

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

### **1. Contexte**

Certains projets doivent être réalisés dans une courte durée de temps. Le taux de production d'éléments en béton joue un rôle important. Par conséquent, le durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire est très nécessaire pour obtenir une résistance initiale considérable de sorte que les moules peuvent être utilisées pour une autre coulée. Au cours des dernières années, la sensibilité du public et la politique aux questions d'environnement et de sécurité énergétique ont conduit à la promotion des sources d'énergie renouvelable (l'énergie solaire). L'énergie solaire peut être utilisée efficacement dans les régions où le rayonnement solaire est très important, soit en intensité ou sur une longue période annuelle. Parmi ces utilisations, le traitement thermique de produits tels que des éléments préfabriqués. L'Algérie est une région de forte radiation solaire avec plus de 220 jours équivalents de soleil qui brille dans l'année.

La technique de durcissement à la vapeur par l'énergie solaire est une technique efficace pour accélérer le durcissement des bétons, pour une bonne résistance et une grande économie d'énergie électrique. On peut dire que la résistance à la compression accrue au cours de la progression de la réaction d'hydratation s'accompagne d'une augmentation de la résistance à la flexion. Grâce aux résultats obtenus un gain de temps et plus courts délais de fabrication pour atteindre la résistance à la compression à 28 jours à l'air libre [67].

D'autre part, la société et les pouvoirs publics sont de plus en plus intransigeants vis-à-vis des problèmes de pollution occasionnés par le gaz carbonique dégagé et par la forte consommation d'énergie lors de la fabrication du ciment Portland. Les ciments avec additifs permettent non seulement de réduire les coûts de production mais aussi de régler certains problèmes environnementaux en plus d'offrir au béton de meilleures propriétés, qui peut être réalisé en utilisant le sable de dune broyé (SDB). Le sable de dune est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie la contribution de l'addition du (SDB) à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de trois effets qui agissent simultanément et de manière complémentaire ; effet physique, effet physico-chimique et effet chimique.

L'analyse par diffractométrie aux rayons X a mis en évidence le rôle pouzzolanique du sable de

dune broyé (SDB). En effet, la faible quantité de Portlandite détectée dans les pâtes de ciment en présence du (SDB), traduit la réaction pouzzolanique partielle de cette addition, qui contribue à L'augmentation de la résistance mécanique et qui améliore la compacité des pâtes du ciment, et montre aussi que le(SDB) est constitué de minuscules grains de quartz  $\text{SiO}_2$  bien cristallisé du type low-quartz [1, 2,3et 4].

La vitesse de la réaction pouzzolanique et affectée par la surface spécifique des additions minérales, de rapport E/L et de la température de durcissement [63].

Le traitement thermique est généralement utilisé pour améliorer la vitesse de développement de la résistance des bétons.

L'utilisation de traitement thermique (durcissement en autoclave), non seulement accélère l'hydratation du ciment et l'activité pouzzolanique des additions minérales mais activé également la silice moins réactive (comme le SDB) [68].

## 2. Objectifs visés

‘objectifs de notre étude visait à évaluer à travers des expériences l'influence de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire sur la résistance en compression des bétons contenant le sable de dune broyé est de résoudre trois problématiques, la première est d'accélérer le durcissement du béton frais. La deuxième est d'utiliser l'énergie solaire, non polluante répondant aux exigences de la politique du développement durable. La troisième est de connaître l'action du sable de dune broyé en fonction de leurs teneurs sur la résistance en compression des bétons.

## 3. Plan de travail

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres:

 Le premier chapitre concerne une synthèse bibliographique qui permet de présenter l'état des connaissances sur les bétons ordinaires et leurs constituants, l'hydratation, la microstructure des matériaux cimentaires et leur fabrication, les caractéristiques physiques, chimiques & minéralogiques des matériaux utilisés plus additions minérales et spécialement sable de dune finement broyé.

 Le deuxième chapitre est un aperçu général sur les méthodes d'accélération du durcissement du béton frais et s'intéresse particulièrement à l'intérêt d'un traitement thermique à la vapeur

d'eau par l'énergie solaire, et l'influence de cette méthode de durcissement sur la résistance en compression des bétons.

-  Le troisième chapitre fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques et minéralogiques des matériaux utilisés.
-  Le quatrième chapitre concerne l'interprétation des résultats expérimentaux.
-  Enfin, une conclusion générale qui reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude et rapporte les intérêts pratiques qui en découlent.

## CHAPITRE I

### LES BETONS ORDINAIRES & LEURS CONSTITUANTS

#### I.1. INTRODUCTION

**C**e premier chapitre décrit les caractéristiques des composants du béton et une bibliographie concernant les additions cimentaires, la classification et leur action, ainsi que l'hydratation, la microstructure des matériaux cimentaires et leur fabrication.

#### I.2. HISTORIQUE

Il y a plus de 2000 ans, les Romains et les Grecs savaient déjà fabriquer du liant hydraulique en faisant réagir de la chaux éteinte  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et des cendres volcaniques, notamment celle de la région de Pouzzoles, cendres de composition riche en silice. L'association des caractéristiques de ce matériau avec une technologie très avancée semble être un facteur prépondérant dans le développement de l'empire romain. Elle a, entre autres, permis la construction de structures monumentales, inhabituelles pour cette période de l'histoire, et d'une durabilité exceptionnelle: le Panthéon avec sa coupole de 44 mètres de diamètre et le Colisée à Rome ainsi que le pont du Gard sont des monuments de plus de 1800 ans. L'utilisation de ce matériau et les secrets de sa fabrication se sont ensuite perdus à la chute de l'empire face au retour de la maçonnerie en pierre. John Smeaton redécouvre en 1756 les propriétés hydrauliques du mélange de calcaire avec de l'argile. En 1817, Louis Vicat donne les proportions en calcaire et en silice pour constituer le mélange qui après cuisson sera un véritable liant hydraulique. Joseph Apsdin donne le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait dans cette région et dépose un brevet en 1824. Obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon, mais ce brevet comportait encore des points obscurs. C'est uniquement en 1845 que l'Anglais Johnson indique de façon précise les règles de fabrication du ciment. La dénomination Portland, due à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (Sud de l'Angleterre), est à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie[5]. Cependant la véritable industrialisation ne débute vraiment que dans les années 1850. Elle est motivée notamment par la possibilité d'avoir un matériau économique, mouillable avec une bonne résistance à la compression. En 1890, on comprend l'intérêt du laitier

granulé ajouté au ciment, et, après 1945, celui des cendres volantes. Les ciments spéciaux sont d'invention plus récente: par exemple le ciment alumineux fut découvert par Jules Bied, en 1908.

Les recherches menées depuis 1970 sur le béton et particulièrement sur ses constituants actifs, conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés. Aux Etats-Unis et au Japon, on fabrique et on met en œuvre, dans les années 1980, des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteint 100 Mpa, et même 140 Mpa dans un immeuble à Seattle aux Etats-Unis. En laboratoire, on obtient, d'ores et déjà, des résistances supérieures à 600 Mpa [6].

### **I.3. CONSTITUANTS DES BÉTONS ORDINAIRES**

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, ... etc.). Les trois composants de base sont l'eau, le ciment et les granulats. Des additions peuvent être rajoutées 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.3.1. 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  $\text{CaSO}_4$  finement broyé et d'additions éventuels. Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement 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 ou surface spécifique Blaine qui représente la surface totale des grains de ciment rapportée à la masse. Elle s'exprime en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . 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  $1450^\circ\text{C}$  suivi d'une trempe rapide d'un mélange d'environ 80% de calcaire  $\text{CaCO}_3$  et 20% d'argile. L'argile est composée de silice,

d'alumine et d'autres phases qui sont présentes à de faibles proportions telles que l'oxyde de fer, le magnésium, l'oxyde de potassium, l'oxyde de sodium.

Ces oxydes sont présents dans le clinker sous forme de cristaux de silicate tricalcique  $C_3S$  dénommé alite, de silicate bicalcique  $\beta C_2S$  ou bélite, d'aluminate  $C_3A$  ou célite, d'alumino-ferrite-tétra-calcique  $C_4AF$  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  $\beta C_2S$ , 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 [7]). Ces composées sont refroidies, broyées et mélangées au gypse pour former le ciment.

### **I.3.1.1. Paramètres influençant la qualité du ciment Portland**

Les paramètres de fabrication du ciment Portland ont une influence indéniable sur les caractéristiques du produit final. Ainsi, la vitesse avec laquelle les résistances du ciment hydraté vont augmenter avec le temps, le dégagement de chaleur concomitant, la résistance aux agents chimiques et plus généralement la durabilité, dépendent de: la composition chimique, le traitement thermique (chauffage et refroidissement) et de la finesse du clinker[7 et 8].

