

III.1.Introduction

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. La plupart des ajouts minéraux ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C2S et du C3S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland (N F P 18-508). On peut écrire donc une réaction pouzzolanique de la façon simple suivante : Pouzzolane + chaux + eau = Silicate de calcium hydraté il faut noter qu'à la température de la pièce, cette réaction est généralement lente et peut se développer sur plusieurs semaines cependant plus la pouzzolane est fine et vitreuse, plus sa réaction avec la chaux est rapide. [19]

L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C2S et du C3S (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux contribue à la chute de résistance de la pâte de ciment hydratée. Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau, ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte de ciment. Le seul aspect positif de la présence de chaux dans un béton est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures d'acier. Quand on fabrique des bétons, si on utilise 20 à 30% de pouzzolane, théoriquement, on pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment portland pour la transformer en C-S-H. Cependant, les conditions dans lesquelles on utilise le béton sont très différentes de cette situation idéale et la réaction pouzzolanique n'est jamais complète. Ces matériaux étant des sous-produits industriels, leurs compositions chimiques sont en général moins bien définies que celle du ciment Portland. [19]

Ces ajouts sont utilisés pour fabriquer des bétons qui ont des propriétés physiques et mécanique améliorées, en particulier une meilleur durabilité lorsqu'ils sont soumise à certains environnement particulièrement agressifs (environnement marin, eaux sulfatées,

solution acides, gaz carboniqueetc.) et surtout pour abaisser l'élévation de température du béton lorsque la réaction chimique se développe les produits utilisés dans les bétons à haut performance sont essentiellement :

- ❖ Les cendres volantes
- ❖ Les laitiers de haut fourneau
- ❖ Les fumées de silice
- ❖ Les fillers calcaires
- ❖ La pouzzolane

III.2.Les ajouts minéraux actifs

III.2.1.Fumée de silice

L'incorporation de fumée de silice dans les bétons conduit à des améliorations remarquables des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons. Pour les bétons frais, la fumée de silice comble le fuseau granulaire et supprime les tendances au ressuage ou à la ségrégation tout en réduisant les chaleurs d'hydratation.

Pour les bétons durcis, la finesse de la fumée de silice permet de créer une microstructure très dense qui conduit à des bétons extrêmement compacts, à caractéristiques mécaniques élevées en réduisant les teneurs en eau grâce à l'adjuvantation.

Ces bétons ont ainsi une résistance nettement renforcée vis-à-vis des agents ou des phénomènes agressifs : attaques chimiques, acides, sulfates, abrasion gel/dégel, en réduisant significativement la porosité et la perméabilité, la carbonatation, les phénomènes d'alcali-réaction et de réaction sulfatique.

III.2.1.1.Principe de fabrication

La fumée de silice est obtenue pendant la production du silicium et des alliages de ferrosilicium. Ces produits sont fabriqués dans un four à arc, en réduisant le quartz par un apport approprié de carbone, à une température d'environ 2 000 °C.

La fumée de silice est extraite en surface du four de réduction par des ventilateurs principaux et résulte de la condensation du gaz SiO, intermédiaire réactionnel du procédé de carboréduction. Elle est ensuite récupérée et filtrée dans un filtre à manches, avant d'être densifiée pour en faciliter la manipulation.

Certaines impuretés contenues dans les matières premières (alcalins par exemple) sont également réduites, volatilisées et oxydées dans le four.

Les caractéristiques de la fumée de silice dépendent de plusieurs facteurs. Le type de production en four à arc (Si ou FeSi) peut par exemple influencer sur la teneur en SiO₂ et les différentes impuretés de la fumée de silice. Le mélange de réducteurs utilisé dans le four peut, quant à lui, conduire à des colorations différentes du produit (de gris clair à gris foncé), sans pour autant en changer les performances. Enfin, la dernière étape de densification permet d'ajuster la densité apparente du produit.

