 : Résistance à la compression des bétons (B06 et B07) dosé à 400 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant + Fumée de silice

Commentaires :

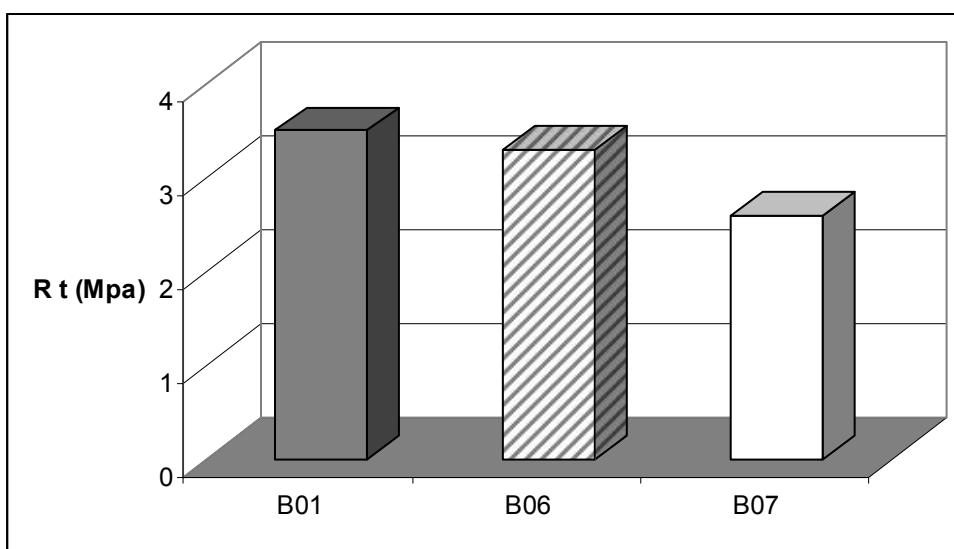
Les Graphes nous révèlent :

- L'ajout de 8% de fumée de silice au liant agit positivement sur la résistance à la compression du béton avec un gain presque fixe en résistance soit 30% de résistance supplémentaire pour différents taux de superplastifiant et pour les deux dosages et les deux types de sables SD1 & SD2.

III.4.4 RESISTANCE A LA TRACTION

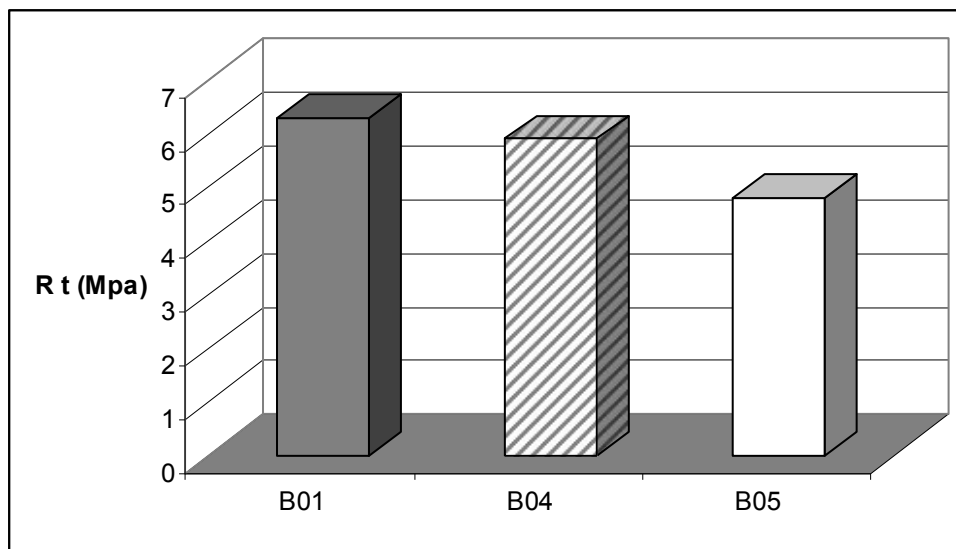


Graphe III.15 : Résistance à la traction des bétons (B01, B04 et B05) dosé à 350 Kg/m³ à 28 jours en fonction des combinaisons des sables

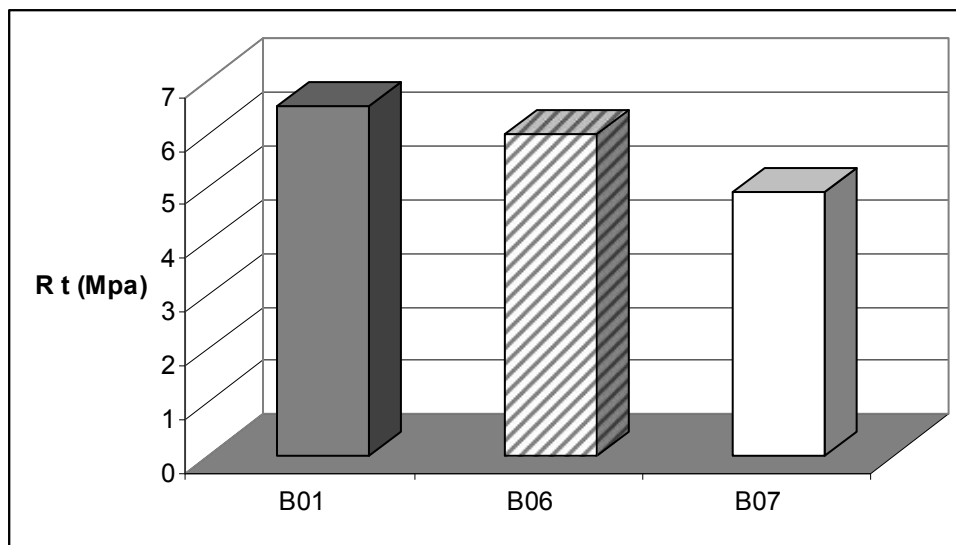


Graphe III.16 : Résistance à la traction des bétons (B01, B06 et B07) dosé à 400 Kg/m^3 à 28 jours en fonction des combinaisons des sables

III.4.5 RESISTANCE A LA FLEXION



Graphe III.17 : Résistance à la flexion des bétons (B01, B04 et B05) dosé à 350 Kg/m^3 à 28 jours en fonction des combinaisons des sables



Graphe III.18 : Résistance à la flexion des bétons (B01, B06 et B07) dosé à 400 Kg/m^3 à 28 jours en fonction des combinaisons des sables

Commentaires :

Les résistances à la flexion et à la traction par fendage à 28 jours:

- Le béton (B04) a une résistance proche à celle du béton de référence (B01),
- Contrairement au béton (B05) qui a une résistance un peu éloignée par rapport à celle des deux autres.

- Le béton (B06) dosé à 400 Kg/m³ a une résistance presque la même du béton (B04) dosé à 350 Kg/m³ ,
- Le béton (B07) dosé à 400 Kg/m³ a une résistance presque la même du béton (B05) dosé à 350 Kg/m³.

L'effet du sable de dune sur la résistance à la flexion et la traction par fendage est similaire à celui de la résistance à la compression. Comme on a remarqué aussi que la résistance à la traction elle est environ 10 fois plus faible que la résistance à la compression.

III.5. PERMÉABILITÉ DU BÉTON

A cause de son utilisation abondante notamment dans les constructions les plus stratégiques, le béton soulève de plus en plus le problème de sa durabilité en prévision des dommages qui pourraient survenir à moyens ou à longs termes. A cet effet, nous avons étudié la durabilité des trois sortes de béton (béton de référence (SO), béton à base de SD1, béton à base de SD2) à travers leur perméabilité à l'eau à 28 jours.