### **I.3.2. Squelette granulaire**

C'est le mélange de sable et de graviers, il intervient dans la résistance finale du béton et occupe près de 3/4 du volume du béton et influe donc sur ses propriétés. Du point de vue économique, car il permette de diminuer la quantité de liant qui est plus cher. Du point de vue technique, car il augmente la stabilité dimensionnelle et plus résistants que la pâte de ciment. Son 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 [9]. 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 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 granulats, le volume relatif occupé par le granulats, la maniabilité du mélange et la tendance à la ségrégation et réduisent le ressuage du béton frais. La majorité des granulats peut être considérée comme inerte et inactive. 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 et à la flexion du béton. Plus la résistance des granulats est importante, meilleure sera la résistance définitive du béton. Selon les résultats de *Rossi et Toutlemonde*[10], la granulométrie joue un rôle important sur la déformation au seuil de non-linéarité, plus le volume de granulats grossiers est élevé, plus faible est cette déformation. Un volume plus élevé de granulats grossiers a donc tendance à anticiper la propagation des microfissures ce qui s'explique par le fait que les interfaces des granulats les plus grossiers sont plus faibles que ceux des granulats plus fins.

### **I.3.3. 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 H<sub>2</sub>O 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 intergranulaires. 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 & fines) avec elle.[6].L'eau permet l'hydratation du ciment et donc le durcissement du béton. Rappelons qu'un ciment Portland demande environ 25% de son poids en eau pour s'hydrater complètement (sous réserve des problèmes de floculation et d'expansion). Toute variation de la quantité d'eau entraîne des modifications et des performances mécaniques. Le dosage en eau ne peut pas être augmenté au delà d'une certaine valeur afin d'améliorer l'ouvrabilité sans entraîner des inconvénients. Les conséquences d'un excès d'eau sont:[6].

- ❖ risque de ressuage et de ségrégation ;
- ❖ augmentation de la porosité et le retrait ;
- ❖ diminution de la compacité et corrélativement la résistance.

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.3.4. ADDITIONS CIMENTAIRES**

#### **I.3.4.1. Définition**

Les additions 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 additions permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques.

Contrairement aux adjuvants, les additions doivent être prises en compte dans le calcul de la composition du béton.

Des additions, tels que les cendres volantes, les fillers, les laitiers 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, Russie, France, Allemagne, Japon et l'Angleterre, sont les plus grands producteurs de cendres volantes, de fumée de silice et de laitier de haut fourneau [11].

#### **I.3.4.2. Classification des additions**

L'un des moyens efficaces qui existe pour augmenter la production du ciment est d'utiliser des additions qui peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs.

Les additions peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau I.1 ci-dessous.

**Tableau I.1** : *Classification des additions selon leur réactivité*

<i>Type</i>	<i>Réactivité</i>	<i>Matériaux</i>
<i>hydraulique</i>	<i>Fortement Réactif</i>	<i>Ciments spéciaux, Chaux hydraulique.</i>
<i>Hydraulique Latent</i>	<i>Réactif</i>	<i>Laitier granulé, Cendres volantes riches en calcium (calciques).</i>
<i>Pouzzolanique</i>	<i>Fortement Réactif</i>	<i>Fumée de silice</i>
	<i>Moyennement Réactif</i>	<i>Cendres volantes pauvres en calcium, Pouzzolanes naturelles (verres volcaniques, Tufs volcaniques, Trass, phonolithe, terres à diatomées).</i>
	<i>Faiblement Réactif</i>	<i>Scories cristallines.</i>
<i>Inerte</i>	<i>Non Réactif</i>	<i>Filler (farine calcaire,...), Fibres, Pigments colorants, Matières expansives, Dispersions synthétiques.</i>

#### **I.3.4.3. Action des additions cimentaires**

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. A l'état frais, la présence des additions minérales modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide.

Au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment en modifiant la structure des produits hydratés et pour certaines peuvent réagir chimiquement en milieu cimentaires pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire [12].

Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes [12, 13, 24-36, 28 et 34-35]s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions dans un matériau cimentaire.

- Un effet granulaire (filler).
- Un effet physico-chimique .
- Un effet purement chimique.

#### **I.3.4.3.1. Effet granulaire**

Un effet granulaire favorable qui conduit soit à l'amélioration de la consistance du mélange frais à quantité d'eau constante, soit à la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange et les performances mécaniques du matériau durci [12 et 19]. L'effet granulaire favorable ou défavorable des mortiers avec additions a été confirmé par plusieurs études et dépend de plusieurs facteurs tels que la morphologie, la surface texturale et les distributions granulaires [14, 15 et 28].

En effet plusieurs études [16, 18 et 19], ont montré l'existence d'une optimisation, des propriétés de la structure granulaire par l'incorporation des additions minérales de différentes natures et quantités [13, 17 et 20].

La forme sphérique réduit aussi le rapport de la surface par le volume des particules, ce qui engendre une demande en eau plus réduite dans le mélange [14].

De même **Kronlof**[18], a montré en étudiant l'effet des agrégats ultrafins sur la résistance du béton, que l'incorporation dans une formulation de béton de trois additions de quartz de finesse différentes conduit à la diminution du besoin en eau en relation avec la quantité et la finesse du matériau de substitution. Dans le même sens, **Kwan**[19], a montré en étudiant l'utilisation de la fumée de silice pour la fabrication des bétons de hautes résistances et auto-compactants, que l'ouvrabilité d'un béton augmente avec le pourcentage de fumée de silice pour un rapport eau/liant constant.

D'autre part **Yijin et al**[20], ont trouvé que l'incorporation de cendres volantes dans les pâtes de ciment, mortiers et bétons peut améliorer la fluidité du mélange, mais certaines additions plus grossières, ne pouvaient pas engendrer une réduction du besoin en eau.

Dans le même contexte, **Bessa**[13], a montré en étudiant la contribution des additions minérales aux propriétés physiques et mécaniques et de durabilité des mortiers, que l'effet granulaire des additions minérales sur les formulations des mortiers dépend en premier lieu de la finesse et de la quantité de l'addition introduite

#### **I.3.4.3.2. Effet physico-chimique**

Plusieurs auteurs ont confirmé que l'effet physico-chimique et microstructural des additions minérales agit essentiellement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges et sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires durcis [12, 21, 25, 26, 31 et 34]. Certains auteurs considèrent que la présence des additions minérales multiplie les possibilités de germination des produits hydratés du ciment [22]. D'autres auteurs expliquent que la présence des

additions minérales dans un mélange cimentaire conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment en conduisant à une structuration de la matrice cimentaire plus efficace [23].

De nombreux auteurs sont unanimes sur le fait que l'introduction des additions minérales dans un mélange cimentaire modifie le processus d'hydratation du ciment indépendamment de la nature de l'addition [9, 13, 22, 24, 25,28,34-35].

De même **Lilkov et al [25]**, ont mesuré la quantité d'hydrates formés au cours des premières 24 heures dans une pâte cimentaire et a montré que cette quantité est plus importante dans des mélanges cimentaires avec addition de la fumée de silice et cendres volantes que dans les mélanges sans addition.

Dans le même sens, ces résultats sont confirmés par Jiang et **Van Damme [26]**, en étudiant l'action des additions siliceuses et calcaires sur le processus d'hydratation du C3S pur. (**Care et al ; Lawrence et al**) [27 et 34] ont montré, en étudiant l'effet des additions minérales inertes sur l'hydratation des mortiers, que le degré d'hydratation à court terme des mortiers contenant des additions chimiquement inertes était toujours plus important que celui des mortiers de références sans additions, et ont ainsi confirmé l'amélioration de l'hydratation du ciment avec des additions minérales inertes. Ils ont également identifié les deux effets physiques principaux responsables de l'hydratation du ciment et ont montré que la nucléation hétérogène qui croît avec la finesse de l'addition, présente un optimum en fonction du taux de substitution du ciment.

Dans le même contexte, **Cyr et al [21]**, ont montré en qualifiant les effets physiques des additions minérales sur l'hydratation à courts termes dans les mortiers, que pour une addition donnée, le surplus d'hydratation du ciment dépendait de la quantité d'addition incorporée. Ils ont aussi montré que les particules d'additions influencent la cinétique d'hydratation uniquement lorsqu'ils sont proches des grains de ciment et que ce n'était possible que lorsque la quantité de quartz dans le mélange reste peu importante.