Jusque dans le milieu des années 1970, la fumée de silice était généralement rejetée dans l'atmosphère. Dans un souci de protection de l'environnement, des procédés de valorisation ont ensuite été développés afin d'éviter ces rejets. Le produit a dans un premier temps été stocké en décharge, puis à partir des années 1980, suite à d'importants travaux de R&D, son utilisation dans les bétons a été reconnue. Ce qui était un déchet est alors devenu une addition incontournable pour les producteurs de béton. Aujourd'hui, ce sont des centaines de milliers de tonnes dans le monde qui sont ainsi valorisées. [17]

III.2.1.2. Les caractéristiques physique et chimique de fumées de silice

La fumée de silice est une poudre dont les grains sont des sphères quasi-parfaites, de taille accusant une grande dispersion. Certains de ces grains forment des agrégats, ce qui a pu amener des auteurs à distinguer des particules primaires de particules secondaire.

Il faut rappeler aussi que les propriétés physico-chimiques du fumé de silice sont assez dispersées d'une usine à l'autre (Tableau III.1)

Tableau (III-1): Composition chimique des fumées de silice (%) [19]

Composés	Silicium (grise)	Ferro Silicium (grise)	Blanche
% SiO ₂	93.7	87.3	90.0
% Al ₂ O ₃	0.6	1.0	1.0
% CaO	0.2	0.4	0.1
% Fe ₂ O ₃	0.34	4.4	2.9
% MgO	0.2	0.3	0.2
% Na ₂ O	0.2	0.2	0.9
% K ₂ O	0.5	0.6	1.3
Perte au feu	2.9	0.6	1.2

Un matériau aussi fin que la fumée de silice a une très faible masse volumique : 200 à 300 kg/m³. La manutention de cette poudre légère est difficile et coûteuse. Pour cette raison, la fumée de silice est disponible sous forme de microboulettes, c'est-à-dire des agglomérations de particules individuelles produites par aération, dont la masse volumique est de 500 à 700 kg/m³. La fumée de silice est aussi présentée sous forme de boue constituée à masse égale d'eau et de fumée de silice. La masse volumique de cette suspension est d'environ 1300 à 1400 kg/m³.

Bien que la fumée de silice soit couramment incorporée dans le malaxeur, dans certains pays on fabrique de ciment contenant de 6,5 à 8 %, en masse, de fumée de silice. Ce type de ciment pré-mélange simplifie l'opération de malaxage, mais, de toute évidence, en cas de besoin spécifique, la teneur en fumée de silice dans le mélange total des matériaux hydraulique ne peut pas varier.

III.2.1.3. Les caractéristiques techniques

III.2.1.3.1. Granulométrie :

Au microscope électronique, la fumée de silice apparaît sous forme de billes sphériques d'un diamètre moyen de 0,2 µm.

Ces billes ont un diamètre moyen 100 fois plus petit que les grains de ciment.

III.2.1.3.2.Surface spécifique :

- ❖ Très élevée :15 à 30 m²/g suivant les fumées de silice .
- ❖ Ciment : 0.25 à 0.50 m²/g.

III.2.1.3.3.Densité :

- ❖ Densité apparente sans traitement : 0.10 à 0.20
- ❖ Densité apparente après densification : 0.40 à 0.70
- ❖ Densité réelle : 2.30

III.2.1.4.Une poudre ultrafine non cristalline

La fumée de silice se présente sous la forme de particules individuelles, avec un diamètre compris entre 50 et 200 nanomètres. Ces sphères contiennent majoritairement du SiO₂, avec des quantités variables en oxydes de Ca, Al, Na, K comme impuretés principales. La fumée de silice est un produit amorphe et non cristallin.

III.2.1.5.Les différents aspects d'une fumée de silice

La fumée de silice non densifiée (ND) a une densité apparente faible, ce qui rend sa manipulation difficile. Par un traitement de densification, il est possible d'augmenter sa densité apparente et ainsi faciliter son transport, son stockage et sa manipulation.

La densité apparente dépend du mode de densification qui peut être mécanique (DM) ou pneumatique (DP). Elle est généralement comprise entre 400 et 650 kg/m³. En augmentant la densité du produit, on améliore la coulabilité et la manipulation du produit, mais on diminue sa capacité à se disperser dans l'eau. L'utilisateur doit donc trouver un compromis entre la manipulation et la dispersion potentielle du produit.