L'essai consiste à mettre une éprouvette cylindrique (16×16 cm) dans un appareil de perméabilité de manière à ce qu'elle soit traversée de haut en bas suivant sa hauteur, par de l'eau sous pression. La durée de l'essai est estimée à 9 heures, dont la pression est augmentée d'une unité (1 bar) par heure, en commençant par une valeur minimale de 2 bars.

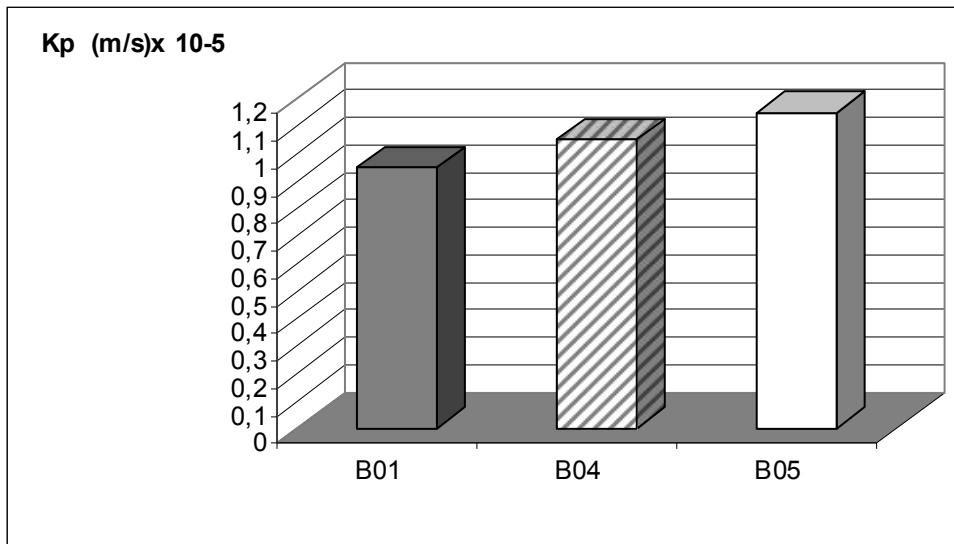
A la fin de l'essai la pression atteindra 10 bars. Cependant, un bon béton est défini comme tel du point de vue perméabilité, lorsqu'il est susceptible de supporter une pression d'eau au minimum égale à 6 bars suivant la norme internationale.

Le coefficient de perméabilité K_p est calculé à partir de la formule de Darcy :

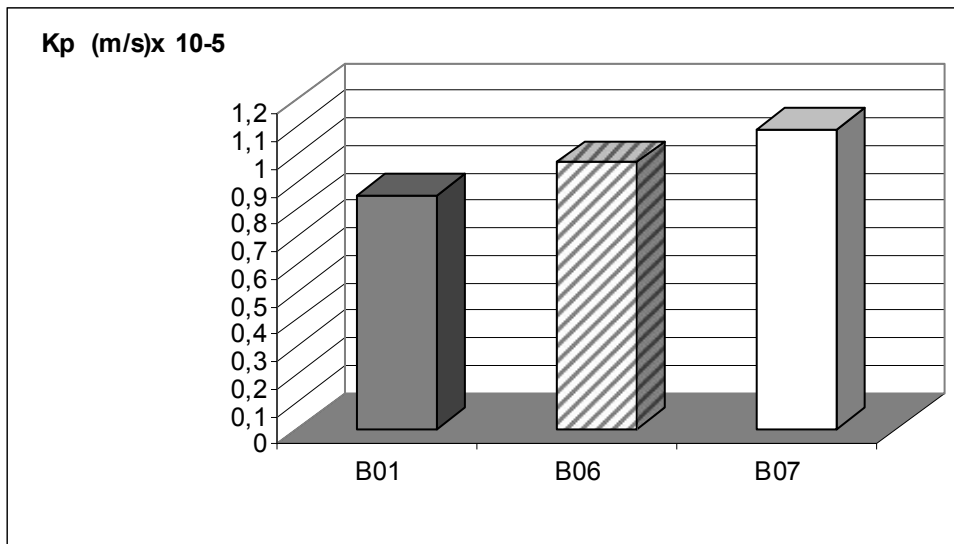
$$K_p = \frac{Q.H}{F(P_1 - P_2) \cdot \tau \cdot \eta \cdot k}$$

[$P_1 - P_2 = 10$ bars, $\tau = 9$ heures, $F = 201,06$ cm², $k = 1$, la viscosité (η) = 0,89].

Les valeurs du coefficient de perméabilité en fonction du temps et du type de sable sont rapportés dans les Graphe III.19 & III.20.



Graph III.19 : Variation du coefficient de perméabilité des bétons (B01, B04 et B05) en fonction du type de sable pour un dosage de béton de 350 kg/m^3



Graph III.20 : Variation du coefficient de perméabilité des bétons (B01, B06 et B07) en fonction du type de sable pour un dosage de béton de 400 kg/m^3

Commentaires

On constate à travers les Graph III.19 & III.20 que la perméabilité des bétons (B05 et B07) est supérieure à celle des bétons (B04 et B06) et ces dernières est supérieur à celle du béton de référence (B01).

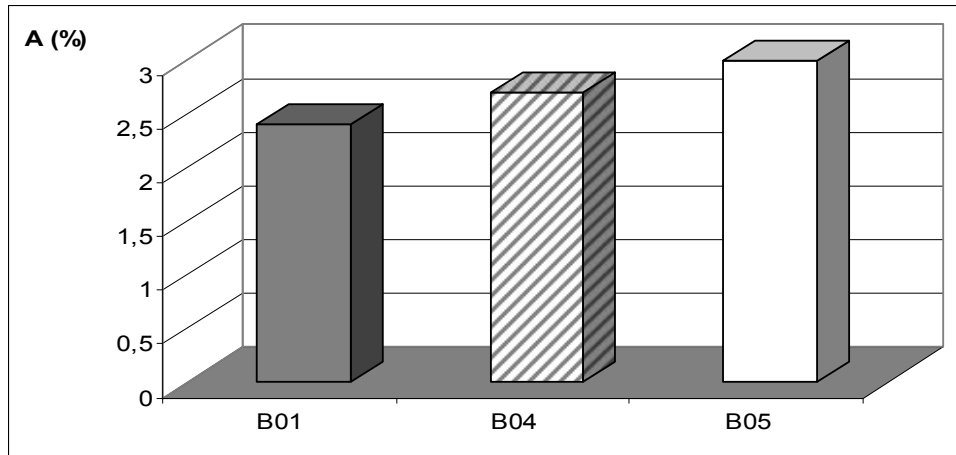
III.6. ABSORPTION D'EAU PAR IMMERSION

La masse du béton durcie est truffée de capillaires : Vides très petits, généralement communicants, allant de $10 \mu\text{m}$ à $0,01 \mu\text{m}$, capable d'absorber l'eau par succion, de la retenir et de ne la libérer que par évaporation très lente.

