

**\* introduction :**

Le comportement du béton est le résultat d'une interaction complexe entre ces divers constituants, c'est la raison pour laquelle nous commençons ce chapitre par une présentation des matériaux mis en œuvre pour confectionner le mélange et la proportion avec laquelle ils entrent dans la composition. Le béton de sable est constitué de ciment, d'eau, de granulat (sable et gravier ( $S/G < 0.7$ )) et éventuellement d'adjuvant ou d'ajouts. Les caractéristiques chimiques et physiques de ces matériaux d'étude sont également présentées pour analyser et justifier ultérieurement les résultats d'essais. [5]

**1-le ciment:**

Le ciment est nécessaire à la fabrication du béton. En termes d'énergie nécessaire à sa production, le ciment se classe au troisième rang de tous les matériaux, devancé seulement par l'acier et l'aluminium.

Selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO<sub>2</sub>. 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. L'utilisation de résidus industriels récupérés et recyclés, tels que les ajouts cimentaires et les gisements de ressources naturelles tels que la pouzzolane et le calcaire, comme produits de remplacement partiel du ciment Portland dans le béton, permet de réduire les émissions des gaz à effet de serre et se traduit par la fabrication d'un béton non polluant et durable sur le plan environnemental.

Dans l'industrie de ciment lorsqu'un des ajouts cimentaires est ajouté au ciment, ce dernier est dit «binaire» et s'il y'en a deux ajouts il est appelé «ternaire». Cette approche qui consiste à unir divers matériaux cimentaires existe depuis le début des années 80. Par contre ce n'est que depuis quelques années que l'industrie du béton se montre de plus en plus réceptive à cette nouvelle façon de faire le béton. En plus de procurer une très grande durabilité, le ciment ternaire permet au béton d'être beaucoup plus imperméable aux agressions chimiques. [4]

**1-1-Définition du ciment :**

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450-1550 C°, température de fusion avec une quantité nécessaire de gypse et un / ou des

ajout(s) minéraux actifs (ciment composé), faite simultanément ou par malaxage minutieux des mêmes matériaux broyés séparément.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et durcir en présence d'eau et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau.

Ce durcissement est du à l'hydratation de certain composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

L'expression de "pâte de ciment durcissant" sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide. [4]

### **Ingrédients du ciment :**

Minéralogiquement parlant, le ciment est fait essentiellement à partir de quatre constituants :

- \* La chaux  $\text{CaO}$  (désignation simplifiée « C ») plutôt basique ;
- \* la silice  $\text{SiO}_2$  (désignation simplifiée « S ») ;
- \* l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (désignation simplifiée « A ») ;
- \* l'oxyde de fer  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (désignation simplifiée « F ») plutôt acide.

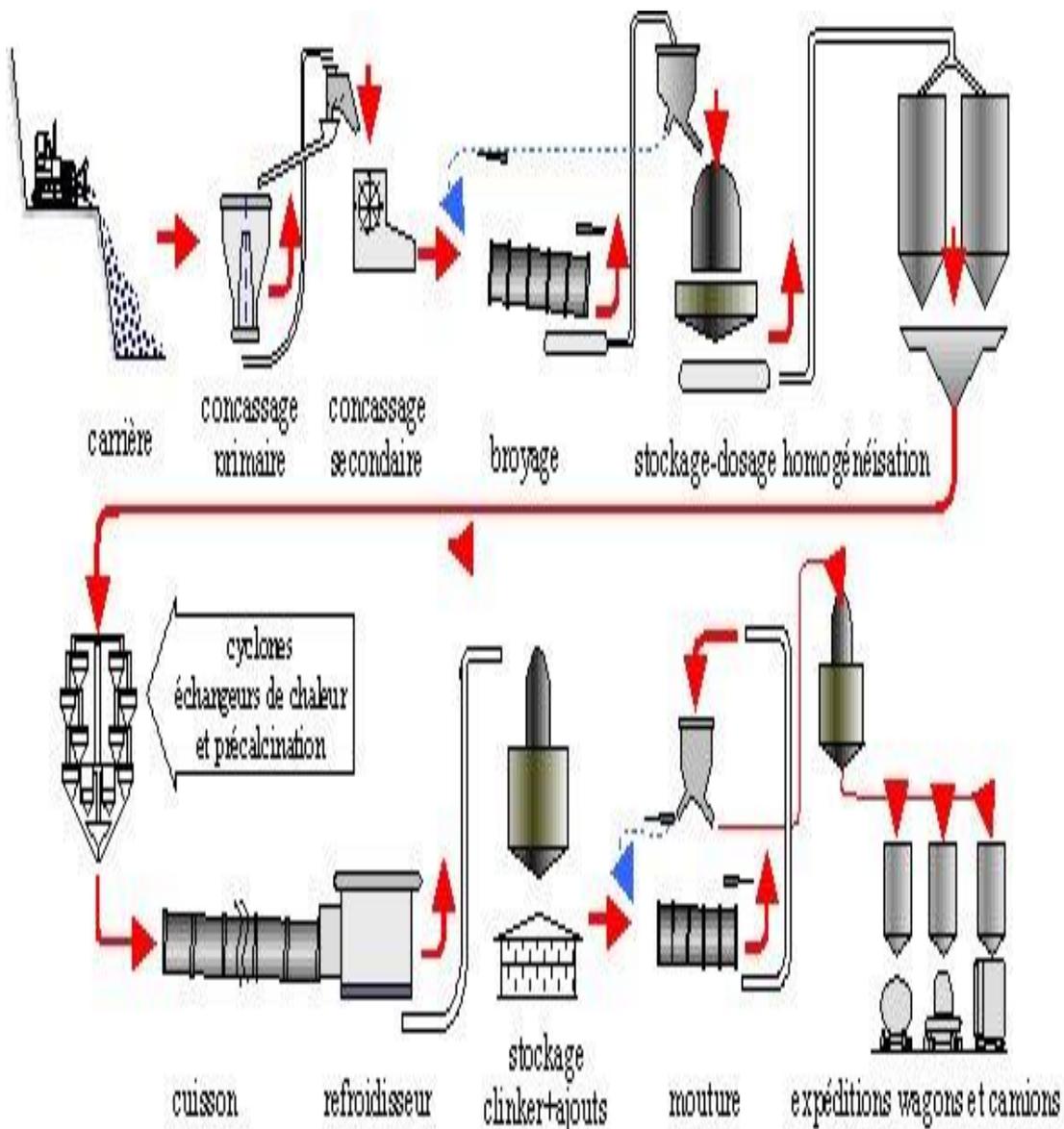
Ces quatre éléments de base ne se trouvent pas dans la nature dans des états adéquats favorisant l'émergence des liants hydrauliques. En effet, la chaux  $\text{CaO}$  se carbonate facilement en absorbant le gaz carbonique de l'air, pour devenir de la roche calcaire, en abondance dans la nature. Les trois oxydes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) abondent dans la nature sous forme cristallisée et stable (sable, argiles, etc.). Ils doivent donc subir un traitement approprié pour les amener dans un état de réactivité. Sans ce traitement, rien ne se passe ou, au mieux, peu de choses. [4]