La densification ne change pas les propriétés physico-chimiques du produit. La fumée de silice est aussi disponible sous une forme prête à l'emploi : le slurry, suspension aqueuse avec environ 50 % en masse de fumée de silice.

Le slurry est un produit stable dans le temps, avec une basse viscosité et donc facile à pomper et à utiliser. Son procédé de fabrication conduit à un produit très finement dispersé dans l'eau et donc dans le béton lors du malaxage.

III.2.1.6. Contrôle de qualité

La fumée de silice issue de la fabrication du silicium et du ferrosilicium est aujourd'hui largement utilisée et de qualité régulière et maîtrisée.

Il existe plusieurs normes produit disponibles pour la fumée de silice. La norme en vigueur est la norme européenne EN 13263. Cette norme est composée de deux parties

❖ EN 13263-1 : cette partie présente les caractéristiques physico-chimiques et les critères de conformité requis par la fumée de silice pour pouvoir être utilisée en tant que produit d'addition du béton de type II conforme à la norme EN 206, des mortiers, des coulis ou d'autres mélanges ; La norme NF EN 13263-1 fait la distinction entre deux classes de produits suivant leur teneur en SiO₂ : classe 1 pour la fumée de silice contenant plus de 85 % en SiO₂, et classe 2 pour la fumée de silice contenant entre 80 et 85 % en SiO₂

❖ EN 13263-2 : cette partie décrit le système d'évaluation de la conformité de la fumée de silice et notamment la certification de conformité par un organisme de certification.

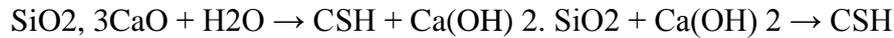
III.2.1.7. Mode d'action de la fumée de silice

La fumée de silice est utilisée dans les bétons pour améliorer leurs propriétés mécaniques et leur durabilité.

III.2.1.8. Réaction pouzzolanique

La fumée de silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (gel C-S-H). Cette phase C-S-H lie les différents composants entre eux pour créer une matrice cimentaire dense et compacte.

Sa finesse et ses propriétés pouzzolaniques confèrent à la fumée de silice une forte réactivité avec les $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produits durant l'hydratation du béton :



Sa haute réactivité augmente l'homogénéité du mélange et réduit la porosité et la perméabilité du béton.

III.2.1.9.Effet d'optimisation de l'empilement granulaire

La fumée de silice est 100 à 150 fois plus fine qu'une particule de ciment et peut remplir les vides interstitiels entre les fines et les grains de ciment. Cet empilement granulaire optimal contribue ainsi à réduire fortement la porosité et la perméabilité du béton.

III.2.1.10.La fumée de silice dans la norme béton NF en 206/CN

L'aptitude générale à l'emploi comme addition de type II pour des bétons utilisés en France est établie dans la norme béton NF EN 206/CN, pour la fumée de silice conforme à la norme NF P 18-502-1 puis à la norme NF EN 13263-1 qui l'a remplacée.

L'utilisation en substitution partielle du ciment est traduite par la notion de liant équivalent. Ce concept autorise la prise en compte des additions de type II :

- ✓ en remplaçant le terme « rapport eau/ciment » par celui de « rapport eau/ (ciment + k x addition) » ;
- ✓ en respectant l'exigence relative au dosage minimal en ciment fonction de la classe d'exposition.

La valeur de k dépend du type d'addition selon ses propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques. Dans le cas de la fumée de silice, k peut atteindre la valeur la plus élevée attribuée à ces additions. [17]

III.2.1.11. Comment utiliser la fumée de silice

Pour les usines de préfabrication et les centrales de Béton Prêt à l'Emploi, la fumée de silice est approvisionnée en vrac ou en big-bags, stockée en silo à pulvérulent et introduite dans le malaxeur par l'intermédiaire de la bascule à ciment ; quelques adaptations du matériel sont toutefois recommandées pour sa bonne utilisation.

Les adjuvants sont introduits de façon classique lors de la confection du béton.