Aujourd'hui, il n'est donc plus à démontrer que les additions minérales jouent un rôle de sites de nucléation préférentiels au cours des réactions du ciment, permettant une meilleure répartition des produits hydratés et conduisant ainsi à une structuration plus efficace de la matrice cimentaire [9, 28 et 35]. Cette nucléation hétérogène, qui est un processus physique, engendre une activation chimique de l'hydratation du ciment qui dépend de la finesse des particules d'additions, de la quantité d'addition dans le mélange et de l'affinité de la poudre d'addition (la nature) avec les hydrates de ciment [24 et 35].

Dans le même contexte pour les additions siliceuses, les particules de quartz peuvent constituer des sites préférentiels de nucléation en particulier pour la cristallisation des cristaux de portlandite [29 et 30].

D'autres auteurs ont aussi retenu que l'amélioration des résistances en compression est sûrement due aux phénomènes de nucléation hétérogène qui engendre une activation chimique de l'hydratation du ciment par un processus physique [19, 29, 31 et 34]. Alors que l'effet physicochimique concerne d'une façon générale toutes les additions minérales indépendamment de leur nature minéralogique.

Les additifs présentent une activité liante croissant avec leur quantité, leur finesse, leur composition minéralogique et le type de ciment influe également. En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance [32].

Notons que la finesse favorise l'effet physico-chimique. En effet, la présence d'un grand nombre de particules submicroniques dans la matrice cimentaire autour des grains de ciment multiplie les possibilités de germination des produits hydratés et développe la complexité microstructurale et l'efficacité des liaisons [32].

#### **I.3.4.3.3. Effet chimique**

L'effet chimique des additions permet de les faire contribuer à l'évolution des résistances mécaniques aussi bien que les produits hydratés du ciment. Plusieurs auteurs ont montré que l'incorporation des quantités d'additions minérales peut engendrer dans certains cas des augmentations des résistances en compression indépendamment de l'âge du mortier [19, 23, 24, 26, 33 et 35]. Ce comportement dépend de la nature, la quantité et la finesse de l'addition incorporée [23, 24, 26, 33 et 35].

L'effet chimique est intimement lié à leur composition minéralogique et concerne la capacité des additions caractérisées par des propriétés pouzzolanique et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui peuvent contribuer à l'évolution des résistances mécaniques au même titre que les produits hydratés du ciment [12 et 28]. L'effet chimique, est dû à l'activité pouzzolanique de certaines additions qui améliore la résistance en compression du ciment. Les auteurs ont montré que l'effet chimique des cendres volantes commence à être significatif à partir de 07 jours et croit avec l'âge [21, 24 et 36]. Il en résulte que l'effet chimique lorsqu'il est favorable, est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural. Son action sur les propriétés du matériau durci peut être quantifiée par la mesure du volume et de la nature des produits hydratés formés. Néanmoins, leur forte synergie

rend difficile toute distinction claire entre ces deux effets et fait qu'ils peuvent être associés dans une notion unique plus large qui est la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment [13 et 17].

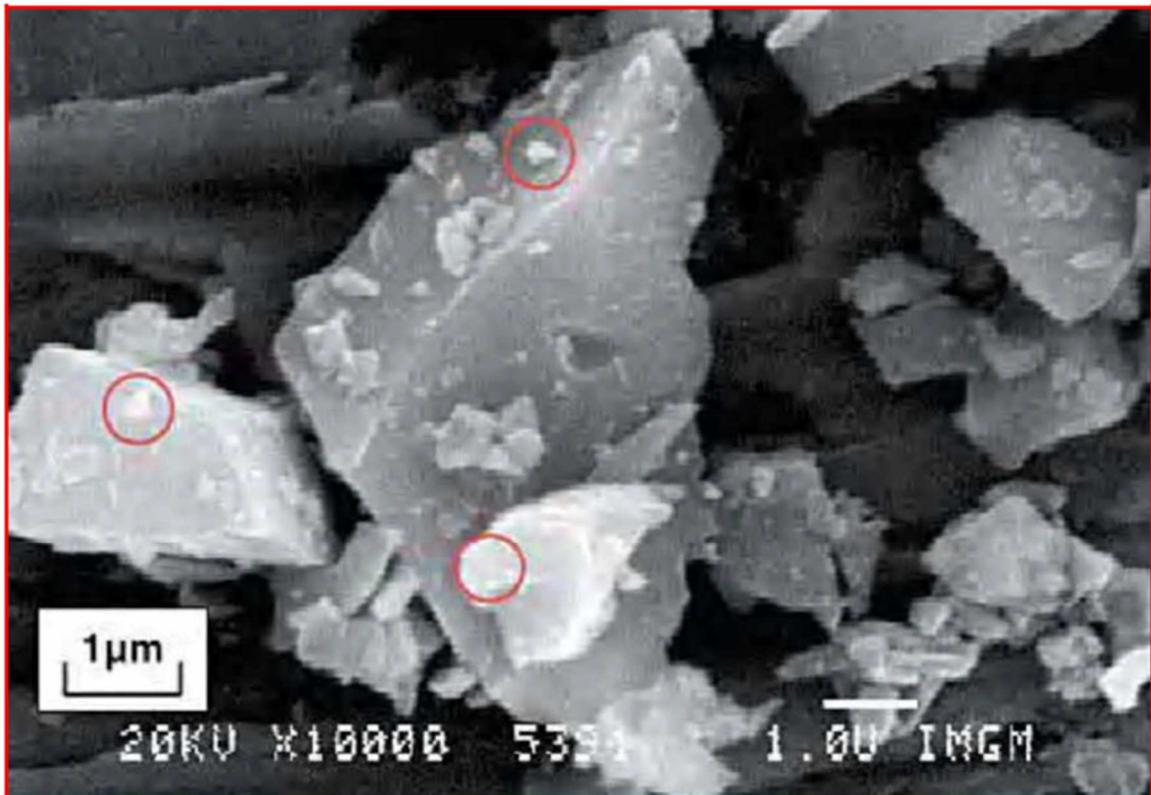
L'activité chimique des additions minérales est confirmée par plusieurs auteurs tels que [9,19,24, 25,27, 28, 29, 31 et 34].

La réaction pouzzolanique est une réaction secondaire qui se produit entre la chaux libérée par la réaction principale (produit hydraulique) et les produits silico-alumineux [38].

**Appa Rao [39]**, a montré en étudiant le développement des résistances avec l'âge des mortiers contenant de la fumée de silice, que pour un rapport E/L = 0.5, l'incorporation d'une fumée de silice dans un mortier dans la limite de 30% de substitution du ciment par l'addition, conduit à une augmentation des résistances en compression indépendamment de l'âge du mortier.

De même **Kwan [19]**, a montré que, indépendamment du rapport eau/liant, l'incorporation d'une fumée de silice dans un mortier dans la limite de 15% de substitution du ciment par l'addition, conduit à une augmentation des résistances en compression à 28 jours.

Dans le même contexte, **Benezet et Benhassaine [29 et 30]**, ont montré également en étudiant l'influence de la taille des particules de quartz dans la réaction pouzzolanique, que les poudres de quartz pouvaient être considérées comme des produits pouzzolaniques puisqu'elles consomment la chaux pour former des hydrates stables. La réaction pouzzolanique se déroule lentement, elle se manifeste essentiellement après 28 jours. La réactivité des poudres de quartz cristallisé, mesurée dans un milieu statique (non activé) thermiquement (essai à 20°C), attribuée jusqu'à présent à une amorphisation de la surface des grains, résulte de la présence de grains très fins adsorbés sur la surface des grains plus gros. Comme la montre la figure I.1 ci-dessous.



**Figure I.1** : Adsorbats en surface des grosses particules [29 et 30]

De même **Baron et Ollivier [40]** ont montré que cette réaction est pratiquement constante entre 1 et 28 jours, mais après 28 jours, l'activité pouzzolanique augmente, faisant croître la résistance mécanique et la durabilité.

Dans le même sens, **Cyr et al [33]**, ont confirmé la réactivité chimique des additions calcaires en comparant l'évolution des résistances mécaniques des mortiers confectionnés avec deux cendres volantes et une addition de calcaire.

#### **I.3.4.4. Comportement du ciment avec addition**

Le comportement du ciment avec addition minérale est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'addition [11].

- La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide.

- Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons.

#### **I.3.4.5. Enjeux environnementaux**

Le développement durable apparaît comme une stratégie politique visant à être gagnant sur les trois terrains de l'économie, du social et de l'environnement. Il faut signaler ici que notre pays, depuis la première conférence mondiale sur l'environnement organisée à Stockholm en 1972 a pris progressivement conscience de la nécessité à d'intégrer la dimension environnementale dans la démarche de planification du développement et d'utilisation durable des ressources naturelles du pays [41].