### **1-2- Le principe de fabrication du ciment : (Figure1.1)**

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes :

- \* préparation du cru ;

- \* cuisson ;
- \* broyage et conditionnement.



Figure(1.1) : Fabrication du ciment.

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant :

- Calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.
- Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au delà de 100 °C, le départ d'eau d'avantage liée. A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et en chaux (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>).

- Le mélange est porté à 1450-1550 °C, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante: une partie de CaO est retenue par Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en formant une masse liquide. SiO<sub>2</sub> et CaO restant réagissent pour donner le silicate bicalcique dont une partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné.

### 1-3-Types de ciment:

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages :

- \* Résistances mécaniques ;
- \* Résistance à une attaque physique ou chimique ;
- \* Mise en œuvre particulière. [3]

Tableau(1.1) : Liste des différents types des ciments.

Désignation	Types de ciment	Clinker %	Ajouts et Teneurs en %	Matière secondaire
CEM I	Ciment Portland	95 à 100	/	0 à 5%
CEM II /A CEM II /B	Ciment Portland compose	80 à 94 65 à 79	L'un des Ajouts 06 à 20 21 à 35	
CEM III/A CEM III/B CEM III/C	Ciment de haut fourneau	35 à 64 20 à 34 05 à 19	Laitier 35 à 65 66 à 80 81 à 95	
CEM IV/A CEM IV/B	Ciment pouzzolanique	65 à 90 45 à 64	Pouzzolane 10 à 35 cendre ou fumée silice 36 à 55	
CEM V/ A CEM V/ B	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 20 à 39	Laitier 18 à 30 et cendre 31 à 50	

### 2-Le sable:

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. [8]

#### 2-1-On peut classer les sables selon trois paramètres dont:

a) **La granularité:** permet de séparer le 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. [8]

### **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 et fines) avec elle.

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. [10]

### **4-les ajouts minéraux:**

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

#### **4-1-Définition:**

Les ajouts minéraux 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 ajouts minéraux doivent être prises en compte dans le calcul de la composition du béton.

Les ajouts minéraux, 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. [4]

#### **4-2-Bénéfices de l'utilisation des ajouts minéraux:**

##### **a-bénéfices fonctionnels:**

- \* L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse).
- \* Ils 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.
- \* Réduit le prix du béton.

##### **c-bénéfices écologiques et environnementaux:**

- \* Diminution de l'émission du (CO<sub>2</sub>) par l'industrie cimentière.
- \* Elimination des sous-produits de la nature. [5]

#### **4-3-Classification des ajouts minéraux:**

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

##### **4-3-1-les ajouts minéraux inertes :**

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60 µm ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305).

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats.

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires; la poussière et le sable de dune. [4]

#### **a- 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. Une des raisons qui motivent l'utilisation des fillers est la réduction du coût de production.

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. [8]

#### **b- La poussière:**

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm<sup>2</sup>/ g. le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout. [4]

#### **c- Le sable de dune:**

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 a constitué de SiO<sub>2</sub> bien cristallisé du type (low-quartz), contrairement au S d, la fumée de silice à une structure amorphe. [9]

#### 4-3-2-Les ajouts minéraux actifs :

##### a- 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). [4]

##### b- la fumée de silice :

La fumée de silice est un sous produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium ou de zircone Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferrosilicium).

Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, SiO se forme [29] et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice SiO<sub>2</sub>. Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage .D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice.

La teneur en SiO<sub>2</sub> de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée plus la teneur en SiO<sub>2</sub> de la fumée de silice est élevée. Les fumées de silice produites durant la fabrication de silicium métal contiennent en général plus de 90% de SiO<sub>2</sub>.

La fumée de silice produite lors de la fabrication d'un alliage Fe –Si à 75% a une teneur en silice généralement supérieure à 85%.

Du point de vue structural, la fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse.

Du point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre 0.03µm et 0.3µm (le diamètre moyen habituel se situant en dessous de 0.1µm), de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/ 10 de micron.

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice. Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique. La fumée de silice est aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, mais le terme fumé de silice est le plus généralement utilisé.

La densité de la fumée de silice est généralement de 2.2, mais aussi un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Elle est moins dense que le ciment Portland dont la densité est 3.1.

Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise. Lorsque l'on considère les propriétés du béton aux fumées de silice, il importe de garder à l'esprit qu'on utilise ces dernières de deux manières différentes :

\*Comme substitue du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées, en général pour des raisons d'économie ;

\*Comme ajout, pour améliorer les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. [4]

### **c- Le laitier de haut fourneau :**

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

D'un point de vue chimique, les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte. Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au-dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément.

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été cobroyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- \* Broyage poussé ;
- \* Chaleur (étuvage, autoclavage) ;
- \* Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (gypse). [4]

### **d- 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  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$  (50 % < 20  $\mu\text{m}$ ). La forme et la granulométrie des cendres volantes ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais. [9]

### e- Le verre :

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contienne des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland dans les bétons.

Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons ont gonflé et fissuré.

Depuis, l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que depuis une quinzaine d'années que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités et celles-ci ont encouragé de nouvelles études.

#### e-1- Définition du verre :

Dans un gaz, les atomes sont en agitation permanente et occupent tout le volume disponible : il est impossible de prévoir la position des atomes à un instant donné. En dehors des chocs, ces atomes ne sont pas en contact entre eux. L'état gazeux est un état totalement désordonné.

Un liquide occupe un volume constant, indépendant de la pression; les atomes sont en contact entre eux. Même si les atomes ou les molécules sont très mobiles on peut définir leur proche environnement: on dit que les liquides possèdent un ordre à courte distance.

L'état solide est plus ordonné que l'état gazeux ou que l'état liquide: les cristaux en sont une bonne illustration. Il existe des solides apparemment moins ordonnés : verre, polymères vitreux et des solides partiellement ordonnés

comme les polymères semi-cristallins. Pour tous ces matériaux non-cristallins, il existe fréquemment une certaine forme d'ordre à courte distance, même si ce n'est pas l'ordre cristallin. Si l'on fond des cristaux de quartz naturel, on constate après refroidissement brutal que le matériau manifeste des propriétés différentes de celles du matériau initial.

On obtient un verre: silice vitreuse. L'étude approfondie de la silice vitreuse, en particulier par diffraction des rayons X, montre que les distances interatomiques imposées par les liaisons covalentes sont toujours respectées. Les tétraèdres continuent à exister dans la silice vitreuse, comme dans la cristobalite, mais il n'y a pas de motif qui se répète périodiquement. [4]

### **e-2-Comportements du verre dans un milieu cimentaire :**

Comme nous l'avons précédemment indiqué, il est maintenant bien établi que le verre incorporé dans les bétons peut manifester plusieurs types de comportement, essentiellement en fonction de sa granularité : une granularité grossière tend à provoquer un phénomène d'alcali-réaction générateur de désordres, alors qu'un verre fin développe une action bénéfique identifiable à une réaction pouzzolanique.

### **4-4-Action des ajouts minéraux sur les matériaux 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 cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire.

Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes, s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions dans un matériau cimentaire :

\* Un effet granulaire (filler) résultant des modifications apportées par l'addition sur la structure granulaire du matériau en présence d'eau et

éventuellement d'adjuvant et qui agit sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais.

\* Un effet physico-chimique et microstructural engendré par les multiples interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment et qui agit sur l'évolution de l'hydratation du ciment au cours de la prise et du durcissement.

\* un effet purement chimique propre à certaines additions en milieu cimentaire qui agit au cours de l'hydratation du ciment et qui interagit fortement avec l'effet physico-chimique. [4]

#### 4-5-L'utilisation des ajouts en Algérie :

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El-Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf. Tableau(1.2) donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes. [11]

Tableau(1.2):Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes.

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
ERCE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El Kebira	
	Hamma Bouziane	
	H'djar Essaoud	Laitier
	Tebessa	
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raïss Hamidou	Poussière
	Sour EL Ghozlane	Calcaire/Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	