Pour des petits volumes et/ou des emplois ponctuels, la fumée de silice est également conditionnée en sacs (25 ou 30 kg principalement). Ceux-ci doivent être introduits dans le malaxeur et homogénéisés avec les autres constituants non hydratés. L'eau et les adjuvants sont incorporés ensuite.

Des additifs prêts à l'emploi à base de fumée de silice sont également disponibles en sacs ; leur composition est adaptée aux utilisations en milieux agressifs. Ces produits sont particulièrement appropriés pour des utilisations dans des « petites » centrales de Béton Prêt à l'Emploi.

La fumée de silice est un coproduit de la fabrication du silicium et des alliages de ferrosilicium. Elle est donc considérée comme issue des stocks et n'apporte pas de contribution propre aux flux d'inventaire. Seuls les impacts de sa transformation, son stockage et son transport sont pris en compte. [17]

III.2.1.12. Avantages de la fumée de silice**III.2.1.12.1. Performance a l'état frai****III.2.1.12.1.1. Maniabilité**

Les bétons formulés avec la fumée de silice ont une rhéologie différente des bétons courants. Ils sont thixotropes et ont donc un comportement visqueux et compact au repos et deviennent fluides dès qu'on leur applique une pression. Cette particularité offre en particulier les avantages suivants :

- ✓ moins de ségrégation (nids de cailloux et ressuage) ;
- ✓ transfert par pompage sous pression possible sur de grandes distances ;
- ✓ projection sur des parois sans perte de produit dans le cas de béton projeté.

III.2.1.12 .2.Performances a l'état durci

III.2.1.12.2.1.Performances mécaniques

La fumée de silice permet d'optimiser l'empilement granulaire et ainsi d'améliorer l'adhésion des différents constituants d'un béton, ce qui a un impact direct sur ses propriétés mécaniques, en particulier sur les résistances mécaniques en compression. Ces dernières sont directement liées à la quantité de fumée de silice ajoutée au ciment.

L'utilisation de fumée de silice pour un béton de même qualité permet d'augmenter la proportion de granulats grossiers par rapport aux granulats fins.

III.2.1.13.Durabilité

L'utilisation de fumée de silice limite la porosité des bétons en réduisant la taille des pores. Cette baisse de la porosité et de la perméabilité empêche la pénétration d'agents agressifs comme notamment les acides, les sulfates, le dioxyde de carbone et les chlorures marins.

L'utilisation de la fumée de silice est un atout pour prévenir la corrosion dans un environnement contraignant : ports, aéroports, plateformes industrielles, ouvrages en bord de mer.

III.2.1.14.Alcali-réaction

La fumée de silice a un effet favorable vis-à-vis du phénomène d'alcali-réaction. Les particules fines et amorphes de la fumée de silice réagissent avec les alcalins du ciment et réduisent ainsi leur teneur dans le béton avant son durcissement.

III.2.1.15. Réaction sulfatique interne

La réaction sulfatique interne (RSI) est une cause de désordres susceptibles d'endommager assez sévèrement les ouvrages en béton. L'influence de la fumée de silice à des teneurs optimisées de 10 % en taux de substitution est très significative en prévention de cette pathologie.

III.2.1.16. Résistance au cycle gel/dégel

En diminuant la perméabilité du béton, la fumée de silice réduit les mouvements d'eau et les pressions internes dans le béton qui sont source de pathologies. Un béton contenant de la fumée de silice supporte un plus grand nombre de cycles gel/dégel.

III.2.1.17. Optimisation de l'enrobage des armatures

L'enrobage des armatures et les caractéristiques du béton d'enrobage sont les paramètres fondamentaux permettant de maîtriser la pérennité des ouvrages aux phénomènes de corrosion et donc leur durée d'utilisation. Ainsi il est possible de placer les armatures hors d'atteinte des agents agressifs en les protégeant par une épaisseur suffisante d'un béton compact, ayant fait l'objet d'une cure adaptée.