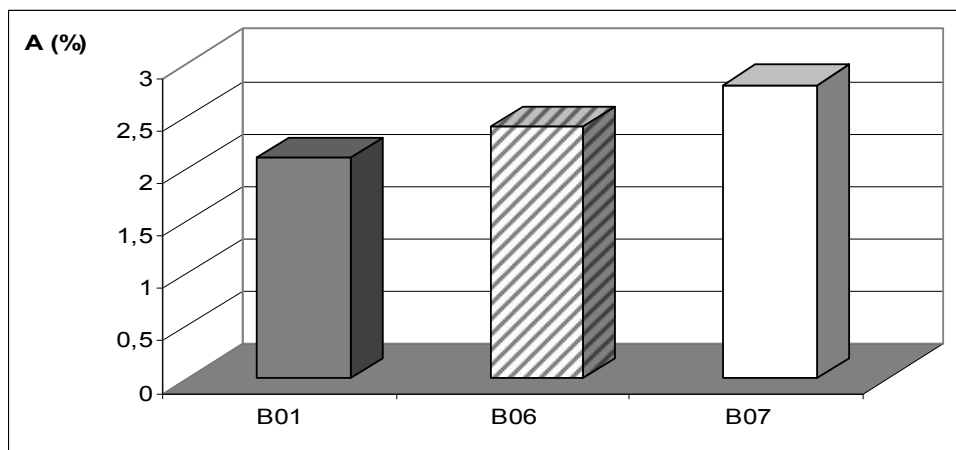
L'absorption d'eau en masse : exprimée en %.

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

Les éprouvettes utilisées dans cette partie sont cubiques de dimensions (10×10×10 cm³) et ont été conservées à l'eau (T = 21°C). Les valeurs du coefficient d'absorption en fonction du type de sable et pour les deux dosages sont rapportées dans les Graphes suivantes :



Graphe III.21 : Variation du coefficient d'absorption d'eau des bétons (B01, B04 et B05) en fonction du type de sable pour un dosage de béton de 350 kg/m³



Graphe III.22 : Variation du coefficient d'absorption d'eau des bétons (B01, B06 et B07) en fonction du type de sable pour un dosage de béton de 400 kg/m³

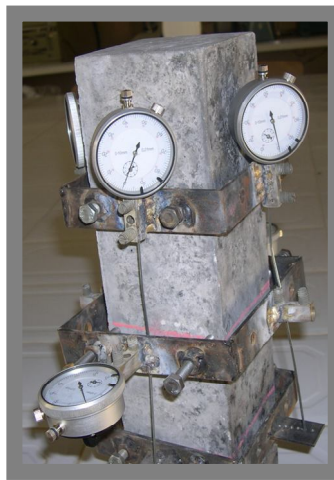
Commentaires

On constate à travers les Graphe III.21 & III.22 que le coefficient d'absorption d'eau en masse du béton à base de SD2 est supérieure à celui du béton à base de SD1 et ce dernier est supérieur à celui du béton de référence, tout en gardant une valeur (A%) inférieure à 5% valeur fixée par la norme NBN B15-211 (1989).

III.7. LA DÉFORMABILITÉ DU BÉTON

Dans le but, d'étudier l'influence du sable de dune sur la déformabilité du béton à 28 jours, on a confectionné trois sortes de béton avec un dosage de 400 Kg/m^3 (béton de référence (B01), béton (B05) & le béton (B06), chaque série comprenant trois échantillons prismatiques $(10 \times 10 \times 40) \text{ cm}^3$.

Les essais ont été effectués à 28 jours du durcissement, la déformation a été mesurée au moyen d'indicateurs à cadran ayant la valeur d'une division de 0.01 mm qui étaient installés à l'aide de cadres appropriés sur une surface de 200 cm^2 dans le sens longitudinal et de 100 cm^2 dans le sens transversal, comportant des plots de mesure (distants de 20 cm). (Photo III.1).



Photos (III.1): Essai de déformabilité sur éprouvette prismatique $(10 \times 10 \times 40) \text{ cm}^3$

Définition de résistance prismatique des éprouvettes par la formule :

$$R_{\text{Pri}} = P / F$$

P : Charge de destruction selon les unités de mesure de presse.

F : L'air de la section de l'éprouvette.

Le module d'élasticité et le coefficient de poisson se déterminent pour chaque éprouvette au niveau de la charge égal à 30 % de la charge de décharge de destruction.

A /- Module d'élasticité du béton

$$E_{\text{el}} = \sigma_1 / \xi_{1\text{el}} \quad , \quad \Delta \sigma / \Delta \xi_{1\text{el}} \quad , \quad \sigma_1 = P_1 / F$$

σ_1 : Accroissement de la contrainte de zéro conventionnel au niveau 30 % de la charge de destruction.

P_1 : Charge de trusion correspondante.

E_{1el} : Accroissement de déformation relative élasto-instantanée longitudinale, des éprouvettes correspondantes à la charge $P_1 = 0.3 P$.

$$\underline{B \text{ /- Coefficient de poisson } \mu = \theta = \xi_{2el} / \xi_{1el}}$$

E_{2el} = Accroissement de déformation relative transversales élasto-instantanée des éprouvettes

Correspondantes à la charge $P_1 = 0.3 P$. Les valeurs de ξ_{1el} et ξ_{2el} se déterminent par les formules :

$$(\xi_{1el} = \xi_1^T - \xi_{1Fel}, \xi_{1Fel} = \xi_1 - \xi_{1el}, \xi_{2Fel} = \xi_2 - \xi_{2el})$$

ξ_1 et ξ_2 : Accroissement totale (Entière) des déformations relatives longitudinales et transversales des éprouvettes correspondantes à la charge $P_1 = 0.3 P$ mesurer à la fin de chaque (degré marche).

ξ_{1Fel} et ξ_{2Fel} : Accroissement de fluage (à coulage rapide) de déformation relative longitudinale et transversale obtenu an l'échelette de charge avant le niveau de charge $P_1 = 0.3P$.

L'accroissement de déformation relative longitudinal et transversal se détermine comme la moyenne arithmétique des indicateurs des quatre cotés du prisme ou de 3 - 4 pour les cylindres selon la formule

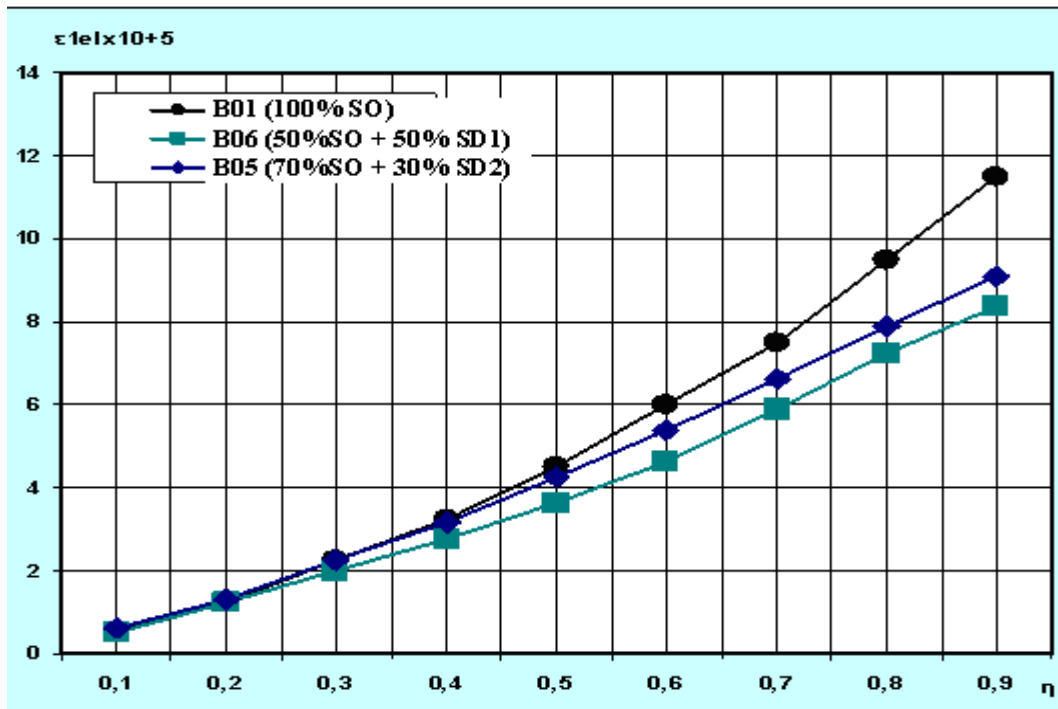
$$\xi_1 = \Delta l_1 / l_1, \quad \xi_2 = \Delta l_2 / l_2$$

$\Delta l_1, \Delta l_2$: Accroissement absolue de la déformation longitudinale et transversale des éprouvettes correspondantes à l'accroissement des contraintes.

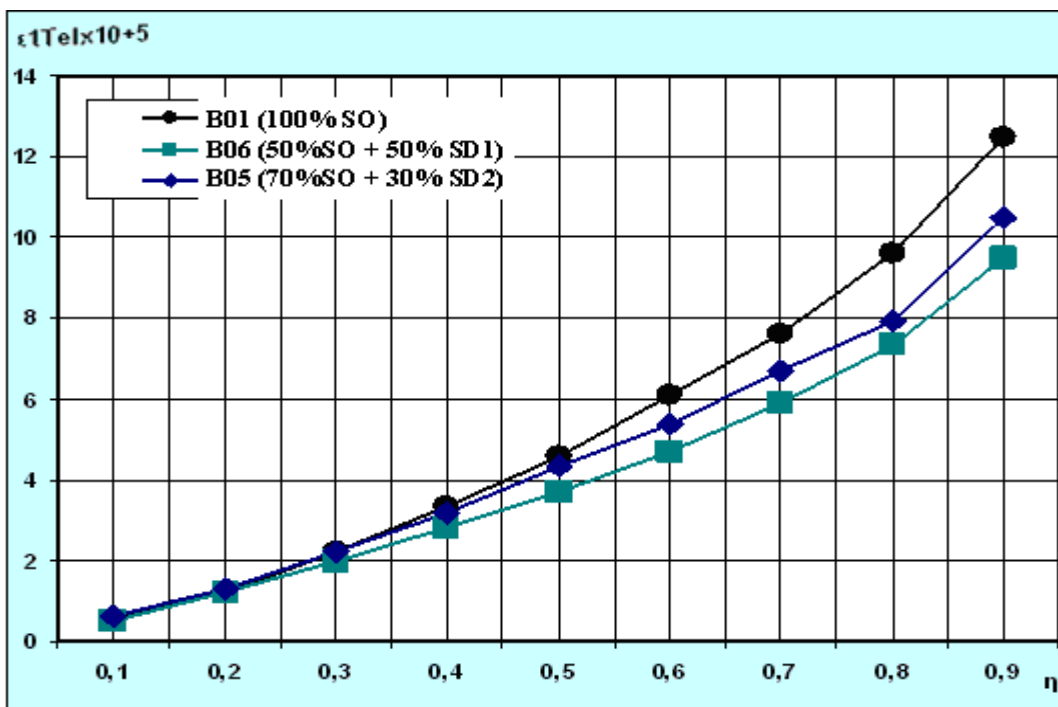
l_1, l_2 : Les bases fixes pour les mesures de déformation longitudinales et transversales des éprouvettes.

Les résultats obtenus sont illustrés dans les Graphes suivants :

Déformation élasto-instantanées longitudinales du béton

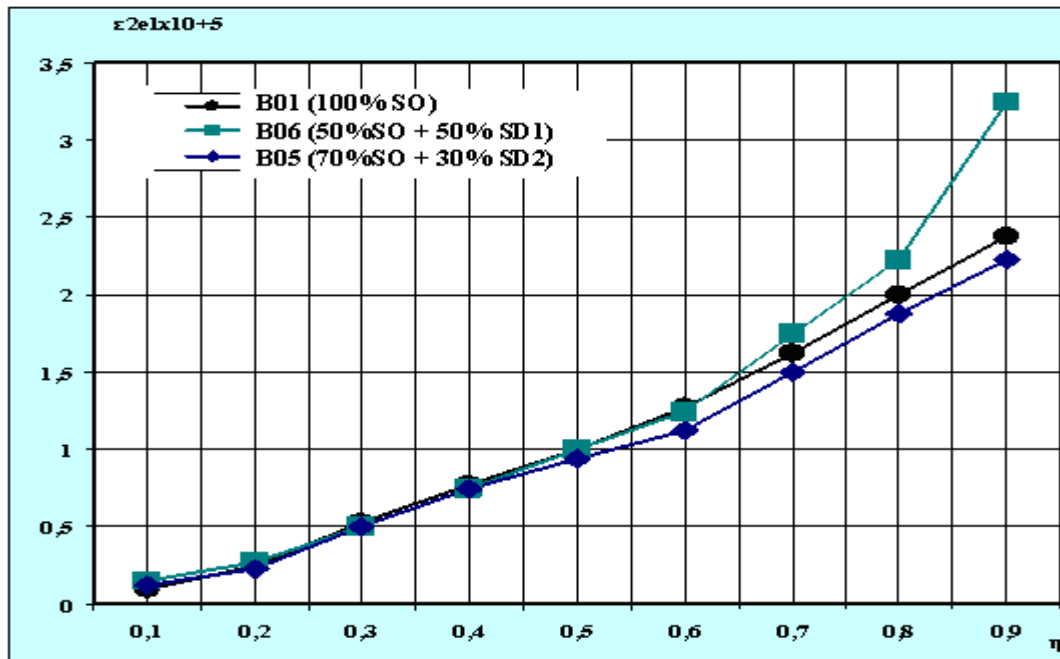


Graph III.23 : Déformation élasto-instantanées longitudinales des bétons (B01, B05 et B06) ϵ_{1eI} en fonction des contraintes relatives η .