Le ciment, le béton et d'autres matériaux de construction sont essentiels au développement de nos sociétés, mais leurs procédés de fabrication ont d'importants impacts environnementaux. Des émissions de CO<sub>2</sub> se produisent pendant la production du clinker qui est un composant intermédiaire dans la fabrication du ciment. La production de ciment engendre une forte consommation de matières premières et d'énergie.

La clinkérisation est la partie la plus importante du procédé de fabrication du ciment en ce qui concerne la consommation d'énergie et les rejets à l'atmosphère du fait de la nécessité d'atteindre une température d'environ 1450°C. Les principaux rejets en termes de volume sont le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, les oxydes d'azote NO<sub>x</sub>, le dioxyde de soufre SO<sub>2</sub> et les poussières.

Dans le secteur cimentier, les émissions de CO<sub>2</sub> sont les plus importantes. En effet, pendant la cuisson des matières premières calcaires, le carbonate de calcium est transformé en oxyde de calcium, laissant s'échapper le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> contenu dans le calcaire.

Les sources d'émissions de CO<sub>2</sub> comprennent donc l'utilisation de combustibles pour la production d'énergie et la décarbonatation du calcaire [5]. On estime que la production de chaque tonne de ciment Portland libère environ une tonne de CO<sub>2</sub>[42].

Il est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète. Cette situation doit être prise au sérieux car le béton est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine [5].

### **I.3.4.6. Bénéfices de l'utilisation des additions minérales**

#### **I.3.4.6.1. Bénéfices techniques**

- L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des additions d'une grande finesse).
- Ils peuvent modifier la nature et la texture des hydrates formés.
- Prise et durcissement pour les additions 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.

#### **I.3.4.6.2. Bénéfices économiques**

- La plupart des additions minérales sont des sous-produits de différentes industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation.
- Réduit le prix du ciment et du béton.
- Permet un gain appréciable en clinker selon le pourcentage ajouté.
- Réduire la dépense d'énergie nécessaire pour le broyage.

#### **I.3.4.6.3. Bénéfices écologiques et environnementaux**

- Diminution de l'émission du CO<sub>2</sub> par l'industrie cimentière.
- Elimination des sous-produits de la nature.

### **I.3.4.7. Poudre de silice**

#### **I.3.4.7.1. Définition**

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. Au départ, son utilisation a été motivée par des arguments économiques, car pour une même résistance, il était possible de produire un béton à moindre coût si une partie des matériaux cimentaires était remplacé par la fumée de silice dont le prix de vente était initialement bas.

Dans les années 1990, la dégradation des infrastructures a mis l'accent sur des préoccupations au niveau de la durabilité du béton et ainsi, la fumée de silice a trouvé application dans la production du 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. La fumée de silice est une poussière très fine avec un effet fortement pouzzolanique, utilisée en qualité d'addition et de stabilisateur. Les microsílices 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  $\mu\text{m}$ . Les microsílices ont composé à 85-95% ( $\text{SiO}_2$  amorphe), ont une très grande surface spécifique, qui est du même ordre de grandeur que la fumée de cigarettes.

#### **I.3.4.7.2. Effets**

La fumée de silice est l'addition pouzzolanique le plus réactif. Contrairement aux cendres volantes, le  $\text{SiO}_2$  amorphe commence à réagir après 2 à 3 jours environ. Elle se précipite sous forme de silicate de calcium hydraté C-S-H avec l'hydroxyde de calcium CH qui se forme lors de l'hydratation du ciment (figure I.2).



**Figure I.2 :** *Effet de la fumée de silice sur l'hydratation du ciment* [43]

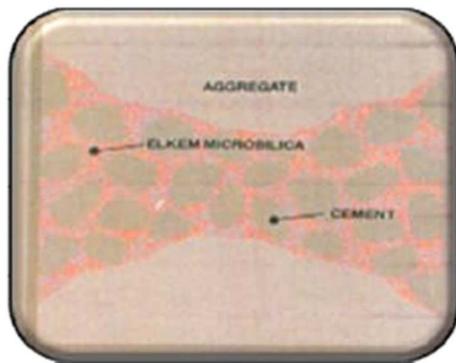
La portlandite a ainsi pu être totalement consommée par la réaction pouzzolanique après 20 jours lors d'une étude menée sur 18 fumées de silice différentes [44]. Les fumées de silice, lorsqu'elles entrent dans la composition du liant, peuvent par leur finesse s'insérer entre les grains de ciment et augmentent ainsi la compacité du béton. Du point de vue chimique, la fumée de silice est composée essentiellement de silice  $\text{SiO}_2$ .

Les mécanismes d'action de la fumée de silice dans le béton reposent sur des effets de nature physique et chimique. Ainsi la granulométrie des particules de fumée de silice, de dimension moyenne cent fois plus faible que celle du ciment, contribue à densifier la pâte par un effet physique de type filler qui conduit à un empilement plus compact des grains solides.

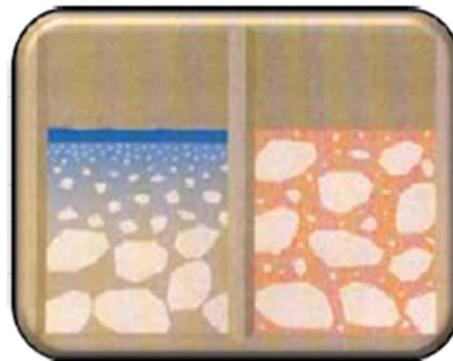
Par ailleurs, la réaction chimique pouzzolanique de consommation de l'hydroxyde de calcium par la silice amorphe démarre rapidement. Elle conduit à modifier la microstructure des produits d'hydratation en réduisant la dimension des pores de la pâte hydratée. Cependant, certaines divergences subsistent parmi les chercheurs sur la nature et la localisation de l'effet bénéfique apporté par cette addition. Certains d'entre eux considèrent que la fumée de silice améliore directement la résistance de la liaison granulat/matrice de ciment [31, 45, 46 et 47].

La consommation d'hydroxyde de calcium lors de la réaction pouzzolanique 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 des poussières de silice admissibles, par exemple à 10% 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 [31].

Les propriétés rhéologiques exceptionnelles de la fumée de silice, par la forme sphérique de ses grains, permettent de la substituer à l'eau et d'obtenir des matériaux à faible porosité et augmentent ainsi la compacité du béton. En comblant les interstices laissés entre les particules fines et les granulats, elle joue un rôle de lubrifiant (figure I.3).



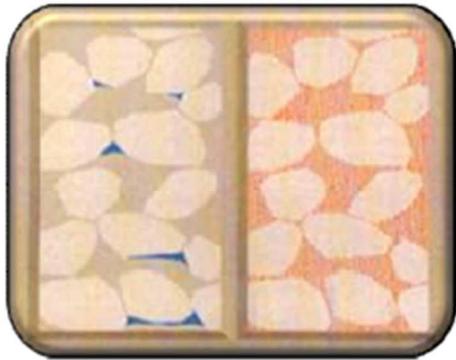
**Figure I. 3** : *Effet de la fumée de silice sur la compacité du béton [43]*



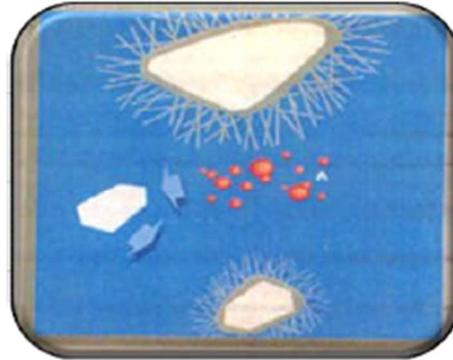
**Figure I. 4** : *Effet de la fumée de silice sur le ressuage[43]*

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

- ☉ Faible tendance au ressuage, à la sédimentation (figure I.4).
- ☉ Meilleure cohésion interne, légèrement thixotrope (figure I.5).
- ☉ 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.



**Figure I.5** : *Effet de la fumée de silice sur la cohésion interne*  
[43]



**Figure I.6** : *Effet de la fumée de silice sur la réaction d'hydratation*  
[43]

- 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 super plastifiant 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.

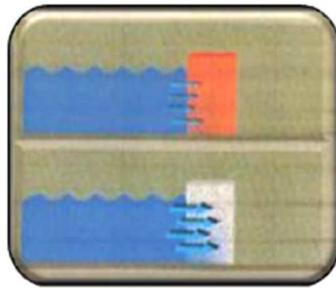
Plusieurs études [31, 45 et 48], montrent que la présence de fumée de silice accélère la réaction d'hydratation du ciment Portland. Cet effet accélérateur des fumées de silice sur l'hydratation combiné à l'effet de remplissage dû à leur finesse, peut conduire à des meilleures résistances à court terme du béton (figure I.6).

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 (figure I.7).

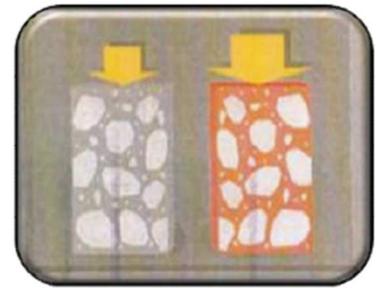
La diminution de la perméabilité à l'eau par la fixation de CH (figure I.7). Améliore les performances mécaniques à long terme: résistances en compression & traction (figure I.8 et I.9). Augmente la résistance contre le gel et/ou les produits de déverglaçage et améliore la résistance contre les agressions chimiques comme la montre la figure I.10ci dessous[43].



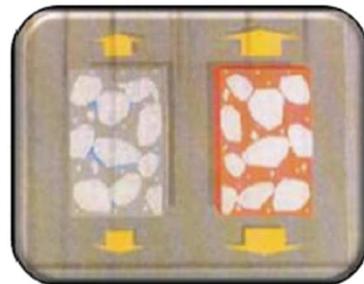
**Figure I.7** :*Effet de la fumée de silice sur la structure de la pate[43]*



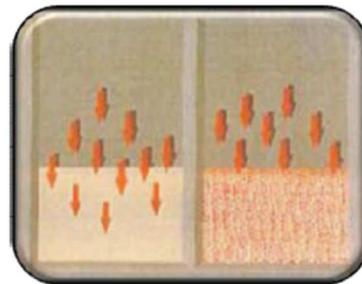
**Figure I.8** :*Effet de la fumée de silice sur la perméabilité à l'eau[43]*



**Figure I.9** :*Effet de la fumée sur la résistance à la compression[43]*



**Figure I.10** :*Effet de la fumée de silice sur la résistance à la traction[43]*



**Figure I.11** :*Effet de la fumée de silice sur la résistance contre les agressions chimiques[43]*

De même **Hooton [49]**, a mis en évidence: une diminution de la perméabilité à partir de 28 jours des pâtes de ciment avec l'introduction de la fumée de silice, une diminution de la porosité totale, une baisse du taux de Portlandite, comme le montre le tableau I.2.

**Tableau I.2 :** *Effet de la réaction pouzzolanique des fumées de silice sur des pâtes de ciment (E/C = 0.25, sans super plastifiant) [49]*

<i>A 28 jours</i>	<i>0% fumée de silice</i>	<i>20% fumée de silice</i>
<i>Coefficient de perméabilité (<math>\times 10^{-13}</math>) m/s</i>	<i>3.8</i>	<i>&lt; 0.1</i>
<i>Porosité totale (%)</i>	<i>14.9</i>	<i>9.8</i>
<i>Taux de portlandite</i>	<i>18</i>	<i>2</i>

L'évolution de la résistance s'avère plus lente pour des bétons contenant de la fumée de silice que pour des bétons sans fumée. Pourtant la résistance des bétons avec la fumée de silice augmente même au-delà de 450 jours [43].

#### **I.3.4.7.3. Les propriétés que la fumée de silice confère aux bétons .**

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

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

- Améliore les performances mécaniques à longs termes.
- Augmente le module d'élasticité.
- Améliore la résistance à l'abrasion et à l'érosion et la durabilité en milieux agressifs.
- Diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes d'alcali-réaction.
- Diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides.
- Réduit les risques de ségrégations et la teneur en hydroxyde de calcium, ce qui diminue le risque de lixiviation.

- Réduit le coût des ciments.
- Un mariage avantageux pour l'environnement.

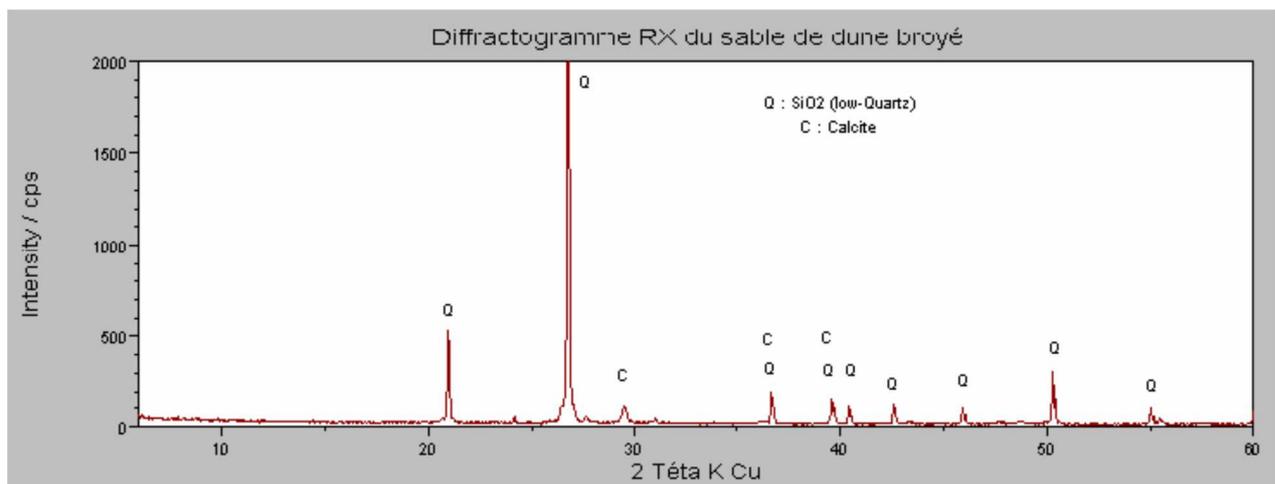
#### **I.3.4.7.4. Sable de dune finement broyé**

Dans notre pays, malgré l'abondance de sable de dune dans le sud, ce matériau reste inconnu. Sa quantité pourrait se chiffrer en milliards de m<sup>3</sup>.

Certaines de ses caractéristiques physico-chimiques laissent penser qu'il pourrait être adopté en tant que matériau de construction: indice de propreté élevée et absence dans sa composition de matières organiques et autres matières indésirables telles que les sulfates et carbonates.

Le sable de dune est composé de minuscules grains de quartz. Le quartz (c-à-d. du SiO<sub>2</sub>, soit du dioxyde de silicium ou de la silice) est l'un des minéraux les plus répandus sur terre.

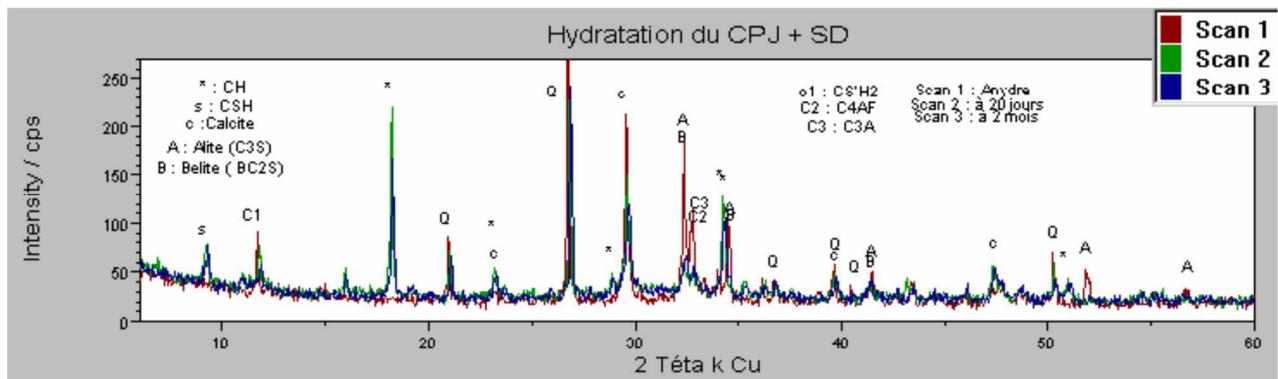
L'analyse par diffractométrie aux rayons X montre que le sable de dune finement broyé est constitué de SiO<sub>2</sub> bien cristallisé du type (low-quartz), contrairement au Sd, la fumée de silice à une structure amorphe [1, 2 et 3] (figure I.12).