Les recommandations de l'Eurocode 2 (norme NF EN 1992-1-1-section 4) en matière d'enrobage des bétons de structures sont novatrices. Elles résultent d'un retour d'expérience sur la durabilité des ouvrages construits depuis plusieurs décennies et sur les recherches récentes en matière de protection des armatures vis-à-vis des risques de corrosion. Elles visent, en conformité avec la norme NF EN 206-1, à optimiser la durabilité des ouvrages. [17]

La détermination de la valeur de l'enrobage doit prendre en compte de façon extrêmement détaillée :

- ❖ les classes d'exposition dans lesquelles se trouve l'ouvrage (ou la partie d'ouvrage) et qui traduisent les conditions environnementales ;
- ❖ la durée d'utilisation du projet traduite par la classe structurale de l'ouvrage (S1 à S6) ;

- ❖ la classe de résistance du béton ;
- ❖ les dimensions des armatures ;
- ❖ le type de système de contrôle qualité mis en œuvre pour assurer la régularité des performances du béton ;
- ❖ la maîtrise du positionnement des armatures ;
- ❖ la régularité de la surface contre laquelle le béton est coulé ;
- ❖ le type d'armatures (précontraintes ou non) et leur nature (acier au carbone, acier inoxydable).

La valeur de l'enrobage peut ainsi être optimisée en particulier si : l'on choisit un béton présentant une classe de résistance à la compression supérieure à la classe de référence (définie pour chaque classe d'exposition). Elle peut être réduite de quelques centimètres.

L'utilisation de fumée de silice dans le béton augmente sa résistance mécanique, ce qui permet de réduire la valeur de l'enrobage des armatures et d'optimiser les épaisseurs des structures. Il en résulte une économie de ressources naturelles (en particulier en granulats) et de ciment.

III.2.2.La pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes. Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments

III.2.2.1.Pouzzolane naturelle

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques.

Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.

III.2.2.2. Pouzzolane artificielle

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite et moler.

Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories :

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

III.2.2.3. Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes :

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (Entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux. Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées. (Cas des squelettes siliceux de micro-organismes).

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux. Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactives. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux. L'activité pouzzolanique s'explique par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux (portlandite). Des tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation ne suffisent pas pour déterminer la réactivité pouzzolanique. D'autre part, la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure. Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés : -Ajouts de produits chimiques. - Broyage à une finesse plus élevée. -Traitement thermique. En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes

III.2.2.3.1. Propriétés hydrauliques

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

III.2.2.3.1. Propriétés physiques de remplissage

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

III.2.3. 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 et les mêmes que ceux du clinker.

D'un point de vue chimique (tableau III.2), 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 soulever ces deux li qui de séparément. [19]

Tableau (III-2) : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau. [19]

OXYDES	Laitier français	Laitier nord USA	Laitier algérien
% SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
% Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
% CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
% Fe ₂ O ₃	4	0.3 à 20	2.0
% MgO	6	3 à 12	4.7

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été broyé 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) [19].

III.2.4. Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques.

Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles – ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique.

Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables.

Cependant, comme on peut le voir dans le tableau (III.3). La composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier beaucoup. Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires [19].

Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

- ✓ Les cendres silico-alumineuses (cendre de houille)
- ✓ Les cendres sulfo calciques (cendre de lignite)
- ✓ Des cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines.

Tableau (III-3) Composition chimique type de certaines cendres volantes d'après Aitcin. [19]

Composés	Classe F	Classe F	Classe C	Sulfo – calcique	Sulfo– calcique
SiO ₂	59.4	47.4	36.2	24.0	13.5
Al ₂ O ₃	22.4	21.3	17.4	18.5	5.5
Fe ₂ O ₃	8.9	6.2	6.4	17.0	3.5
CaO	2.6	16.6	26.5	24.0	56
4.7	1.3	4.7	6.6	1.0	1.8
Na ₂ O	2.2	0.4	2.2	0.8
SO ₃	2.4	1.5	2.8	8.0	15.1
Perte au feu	2.0	1.2	0.6
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	90.7	74.9	60	59.5	22.5
Chaux libre	28.0

La plupart des particules ont un diamètre compris entre 1µm et 100µm, leur surface spécifique Blaine se situe généralement entre 250 et 600 m²/kg. La grande surface spécifique des cendres volantes signifie que le matériau réagit facilement avec l'hydroxyde de calcium.