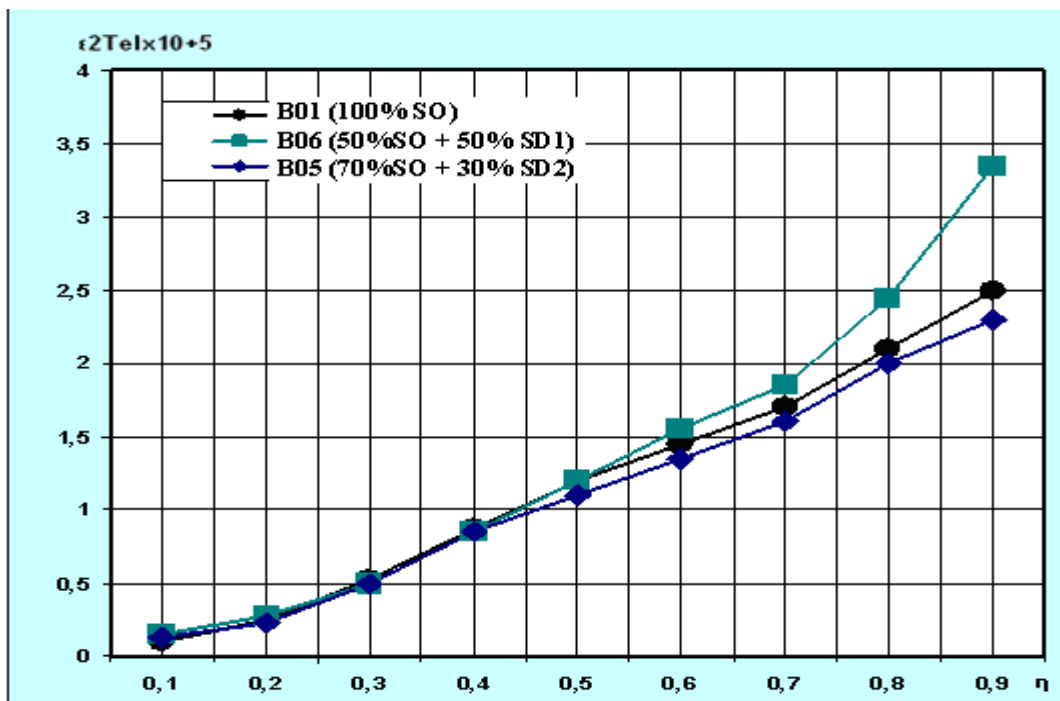


Graph III.24 : Déformation élasto-instantanées longitudinales des bétons (B01, B05 et B06) ϵ_{1TeI} en fonction des contraintes relatives η .

Déformation élasto-instantanées transversales du béton

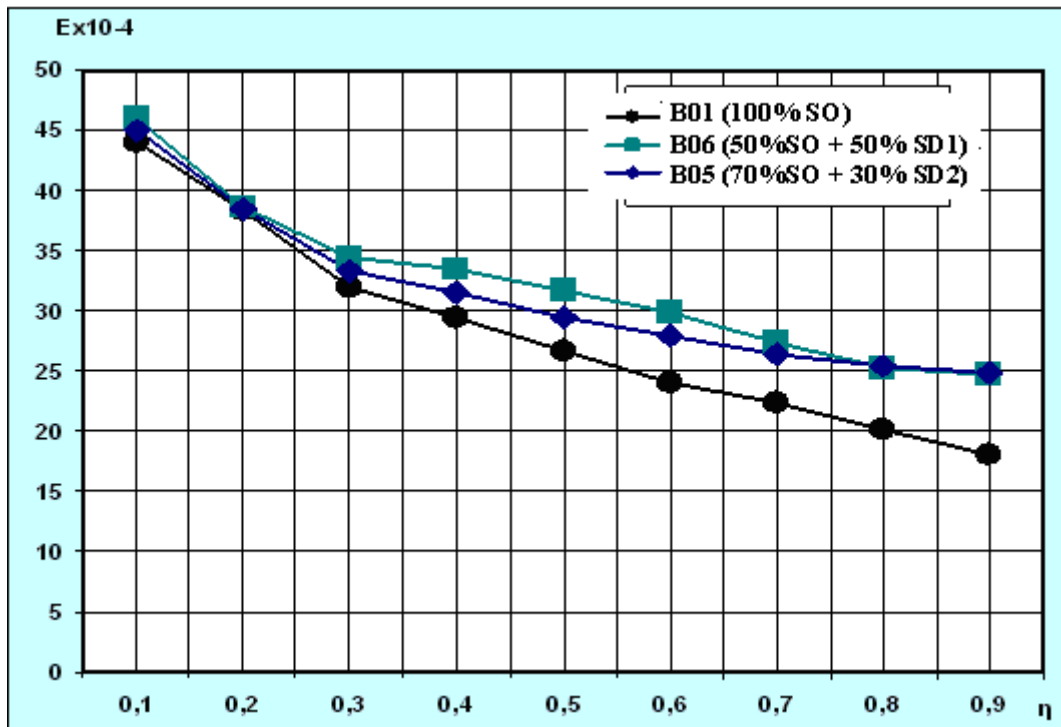


Graph III.25 : Déformation élasto-instantanées transversales des bétons (B01, B05 et B06) ϵ_{2el} en fonction des contraintes relatives η .



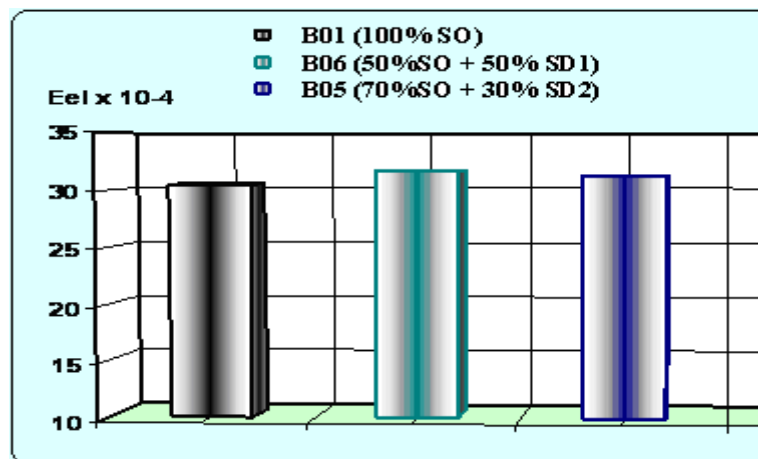
Graph III.26 : Déformation élasto-instantanées transversales des bétons (B01, B05 et B06) ϵ_{2Tel} en fonction des contraintes relatives η .

Module de déformabilité E du béton



Graphe III.27 : Module de déformabilité E des bétons (B01, B05 et B06) en fonction des contraintes relatives η .

Module d'élasticité Eel du béton



Graphe III.28 : Module d'élasticité des bétons (B01, B05 et B06).

Commentaires

Suivant les résultats des essais des prismes on a construit des graphiques présentant l'évolution de la relation entre le module de déformation du béton à la compression, les déformation élasto-instantanées et relatives totales avec l'augmentation de la contrainte relative.

Les Graphes donnent les résultats des essais de trois prismes identiques de chaque série (B01, B05, B06).

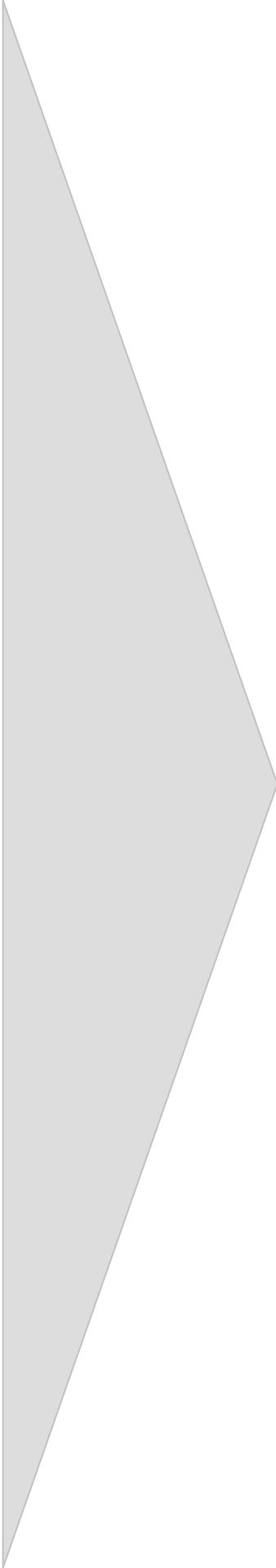
Cette étude nous a permis de mettre en valeur l'influence de sable de dune sur la déformation du béton à la compression, et de préciser un certain nombre de point :

- Les Graphes III.23 & III.24 montrent que la déformation élasto-instantanée longitudinale du béton augmente avec l'augmentation de la contrainte relative pour les trois types de sables.
- Pour une même valeur donnée de contrainte, on distingue que la déformation élasto-instantanée longitudinale du béton à base de B06 < B05 < B01 (Graphes III.23 & III.24).
- La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations élasto-instantanées du béton revêt un caractère rectiligne dans l'intervalle $\eta = 0 - 0.4$.
- Dans les Graphes III.25 & III.26, on distingue :
- Pour des valeurs de $\eta < 0.4$, les trois courbes sont presque confondues,
- Pour $0.4 < \eta < 0.7$, les trois courbes restent étroitement rapprochées,
- Pour $\eta > 0.7$, la courbe B06 change d'allure et surmonte les deux autres courbes qui restent proches, en prenant des valeurs de ϵ_{2el} nettement élevées.
- On voit que le module de déformation diminue avec l'augmentation de la contrainte relative (Graphe III.27), les courbes changent de direction à $\eta = 0.3$, tout en gardant la même allure pour les trois types de béton (équations linéaires).
- Le module d'élasticité et le module de déformabilité de béton (B06) sont supérieurs à ceux de (B05) qui à leur tour sont supérieurs à ceux de (B01) (Graphes III.27 & III.28).

III.8. Conclusion

Cette étude nous a permis de mettre en valeur l'influence du sable de dune sur le comportement de béton et de préciser un certain nombre de points :

- Le béton à base de sable de dune donne des résistances à la compression satisfaisantes, surtout concernant la composition contenant le sable de dunes SD1,
- Pour un même dosage et une même composition, les résistances à la compression du béton à base de sable de dune SD2 sont toujours inférieures à celui à base de SD1,
- L'ajout d'adjuvant « superplastifiant » à taux progressifs agit objectivement sur la résistance de béton à la compression en l'accroissant de 13% par rapport à un béton sans adjuvants,
- L'ajout de 8% de fumée de silice au liant agit positivement sur la résistance à la compression du béton avec un gain de 30% de résistance,
- La résistance à la flexion et la traction par fendage pour les bétons à base de SD1 et SD2 est sensiblement inférieure à celle du béton de référence, tout en gardant la même allure de courbe,
- La perméabilité du béton à base de SD1 et SD2 est nettement supérieure à celle du béton de référence,
- L'absorption d'eau en masse du béton à base de SD1 et SD2 est supérieure à celle du béton de référence,
- La perméabilité et l'absorption d'eau en masse pour le béton à base de SD2 sont supérieures à celles pour le béton à base de SD1,
- la déformation élasto-instantanée longitudinale du béton augmente avec l'augmentation de la contrainte relative pour les trois types de sables,
- Le module de déformation diminue avec l'augmentation de la contrainte relative,
- Le module d'élasticité et le module de déformabilité de béton B06>B05>B01.



CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

La prolifération incontrôlée de la population incite le gouvernement à procurer de plus en plus plus de logements, d'usines, d'ouvrages d'art, de route afin de combler le manque qui ne cesse de s'accroître et de s'imposer en tant que problème majeure au sein de la société. En contre partie, et en parlant de sable qui est l'un des principaux composants des bétons et dont les gisements sont soumis à des contraintes environnementales de plus en plus rigides faisant croître leur coût d'exploitation déjà élevé, on peut dire qu'on est loin d'optimiser nos ressources naturelles, surtout que le désert occupe plus 60% du territoire national formé essentiellement de sable inexploité jusqu'à ce jour.

Et dans l'unique but de valoriser cette richesse nationale en sable, on a entamé ce travail, pour tirer des conséquences sur l'utilisation de ce matériau dans la composition du béton, et on peut conclure de ce modeste travail de recherche au laboratoire ce qui suit :

- Le sable de dune est un matériau propre avec un équivalent de sable supérieur de 80%, à granulométrie étalée avec un module de finesse admissible, sa composition est pauvre en matières organiques et autres matières indésirables telles que les sulfates, sulfures ou carbonates,
- Le sable de dune est un matériau qui se présente sous forme tamisée dans la nature et par conséquent ne nécessite aucun tamisage,
- Plus de 80% de la composition chimique du sable de dune est la silice (SiO_2),
- Le comportement d'un béton à sable de dune est similaire à celui d'un béton normal (Essai de compression, essai de traction par fendage, essai de flexion),
- Le béton à sable de dune a une résistance proche à celle d'un béton normal,
- L'utilisation d'un superplastifiant améliore la résistance du béton à base de sable de dune de 13% de résistance supplémentaire,
- L'incorporation de fumée de silice participe à l'amélioration de la résistance à la compression du béton à base de sable de dune ; le gain en résistance est de l'ordre de 30%,

- Le module d'élasticité et le module de déformabilité du béton à base de sable de dune est supérieur à celui du béton normal,
- La perméabilité et l'absorption d'eau en masse du béton à base de sable de dune est élevée par rapport à celle d'un béton normal.
- L'abondance de sable de dune dans notre pays lui confère la caractéristique de matériau économique,
- L'utilisation du sable de dune soulage les Oueds et cela marque son impact sur la protection de la nature et l'environnement.

Le sable de dune pourra t-il remplacer un jour le sable d'Oued qui s'éteint de jour en jour ? La réponse est que c'est possible, si on veut poursuivre le travail déjà terminé à moitié, et la suite reste à faire :

RECOMMANDATIONS

Notre étude qui traite la substitution d'une partie (pourcentage) du sable d'Oued par du sable de dune dans la composition du béton et qui a donnée des résistances mécaniques satisfaisantes surtout avec l'addition d'adjuvants et les autres ajouts telle que la fumée de silice.

Il est recommandé, pour compléter ce travail, de faire :

- Une étude de l'évolution de la résistance mécanique avec le temps (résistance à long terme),
- Une étude et suivi du comportement du béton vis-à-vis la déformabilité à long terme,
- Une étude de la porosité,
- Une étude de la durabilité du béton contre les attaques chimiques (sulfates & chlorures).



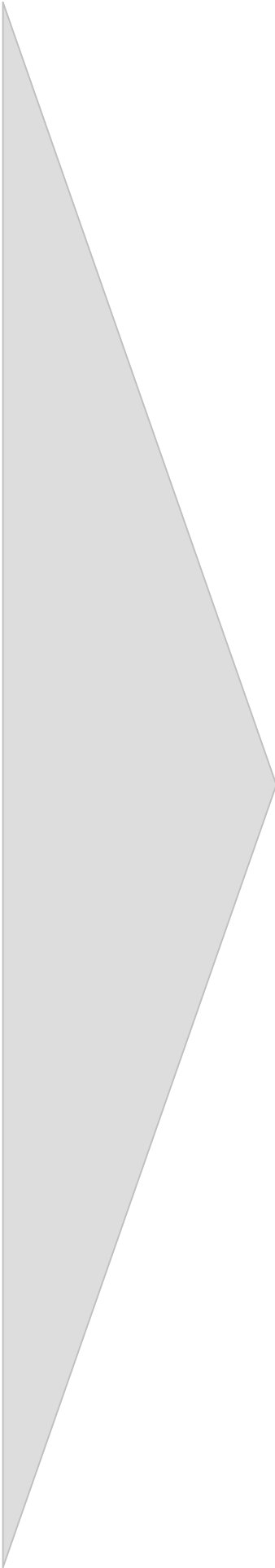
**RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Aitcin P.C, « Béton haute performance », Edition Eyrolles, 2000, 800 P.
- [2] Anderson R, Gram H.E, « Properties of alkali activated slag-concrete », 1987.
- [3] Amine N, « Incidence de l'adjonction de la pouzzolane sur les propriétés des bétons de haut résistance », Mémoire d'ingéniorat, Boumerdes 1998.
- [4] Ashby M.F, Jones D.R.H, « Matériaux.2 », Dunod, édition 1991.
- [5] Adam M. Neville, « Propriétés des bétons », Ed. Eyrolles, 1992, p.805.
- [6] Bombed J-P, « Rhéologie des mortiers et des bétons frais, influence du facteur ciment », Proceeding of RILEM, Leeds Seminar, Vol.1, sujet 3, P.1-169, 1973.
- [7] Bidjocka C, Tusset J, Messi A, Perra J, (1993), « Etude et évaluation de l'activité pouzzolanique des pouzzolanes de Djoungo (Cameroun) », Ann. Fac. Sc. HSI, Chimie et Sciences de la Terre, PP. 133-145.
- [8] By Robert, j. Flatt, Sika (Suisse/Switzerland), Nicos Martys, et and Lennart Bergstrom, 2004 « La Rhéologie Des Matériaux Cimentaires » National institute of standards and technology gaithersburg, md 20899 USA.
- [9] C.Vernet, « Introduction to Portland cement chemistry », In P. Colombet and A.R. Grimmer, editors, Application of NMR spectroscopy to cement science, pages 29-53. Gordon and Breach, London, 1994.
- [10] CIM Béton, « Les bétons de sable en structure de chaussées », centre d'information sur le ciment et ses application, Paris, France, 1995.
- [11] Dreux G, Festa J, « Nouveau guide du béton et de ses constituants », 8^{eme} édition, Eyrolles, 1998.
- [12] D. Damidot, A. Nonat, P. Barret, D. Bertrandie, H. Zanni, and R. Rassem, « C3S hydration in diluted and stirred suspensions. 3. NMR study of C-S-H precipitated during the two kinetic steps ». Advances in cement research, 7(25):1-8, 1995.
- [13] [Dhir, R. K, Hewlett, P. C. et Chan, Y. N, « Near Surface Characteristics of Concrete: Intrinsic Permeability ». Magazine of Concrete Research, Vol. 41, No 147, 1989, PP. 87-97.](#)
- [14] Elkem Microsilica for superior concrete, « How to improve strength and durability of concret » P.O.Box 8126 Vaagsbygd, N-4602 Kristian Sand S .NORWAY.
- [15] F. Gabrysiak – Matériaux – Les bétons – Chapitre 4.

- [16] Gagné et Aïtcin, 1993, « Superplasticizers for durable concrete, Comptes rendus de la conférence internationale sur la durabilité du béton », Monterrey, Octobre, Mexique, P. 200-217.
- [17] GCI 712, Chapitre 7, « Ajout dans le ciment », Université de Sherbrooke.
- [18] H.F.W. Taylor, « Cement Chemistry », Academic Press, London, 1990.
- [19] Hansen 1970, « Physical composition of hardened Portland cement paste », ACI Journal, mai 1970, p. 404-407.
- [20] <http://as.degussa-cc.ch/dictionary/French/lexicon/hochl.htm>.
- [21] Journée d'information, « ciments – bétons – adjuvants », Les adjuvants Définitions Et opportunités d'utilisation, 2004. Organisée par : ERCE- CTC- est – GRANITEX.
- [22] Kobayashi K, Uno Y, « Influence of alkali on carbonation of concrete, 2. Influence of alkali in cement on rate of carbonatio of concrete », Cem. Concr. Res., 20, 4, PP. 619-622, 1990.
- [23] [Meason M. \(1981\), « Etude de l'activité pouzzolanique des matériaux naturels et traités thermiquement en vue de la réalisation des liants hydrauliques », Thèse Doct. Université Paul Sabatier, Toulouse, PP. 133-145.](#)
- [24] Moll H.L, « Uber die Korrosion von stahl in beton, Deutscher ausschuss fur Stahlbeton », 1964, 169, 23-61.
- [25] Mehta, P. K, « Concrete: structure, properties and materials », Prentice-Hall. Ed, PP. 105-169, 1986.
- [26] Midgley H.G. and ILLSTON J.M, « The penetration of chlorides into hardened cement pastes, Cem, Concr, Res », 1984, 14, 4, 546-558.
- [27] Mezghiche. B, « Résistance et déformabilité de Béton Basique » Premier séminaire national en génie civil Biskra le 8-9 Décembre 1996.
- [28] Meyer. B, « La cure du béton », Bulletin du ciment 59, No 14, 1991.
- [29] Nagataki ET Ujike 1986, « Air permeability of concrete mixed with fly ash and condensed silica fume », ACI SP-91, P. 1049-1068.
- [30] Nehdi, M. 1993, « Mécanismes de transfert de masse dans le béton comme critère de durabilité: application in situ aux bétons de barrage ». Thèse de maîtrise, Université de Sherbrooke, 127 P.
- [31] Ny Riana Andriamanantsilavo, 2003-131P, « Comportement Des Matériaux Cimentaires Dans Un Coffrage : Expérimentation, Modélisation et Simulation de la poussée et du processus de maturation, thèse en vue de l'obtention du grade de docteur de l'université de Bretagne sud », Laboratoire de Génie Mécanique et Matériaux Centre de Recherche de Lorient, Rue St Maudé, 56325 Lorient cedex.

- [32] Pigeon, « *Composition et hydratation du ciment portland* », Séminaire progrès dans le domaine du béton, PP. 36-72, Québec, septembre 1981.
- [33] Powers, T.C, Copeland, L.E., Hayes, J.C. et Mann, H.M. 1954 « *Permeability of Portland cement paste* », *Journal of American Concrete Institute*, Vol. 51, N°. 3, P. 285-298.
- [34] Perraton, D, Aïtcin, P.C. and Vézina, D. 1988, « *Permeabilities of silica fume concrete* ». *ACI Spécial publication SP-108*, Detroit, P. 63-84.
- [35] P. Acker, « *Comportement mécanique du béton* »: apports de l'approche physicochimique, *Rapport de recherche LPC*, N°152, 1988.
- [36] PLASSAIS. Arnaud, « *Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments* » thèse de doctorat, pour obtenir le grade de Docteur de l'université paris 6, 2003-167P.
- [37] R. Dupain et R. Lanchon et J. C. Saint arroman, « *Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire (granulats, sols, ciment et bétons), castelle, 2000* ».
- [38] S.G. Boivin, « *Retrait au jeune âge du béton : Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène* », thèse de doctorat à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, P. 251, 1999.
- [39] T. R. Bryar, C. J. Daughney, and R. J. Knight, « *Paramagnetic effect of iron (III) species on nuclear magnetic relaxation of fluid protons in porous media* ». *Journal of Magnetic Resonance*, 142:74-85, 2000.
- [40] [Torrent, R. J. ET Jornet, A, « The Quality of the 'Covercrete' of Low, Medium-and High-Strength Concretes ». Proceeding of the Second International Conference on Durability of Concrete, ACI SP-126, Montreal, 1991, V.M. Malhotra Editor, PP. 1147-1161.](#)
- [41] Vénuat M, « *La pratique des ciments mortiers et béton* », Tome 1, et Tome 2, deuxième édition.
- [42] Véronique Baroghel-Bouny, « *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, Méthodes, analyse, interprétations* ». LCPC, 1994.
- [43] Weigler H., Karl S, « *Beton / Arten-Herstellungs-Eigenschaften* », Ernst, Berlin, 1989.
- [44] Weber, Schwara, Tegelaar, Soller, « *Guter Beton* », Betonverlag, Düsseldorf, 1995.



LISTES

L I S T E S

LISTE DES FIGURES

- Figure I.1 : La barkhane
- Figure I.2 : Morphologie de la barkhane
- Figure I.3 : Mode d'action des réducteurs d'eau suivant leur nature ionique
- Figure I.4 : Les utilisations des superplastifiants, d'après [11].
- Figure I.5 : Effet de la fumée de silice sur le compactage d'un mélange liant-
- Figure I.6 : Relation entre perméabilité, résistance à la compression et niveau de porosité du béton, [25].
- Figure I.7 : Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci, [16].
- Figure I.8 : Proportion volumique des constituants de la pâte de ciment dans l'eau, [19] hydraté en fonction du E/C après 80 % d'hydratation
- Figure I.9 : Courbe de porosimétrie au mercure de deux pâtes de ciment conservées pendant 7 jours dans l'eau, [16].
- Figure I.10 : Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydraté et le rapport E/C, d'après [33].
- Figure I.11 : Influence du dosage en fumée de silice sur la charge totale mesurée après 6h. D'après [34].
- Figure I.12 : Perméabilité à l'air du béton en fonction du E/C et de la durée du mûrissement humide, d'après [13]
- Figure I.13 : Perméabilité à l'oxygène de bétons fabriqués avec et sans ajouts minéraux (fumée de silice et cendres volantes) Note : $W/B = E/L$, d'après [40].
- Figure I.14 : Effet du remplacement du ciment par de la fumée de silice sur la perméabilité à l'air du béton, d'après [29].
- Figure I.15 : La courbe expérimentale [Contrainte-Déformation] au cours d'un essai de compression sur éprouvette (16×32) cm², d'après [15].

LISTE DES PHOTOS

- Photo II.1 : Sables de dunes
- Photos III.1 : Essai de déformabilité sur éprouvette prismatique (10×10×40) cm³

LISTE DES GRAPHES

- Graphe II.1 : Analyse granulométrique sable de dune « SD1 »
- Graphe II.2 : Analyse granulométrique « 50% SO + 50% SD1 »
- Graphe II.3 : Analyse granulométrique « 70% SO + 30% SD1 »
- Graphe II.4 : Analyse granulométrique sable de dune « SD2 »
- Graphe II.5 : Analyse granulométrique « 70% SO + 30% SD2 »
- Graphe II.6 : Analyse granulométrique sable d'Oued « SO »
- Graphe II.7 : Courbe granulométrique de la pierre concassée
- Graphe III.1 : Résistance à la compression des bétons (B01, B02 et B03) en fonction du temps et du type de sable 350 Kg/m³
- Graphe III.2 : Résistance à la compression des bétons (B01, B02 et B03) en fonction du temps et du type de sable 400 Kg/m³
- Graphe III.3 : Résistance à la compression des bétons (B01, B04 et B05) en fonction du temps et du type de sable 350 Kg/m³
- Graphe III.4 : Résistance à la compression des bétons (B01, B04 et B05) en fonction du temps et du type de sable 400 Kg/m³
- Graphe III.5 : Résistance à la compression des bétons (B01, B06 et B07) en fonction du temps et du type de sable 350 Kg/m³
- Graphe III.6 : Résistance à la compression des bétons (B01, B06 et B07) en fonction du temps et du type de sable 400 Kg/m³
- Graphe III.7 : Résistance à la compression des bétons (B04 et B05) dosé à 350 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant
- Graphe III.8 : Résistance à la compression des bétons (B04 et B05) dosé à 400 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant
- Graphe III.9 : Résistance à la compression des bétons (B06 et B07) dosé à 350 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant
- Graphe III.10 : Résistance à la compression des bétons (B06 et B07) dosé à 400 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant
- Graphe III.11 : Résistance à la compression des bétons (B04 et B05) dosé à 350 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant + Fumée de silice
- Graphe III.12 : Résistance à la compression des bétons (B04 et B05) dosé à 400 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant + Fumée de silice
- Graphe III.13 : Résistance à la compression des bétons (B06 et B07) dosé à 350 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant + Fumée de silice

Graphe III.14 : Résistance à la compression des bétons (B06 et B07) dosé à 400 Kg/m³ à 28 jours en fonction du pourcentage du superplastifiant + Fumée de silice

Graphe III.15 : Résistance à la traction des bétons (B01, B04 et B05) dosé à 350 Kg/m³ à 28 jours en fonction des combinaisons des sables

Graphe III.16 : Résistance à la traction des bétons (B01, B06 et B07) dosé à 400 Kg/m³ à 28 jours en fonction des combinaisons des sables

Graphe III.17 : Résistance à la flexion des bétons (B01, B04 et B05) dosé à 350 Kg/m³ à 28 jours en fonction des combinaisons des sables

Graphe III.18 : Résistance à la flexion des bétons (B01, B06 et B07) dosé à 400 Kg/m³ à 28 jours en fonction des combinaisons des sables

Graphe III.19 : Variation du coefficient de perméabilité des bétons (B01, B04 et B05) en fonction du type de sable pour un dosage de béton de 350 kg/m³

Graphe III.20 : Variation du coefficient de perméabilité des bétons (B01, B06 et B07) en fonction du type de sable pour un dosage de béton de 400 kg/m³

Graphe III.21 : Variation du coefficient d'absorption d'eau des bétons (B01, B04 et B05) en fonction du type de sable pour un dosage de béton de 350 kg/m³

Graphe III.22 : Variation du coefficient d'absorption d'eau des bétons (B01, B06 et B07) en fonction du type de sable pour un dosage de béton de 400 kg/m³

Graphe III.23 : Déformation élasto-instantanées longitudinales des bétons (B01, B05 et B06) ϵ_{1el} en fonction des contraintes relatives η .

Graphe III.24 : Déformation élasto-instantanées longitudinales des bétons (B01, B05 et B06) ϵ_{1Tel} en fonction des contraintes relatives η .

Graphe III.25 : Déformation élasto-instantanées transversales des bétons (B01, B05 et B06) ϵ_{2el} en fonction des contraintes relatives η .

Graphe III.26 : Déformation élasto-instantanées transversales des bétons (B01, B05 et B06) ϵ_{2Tel} en fonction des contraintes relatives η .

Graphe III.27 : Module de déformabilité E des bétons (B01, B05 et B06) en fonction des contraintes relatives η .

Graphe III.28 : Module d'élasticité des bétons (B01, B05 et B06).

LISTE DES TABLEAUX

Portland,	Tableau I.1	: Propriétés des principaux constituants du ciment d'après [26]
[20].	Tableau I.2	: Classification des ajouts selon leur réactivité, d'après [20].
	Tableau II.1	: Analyse chimique du sable de dune
	Tableau II.2	: Analyse chimique du sable de dune

/ 42.5A)	Tableau II.3	: Composition chimique et minéralogique de (CPJ-CEM II
	Tableau III.1	: Combinaisons de sables
kg/m ³)	Tableau III.2	: Récapitulation de la composition du béton (C = 350
kg/m ³)	Tableau III.3	: Récapitulation de la composition du béton (C = 400