**Figure I.12:** *Diffractogramme X du sable de dune broyé [1, 2 et 3]*

L'analyse par diffractométrie aux rayons X a mis en évidence le rôle pouzzolanique du sable de dune broyé (SDB). En effet, la faible quantité de Portlandite détectée dans les pâtes de ciment en présence de SDB, traduit la réaction pouzzolanique partielle de cette addition, qui contribue à l'augmentation de la résistance mécanique et qui améliore la compacité de la pâte [1, 2 et 3] (figure

I.13). L'incorporation du sable de dune siliceux finement broyé, sous forme de substitution au ciment Portland permet d'obtenir une nouvelle variété de ciment composé ayant des performances physico-mécaniques supérieures à celles du ciment Portland. De par leur réactivité pouzzolanique et leur rôle de remplissage dû aux fines particules du sable de dune broyé.



**Figure I.13 :** *Hydratation des pâtes aux différents âges (85% CPJ 42.5 + 15% Sd) [1, 2 et 3]*

Les propriétés des bétons sont régies par l'hydratation du ciment, cette dernière peut être modifiée par l'incorporation d'additions siliceux. Parmi les additions siliceux utilisés pour améliorer les propriétés des bétons, les fumées de silice sont les plus recommandées car elles densifient la matrice des bétons en formant des silicate de calcium hydraté supplémentaires issues de la fixation de la portlandite par les ultrafines particules de silice.

Néanmoins, ce type d'addition est coûteux et de plus non disponible en Algérie. Cette étude consiste à remplacer la fumée de silice par un matériau très abondant au sud Algérien qui est le sable de dune siliceux.

**Cheikh-Zouaoui[50]**, a montré que, globalement l'introduction de l'addition minérale siliceuse substituée (fumée de silice, sable siliceux broyé et sable siliceux rebroyé avec le ciment) joue un rôle bénéfique en améliorant les résistances mécaniques à moyen et long terme. Il apparaît notamment que l'introduction de sable siliceux avec le mode opératoire de malaxage-broyage donne des résistances mécaniques supérieures à celles des mélanges de référence et du même ordre de grandeur que l'introduction de fumée de silice. L'addition minérale sous forme de  $\text{SiO}_2$  conduit à la formation d'un supplément de C-S-H apportant ainsi une contribution supplémentaire à la résistance des mélanges substitués.

Inversement aux résistances mécaniques à 7 jours, les résistances mécaniques aux âges avancés à 90 jours, des bétons à base d'addition de Sd par substitution dépassent celles du béton témoin à base de CPJ 42.5, ce qui signifie que cette addition a un rôle pouzzolanique qui se traduit par la formation de silicate de calcium hydraté C-S-H II de deuxième génération. La cinétique de formation de ces C-S-H II par les additions dépend de leur finesse de leur teneur en silice et plus particulièrement de leur structure [2, 3, 37 et 65]. Dans le même contexte, **Wang and Ye [51]** ont montré que la présence de 20% environ du sable de dune broyé dans la pâte du ciment Portland va augmenter le degré d'hydratation du ciment à tous les âges. En outre, le degré d'hydratation est augmenté avec la finesse du Sd. Également une influence significative sur la porosité totale et la perméabilité à l'eau des pâtes du ciment pré-mélangé au sable de dune broyé.

Le sable de dune finement broyé, malgré sa nature cristalline, présente une réactivité pouzzolanique partielle [66]. Malheureusement, cette silice n'a pas toujours une importante réactivité, d'après De **Larrard [52]** aucune ultrafine n'est inerte. Ainsi le quartz broyé réputé cristallin, est amorphisé en surface. Ils peuvent donc s'associer à la chaux selon la réaction pouzzolanique classique. Le sable de dune finement broyé qui est siliceux, peut donc avoir les mêmes avantages physiques et pouzzolaniques que les autres additions, malgré son caractère cristallin [53 et 54]. Du point de vue chimique le sable de dune finement broyé est composé essentiellement de silice  $\text{SiO}_2$ . La silice cristalline présente une structure tridimensionnelle régulière, le motif de base est un tétraèdre dont chacun des sommets est occupé par un atome d'oxygène et le centre par un atome de silicium. Selon le diagramme de phase établi par **Fenner** (sa structure atomique est modifiée si la température atteint plus de  $870^\circ\text{C}$ ) le passage du quartz à la tridymite [54].

Une modification de la structure atomique d'un matériau peut survenir suite à des modifications de température et/ou de pression. La modification de la structure engendrera une modification des propriétés de la matière. Persistance du nouvel état cristallin après le retour à des conditions de pression et température habituelles [55].

## **I.4. HYDRATATION ET MICROSTRUCTURE**

### **I.4.1. Hydratation**

#### **I.4.1.1. Définition**

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 [56].

#### **I.4.1.2. Degré 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 au temps (t) sur la quantité de ciment anhydre initiale [57].

#### **I.4.1.3. Aspects cinétiques 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 fait prise, jusqu'à ce qu'il ne soit plus ouvrable. Puis le béton se solidifie. Enfin, lorsque la résistance devient mesurable (environ  $0.1 \text{ N/mm}^2$ ) on parle du béton durci [57]. La vitesse d'hydratation dépend de la température du béton frais et de la température ambiante, de la nature et de la finesse du ciment, de la teneur en ciment et du rapport E/C du béton, de 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

( $C_3S$ ,  $\beta C_2S$ ,  $C_3A$  et  $C_4AF$ ) et l'eau de gâchage [58]. Ces réactions sont exothermiques et sont responsables de la prise et du durcissement des matériaux cimentaires. La vitesse d'hydratation des diverses phases du ciment est différente. L'aluminate  $C_3A$  réagit très rapidement. En absence de sulfate, l'écran d'étringite ainsi formé bloque l'hydratation des autres constituants du ciment et plus particulièrement le  $C_3S$ . Par rapport au  $C_3S$ , le  $\beta C_2S$  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 [58].

#### **I.4.1.3.1. Hydratation des silicates ( $C_3S$ et $\beta C_2S$ )**

Par addition d'eau le  $C_3S$  est le composé qui durcit rapidement que le  $\beta C_2S$ . De par sa vitesse de réaction élevée on lui attribue le développement de résistance aux bas âges. Après le  $C_3A$ , il est le composé qui dégage le plus de chaleur d'hydratation [59]. Durant la réaction du  $C_3S$  et  $\beta C_2S$ , il se forme de l'hydroxyde de calcium et un gel de silicate de calcium hydraté. Pour un ciment donné, les quantités de C-S-H et de  $Ca(OH)_2$  dépendent essentiellement du rapport E/C et du temps de réaction.

En moyenne, une pâte de ciment ordinaire contient 50 à 70% de C-S-H et 25 à 30% de  $Ca(OH)_2$ . L'hydratation du  $\beta C_2S$  se déroule dans les mêmes conditions que le  $C_3S$ . Ce composé durcit lentement. Il est responsable des gains de résistance aux âges très avancés [59].

#### **I.4.1.3.2. Hydratation des aluminates ( $C_3A$ et $C_4AF$ )**

Le  $C_3A$  est le premier des composants à s'hydrater, suivi de  $C_3S$ . C'est le composé qui s'hydrate rapidement (comparé aux  $C_3S$ ,  $\beta C_2S$ ), il est responsable en partie des résistances au jeune âge 1 jour. Ce composé libère beaucoup de chaleur d'hydratation lors de son interaction avec l'eau. Sa vitesse de réaction a un effet direct sur les temps de prise du ciment Portland. C'est le composé qui est principalement attaqué par les sulfates. Le  $C_4AF$  s'hydrate d'une façon analogue au  $C_3A$  mais à une vitesse de réaction faible, il contribue peu ou pas aux résistances de la pâte de ciment. Il est responsable de la couleur du ciment et permet de diminuer la température de clinker au four [59].

#### **I.4.1.4. Chimie d'hydratation du ciment Portland avec additions**

Les différentes additions minérales affectent la cinétique de la réaction d'hydratation en raison de leur composition chimique, de leur réactivité et de leur granulométrie ainsi que la forme de leur élément [60]. Au cours de l'hydratation du ciment Portland, il se forme sur chacun des grains une

couche de produits d'hydratation qui devient de plus en plus épaisse (d'abord principalement du C-S-H), alors que l'hydroxyde de calcium également formé se sépare partiellement de la solution interstitielle, sous forme de cristaux hexagonaux en paillettes. L'hydroxyde de calcium est produit de CaO en excès durant l'hydratation du CPA et sert comme la principale source d'alcalinité pour l'activité pouzzolanique, pour la conversion de SiO<sub>2</sub> de la pouzzolane en C-S-H. L'alcalinité du béton est due à Ca(OH)<sub>2</sub> créée par l'hydratation du ciment Portland [35]. La réaction pouzzolanique se produit par consommation de portlandite, la fumée de silice SiO<sub>2</sub> permet une réduction de la teneur en Ca(OH)<sub>2</sub> et par conséquent une augmentation de la résistance du mélange [60].

#### **I.4.2. Microstructure des matériaux cimentaires**

Le processus d'hydratation d'un ciment conduit à un matériau durci composé de plusieurs phases de l'agencement desquelles résulte la structure et la texture de la pâte. Ces différentes phases peuvent être: [61].

- ✓ 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[62].

##### **I.4.2.1. Composition du ciment hydraté**

La pâte de ciment hydraté est formée :

- ✓ Les hydrates (C-S-H, Ca(OH)<sub>2</sub> et Aluminates).
- ✓ Les grains de ciment non hydraté, des espaces capillaires et des bulles d'air.

##### **I.4.2.2. Composition des hydrates**

Les hydrates comprennent :

- ✓ Les silicates de calcium hydratés et la chaux hydratée.

- ✓ Les aluminates hydratés et l'eau adsorbée sur certains cristaux et des impuretés.

## **I.5. FABRICATION**

### **I.5.1. Composition**

Le mélange de ciment et d'eau (et éventuellement avec des additions) constitue ce qu'on appelle pâte de ciment. En y rajoutant du sable, on obtient un mortier. En y additionnant du sable et un granulats plus gros on obtient un béton. Le choix de la formulation d'un béton impose un compromis entre trois objectifs : une facilité de mise en œuvre définie par son ouvrabilité, une résistance visée à différents stades de maturation et une durabilité vis-à-vis des agressions physico-chimiques du milieu ambiant.

### **I.5.2. 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.

### **I.5.3. Traitement de cure**

On entend par traitement ultérieur d'un béton toutes les mesures appropriées visant à protéger le béton mis en œuvre jusqu'à ce qu'il atteigne une résistance suffisante. Les traitements de cure appropriés sont : 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 et 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 nano-porosité est légèrement modifiée : la grosse porosité a tendance à augmenter[63].

## CONCLUSION

**L**a consommation du ciment est fortement liée au développement local. En Algérie le besoin en ciment a fortement augmenté au cours des dernières années. La production d'une tonne de ciment, un ingrédient essentiel du béton, émet environ une tonne de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, un gaz à effet de serre. On prévoit que la production mondiale annuelle de ciment Portland, et des émissions de CO<sub>2</sub> qui y sont associées, passera du 1,4 milliard de tonnes produites en 1995 à 3.4 milliards de tonnes en 2015[69].

A la lumière de l'examen de la documentation, le recours aux additions minérales en substitution du clinker dans le ciment Portland est un excellent exemple de valorisation réussie de déchets industriels qui permet, de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub>.

A l'origine, les additions ont été lancées pour des raisons économiques. Soit ils existent sous forme de produits naturels, qui ne devaient être que peu traités, soit ils résultaient de processus industriels, sous forme de déchets ou de sous-produits. Indépendamment de ces avantages fonctionnels, écologiques et économiques, des additions influant positivement sur certaines des propriétés du béton à l'état frais mais surtout à l'état durci.

La raison derrière l'addition de la fumée de silice est d'amener une augmentation des performances physico-mécaniques, augmente le module d'élasticité, diminue le risque de lixiviation et diminue la perméabilité. La tendance actuelle vise l'élaboration des bétons à hautes performances. Ces bétons sont généralement obtenus à base de fumées de silice.

A défaut de fumées de silice, coûteuse, le présent travail traite l'effet du sable de dune broyé en fonction de leurs teneurs sur la résistance en compression des bétons.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. **ARROUDJ K. et OUDJIT M.N.**, «Influence du sable de dune finement broyé sur l'hydratation des ciments». 2<sup>ème</sup> Colloque Maghrébin en génie civil, Biskra, Algérie les 10 et 11 Décembre, 119-127, 2002.
- [2]. **ARROUDJ K., OUDJIT M.N., LANEZ M. et CARAYON M.T.**, «Influence des ajouts siliceux sur la compacité des mortiers et bétons». Séminaire CETEDUB I. 24, 25, 26 Mai à L'USTHB, 291-298, 2004 a.
- [3]. **ARROUDJ K., OUDJIT M.N., LANEZ M. et CARAYON M.T.**, «Mise en évidence par diffractométrie aux rayons X des C-S-H de seconde génération». 1<sup>ère</sup> séminaire sur les technologies du béton, le béton, perfection et incertitudes, 18-19 Septembre - Hôtel Hilton Alger, 1-8, 2004 b.
- [4]. **GETTALA S.**, «Contribution à l'étude de l'influence de l'ajout du sable de dune finement broyé au ciment, sur les performances physico-mécaniques, la déformabilité & la durabilité du béton ». Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [5]. **SITUATION ENVIRONNEMENTALE DES INDUSTRIES.**, «L'industrie cimentière», Janvier 2005, Institut de conseil et d'études en développement durable, ASBL.
- [6]. **GABRYSIAK F.**, Cours (chapitre 4). «Matériaux - Les bétons».
- [7]. **BAROGHEL-BOUNY V.**, «Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons; méthodes, analyse, interprétations». Edition du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 1994, 468.
- [8]. **MOUDILOU E.**, «Cinétiques et mécaniques de relargage des métaux lourds présents en traces dans les matrices cimentaires». CTG, Italcementi. Université d'orleans. Thèse d'état, Déc. 2000.
- [9]. **NEVILLE A.M.**, «Propriétés des bétons». Traduction CRIB, Editions Eyrolles, 2000. Paris, 806.
- [10]. **ROSSI P. and TOUTLEMONDE F.**, «Effect of loading rate on the tensile behaviour of concrete: description of the physical mechanisms». *Materials and Structures*, vol.29(2), pp. 116-118, March 1996.
- [11]. **AREZKI TAGNIT- HAMOU.**, Cours 2003 (chapitre 7). «Ajout dans le ciment». Université de Sherbrooke. Québec. Canada.
- [12]. **BOUDCHICHA A.**, «Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons». Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [13]. **BESSA A.**, «Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers». Thèse de Doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, 2004.
- [14]. **FELEKOGLU B., TOSUN K., BARADAN B., ALTUN A. and UYULGAN B.**, «The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self compacting repair mortars». *Cement and Concrete Research*, vol.36(9), p.1719-1726, 2006.

- [15]. **GRZESZCZYK S. and LIPOWSKI G.**, «Effect of content and particle size distribution of high calcium fly ash on the rheological properties of cement pastes». *Cement and Concrete Research*, vol.27(6), p.907-916, 1997.
- [16]. **BAJOU L., YOUJUN X. and QIANLIAN Y.**, «Influence of ultrafine fly ash composite on the fluidity and compressive strength of concrete». *Cement and Concrete Research*, vol.30(9), p.1489-1493, 2000.
- [17]. **BESSA A., BIGAS J.P. et GALLIAS J.L.**, «Evaluation de la contribution liante des additions minérales à la porosité, à la résistance en compression et à la durabilité des mortiers». Université de Cergy-Pontoise, 5, Mail Gay-Lussac Neuville-sur-Oise, 95031 Cergy-Pontoise cedex. XXII<sup>èmes</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil 2004 - VILLE & GENIE CIVIL. 1-8.
- [18]. **KRONLOF A.**, «Effect of very fine aggregate on concrete strength». *Materials and Structures*, vol.27(1), p.15-25, 1994.
- [19]. **KWAN A.K.H.**, «Use of condensed silica fume for making high-strength self-consolidates concrete». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol.27(4), p.620-627, 2000.
- [20]. **YIJIN L.S., CHIQIONG Z. and YINGLI G.**, «The effect of fly ash on the fluidity of cement paste, mortar and concrete». *Proceeding of the international work shop of sustainable development and concrete technology*, p.339-345, Beijing 2004.
- [21]. **CYR M., LAWRENCE P. and RINGOT E.**, «Mineral admixtures in mortars, quantification of the physical effects of inert materials in relation on short term hydration». *Cement and Concrete Research*, vol.35(4), p.719-730, 2005.
- [22]. **MEMON A.H., RADIN S.S., ZAIN M.F.M. and TROTTIER J.F.**, «Effect of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater». *Cement and Concrete Research*, vol.32(3), p.373-377, 2002.
- [23]. **LAWRENCE P.**, «Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires». Thèse de Doctorat de l'université Paul Sabatier, Toulouse, 2000.
- [24]. **CYR M., LAWRENCE P. and RINGOT E.**, «Efficiency of mineral admixtures in mortars, quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength». *Cement and Concrete Research*, vol.36(2), p.264-277, 2006.
- [25]. **LILKOV V., DIMITROVA E. and PETROV O.**, «Hydration process of cement containing fly ash and silica fume: The first 24 hours». *Cement and Concrete Research*, vol.27(4), p.577-592, 1997.
- [26]. **JIANG S. et VAN DAMME H.**, «Influence des fillers de nature différente sur l'hydratation et la texture des pâtes de C<sub>3</sub>S». Rapport de CRMD-ATILH, Université d'Orléans, 1996.
- [27]. **CARE S., LINDER R., BAROGHEL BOUNY V., DE LARRARD F. and CHARONNAT Y.**, «Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage du béton - Plan d'expérience et analyse statique». LCPC, Ouvrages d'art OA 33, Février 2002.
- [28]. **KARA Ali R.**, «Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires». Thèse de Doctorat de l'université de Cergy-Pontoise,

2002.

[29]. **BENEZET J.C. and BENHASSAINE A.**, «The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder». *Powder Technology*, vol.103(1), p.26-29, 1999.

[30]. **BENEZET J.C. et BENHASSAINE A.**, «Influence de la taille des particules sur la réactivité pouzzolanique de poudres de quartz». *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 219, janvier-février 1999, pp.17-28.

[31]. **CHENG-YI HUANG. and FELDMAN R.F.**, «Hydration reactions in Portland cement silica fume blends». *Cement and Concrete Research*, vol.15(4), p.585-592, 1985.

[32]. **BESSA A.**, «Evaluation de la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment dans les mortiers». *XXI<sup>èmes</sup> rencontres universitaires de génie civil - Prix «René Houpert»*, Université de Cergy-Pontoise, 5, Mail Gay-Lussac, 95031 Cergy-Pontoise cedex, 2003, 39-48.

[33]. **CYR M., LAWRENCE P., RINGOT E. and CARLES-GIBERGUES.**, «Variation des facteurs d'efficacité caractérisant les additions minérales». *Matériaux and Structures*, vol.33(7), p.466-472, 2000.

[34]. **LAWRENCE P., CYR M. and RINGOT E.**, «Mineral admixtures in mortars, effect of inert materials on short-term hydration». *Cement and Concrete Research*, vol.33(12), p.1939-1947, 2003.

[35]. **LAWRENCE P., CYR M. and RINGOT E.**, «Mineral admixtures in mortars, effect of type, amount and finesses of fine constituents on compressive strength». *Cement and Concrete Research*, vol.35(6), p.1092-1105, 2005.

[36]. **CYR M., LAWRENCE P., RINGOT E. and CARLES-GIBERGUES.**, «Variation des facteurs d'efficacité caractérisant les additions minérales». *Matériaux and Structures*, vol.33(7), p.466-472, 2000.

[37]. **LANEZ M.**, «Contribution à l'étude des bétons de poudres réactives». *Magister, USTHB/FGC, Alger*. 129, 2005.

[38]. **BENEZET J.C.**, «Réactivité pouzzolanique dans la système quartz-oxyde de calcium-eau». *Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II*, 1997.

[39]. **APPA RAO G.**, «Development of strength with age of mortars containing silica fume». *Cement and Concrete Research*, vol.31(81), p.1141-1146, 2001.

[40]. **BARON J. et OLLIVIER J.P.**, «Les bétons, bases et données pour leur formulation». *Editions Eyrolles*, 1997, 522.

[41]. **AKLI A.**, «Intégration des préoccupations environnementales dans le développement industriel». *La revue de l'environnement symbiose*, n°8, pp.15-18, 2000.

[42]. **MEHTA P.K.**, «Concrete technology for sustainable development». *Concrete International*, vol. 21, n°11, 1999.

[43]. **ELKEM MICROSILICA FOR SUPERIOR CONCRETE.** «How to improve strength and durability of concrete», P.O.Box 8126 Vaagsbygd, N-4602 Kristian Sand S. NORWAY.

[44]. **OLLIVIER J.P., CARLES-GIBERGUES A. et HANNA B.**, «Activité pouzzolanique et action de

remplissage d'une fumée de silice dans les matrices et bétons de haute résistance». *Cement and Concrete Research*, vol.18(3), pp.438-448, 1988.

[45]. **GOLDMAN A. and BENTUR A.**, «Bond effects in high silica-fume». *ACI Journal of Materials*, vol.86, 440, 1989.

[46]. **LARBI J.A.**, «Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete». *Heron, Delft, the Netherlands*, 38, 1993.

[47]. **TOUTANJI H.A. and EL-KORCHI T.**, «The influence of silica fumes on the compressive strength of cement paste and mortar». *Cement and Concrete Research*, vol.25(7), p.1591-1602, 1995.

[48]. **BUIL M.**, «Comportement physico-chimique du système ciment-fumées de silice». *Annales de l'ITBTP, Paris* 1990, 483, 19-29.

[49]. **DIAMOND S.**, «The Microstructure of Cement Paste in Concrete». *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Cong. On the Chem. Of Cement*, pp.122- 147, Rio de Janeiro 1986.

[50]. **CHEIKH-ZOUAOU M.**, «Contribution à l'étude de la cinétique d'hydratation au jeune âge des bétons à hautes résistances». *Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine*, 2008.

[51]. **WANG Y. and YE G.**, «Influence on microstructure of micronized sand as cement replacement in cementitious materials». *Journal of Wuhan University of Technology*, vol.32(17), p.152-157. Sept. 2010.

[52]. **DE LARRARD F.**, «Formulation et propriétés des bétons à très hauts performances». *Rapport deRecherche L.P.C n°149. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, Mars* 1988.

[53]. **BOUCHOUKA A.**, «Etude physico-chimique et mécanique des bétons à hautes performances à base de matériaux locaux». *Magister. ENTP*, 2002.

[54]. **PASCAL P.**, «Nouveau traité de chimie minérale (Silicium)». *Tome VIII, 2<sup>ème</sup> fascicule. Paris, Masson*, 1965, pp.2-90 et 423-445.

[55]. **QUEISSER A.**, *Cours matériaux de construction «Matériaux pierreux: les minéraux»*. École polytechnique fédérale de Lausanne.

[56]. **PLASSAIS A.**, «Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments». *Thèse deDoctorat. Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Paris 6*, 167, 2003.

[57]. **BARON J. et SAUTREY R.**, «Le béton Hydraulique: connaissance et pratique». *Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, France*, 1995.

[58]. **DREUX G. et FESTA J.**, «Nouveau guide du béton et de ses constituants», 8<sup>ème</sup> édition, *Édition Eyrolles*, 1998. p.409.

[59]. **KHAYAT K.**, «Les ciments». *Béton Canada. Technologie du béton*, 1995.

[60]. **BYFORS K.**, «Influence of silica fume and flyash on chloride diffusion and PH values in cement paste». *Cement and Concrete Research*, vol.17(1), p.115-130,1987.

[61]. **TAYLOR H.F.W.**, «Cement chemistry», *Academic Press, London*, 1990.

[62]. **VERNET C.**, «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.

[63]. **MASSAZZA .F .**, «Pozzolana and Pozzolanic cements », *Leas chem.cem.coner*.2008;471-631.

[64]. **DAMIDOT D., NONAT A., BARRET P., BERTRANDIE D., ZANNI H. and RASSEM R.**, «C3S hydration in diluted and stirred suspensions, 3. NMR study of C-S-H precipitated during the two kinetic steps». *Advances in cement Research*, vol.7 (25), p.1-8, 1995.

[65]. **OUDJIT M.N. et LANEZ M.**, «Contribution a l'étude des bétons de poudres réactivés». *Faculté de Génie Civil/U.S.T.H.B, Colloque CMEDIMAT 2005, 06 et 07 Décembre 2005*, 1-8.

[66]. **ARROUDJ K.**, «Influence des ajouts sur la prise et le durcissement des bétons». *Magister, USTHB, Alger, 2001*.

[67]. **BenKhadda B .**, «Effet de l'étuvage par énergie solaire sur les propriétés mécaniques, la déformabilité et la durabilité des bétons. ». *Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014*.

[68]. **Alhozaimy A., O. A. Alawad, M. S. Jaafar, A. Al-Negheimish & J. Noorzaei.**, « Use of fine ground dune sand as a supplementary cementing material ». *Journal of Civil Engineering and Management*, 20:1, 32-37.2014.

[69]. <http://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1708-production-mondiale-de-ciment.html>