D'une façon générale, l'introduction des cendres volantes dans le béton diminue la porosité et la perméabilité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives, en fixant progressivement la chaux.

La cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable. Il est reconnu que l'emploi des ciments aux cendres volantes entraîne une diminution du retrait hydraulique et thermique du béton. En plus des propriétés décrites, lorsque 'elles sont utilisées comme une fraction liante, les cendres.

Volantes jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces [19].

III.2.5.Fillers calcaires :

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

- ✓ leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qui 'ils contiennent.

- ✓ leur finesse, la forme des grains.

- ✓ leur dureté, leur porosité. Un filler est dit calcaires 'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'Origine .Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA Peuvent jouer plusieurs rôles:

- ✓ Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).

- ✓ Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.

- ✓ Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C3S et du C3A et à la formation de carbo aluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.

- ✓ Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat [18].

III.3.L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil :**III.3.1.Intérêt du point de vue économique :**

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique. La consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts. En effet, le clinker étant obtenu par transformation de la crue (argile + calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction de cet ajout.

La réaction pouzzolanique étant à base de produits de faible coût et la durabilité est garantie puisque les romains utilisent déjà ce mécanisme chimique dans leur ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve depuis de nombreux siècles.

Des sous-produits industriels tels que les cendres volantes et fumées de silice condensées sont de plus en plus utilisées dans les pays industrialisés parce qu'ils sont des déchets d'usine. Contrairement aux pouzzolanes naturelles, il n'est pas nécessaire de les pulvériser ou de les soumettre à un traitement thermique avant de s'en servir.

Plusieurs pays comme la Chine, la Grèce, l'Italie, l'Inde et le Mexique, utilisent encore des millions de tonnes de pouzzolanes naturelles pour fabriquer des ciments Portland composés. Pour des raisons d'épargne d'énergie, il y a tout lieu de croire que l'utilisation de ces matériaux se poursuivra et se développera de plus en plus [11].

III.3.2.Intérêt du point de vue technique

L'intérêt technique des ajouts réside en premier lieu dans le fait qu'ils permettent l'obtention d'un ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles d'un CPA (ciment-Portland) de même classe de résistance. Parfois, la chute de résistance à court terme limite leur utilisation en préfabrication. En second lieu, les ciments composés (CPA + ajouts) présentent souvent l'avantage sur le CPA, d'une meilleure résistance aux agressions chimiques.

Le remplissage des vides est lui-même aussi responsable de la durabilité du mortier ou béton obtenu. En effet, les actions chimiques sont réduites quand la portlandite est moins abondante, soit qu'elle est diluée (ciment au laitier), soit qu'elle est consommée (ciment au cendre ou à la pouzzolane naturelle). La réduction de la teneur en clinker

s'accompagne par ailleurs d'une réduction proportionnelle du taux de C3A du mélange et par conséquent du risque de dégradation sulfatique

Les ciments composés seront toujours recommandés chaque fois que les bétons seront exposés aux agents agressifs (ouvrages à la mer ou bien exposés aux produits chimiques).

Certains avantages techniques que présente l'utilisation des pouzzolanes dans le béton ne peuvent pas être atteints lorsqu'un CPA est utilisé seul. Parmi ces avantages, mentionnons une plus grande ouvrabilité, une maniabilité accrue, une meilleure étanchéité à l'eau (l'ajout rend le béton plus compact), une réduction de la chaleur d'hydratation et des risques de fissuration sous l'effet de l'action thermique et une plus grande durabilité au milieu sulfaté ou acide [18].

III.4.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 Béni – Saf. Le (tableau III.4) donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes.

Tableau (III-4) Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes. [18]

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
	Ain Touta	Laitier + calcaire
	Ain El Kebira	Laitier + pouzzolane
	Hamma Bouziane	Laitier + calcaire
	H'djarEssaoud	Laitier
	Tebessa	Laitier
	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raiss Hamidou	Poussière
	Sour EL Ghozlane	Calcaire/Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
	Béni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	

III.5.Conclusion

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables.

En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments.