

Chapitre II : Revue générale sur Les ajouts

II.1 Introduction :

Les ajouts minéraux sont largement utilisés pour la production du ciment et les bétons, ils sont classés en actifs et inertes.

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine. La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin gouvernent leurs propriétés cimentaires dans le béton. Leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux.

L'utilisation des ajouts cimentaires traditionnels dans le béton est devenue de plus en plus une approche économique et environnementale incontournable dans le domaine de la construction. Par leur substitution au ciment Portland, ils peuvent améliorer les propriétés à l'état frais et durci du béton ainsi que la durée de vie des ouvrages. La disponibilité, le coût et le transport de certains ajouts cimentaires ont un impact écologique et économique. Pour éviter toute augmentation de gaz à effet de serre lié au transport, l'utilisation de certains matériaux cimentaires alternatifs locaux peut être une avenue intéressante à considérer que l'on incorpore le plus souvent au ciment Portland et donnent ses propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques.

Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la composition du béton. Des ajouts, tels que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau (LGHF), les fumées de silice et les fillers etc... entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques. On obtient ainsi un liant de composition binaire voire tertiaire. [5]

II.2 Rôle des ajouts cimentaires :

II.2.1 Rôle de la granulométrie de l'ajout :

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau. [6]

II.2.2 Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaire :

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux à la suite de la réaction de l'hydratation du C3S et C2S (30% de la masse du ciment). Cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable de problème de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau ; ce lessivage augmente alors la porosité dans le béton qui augmente la perméabilité et le lessivage. Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-S-H, Véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique. [6]

II.3 Classification des ajouts minéraux :

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous formes de fillers. [8]

Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre dans le tableau :

Tableau II. 1 : Classification des ajouts minéraux. [7]

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, terres a diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

II.4.Principaux ajouts minéraux inertes :

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment Portland : ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau. Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et les Schistes calcinés. [8]

II.4.1 Fillers calcaires :

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles (calcaires, basalte, bentonite, etc.) présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75%. Ces produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométries contrôlées et dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 micron.

Les fillers se différencient les uns des autres par :

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

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine. [8]

II.4.2 La poussière :

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm^2/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. [9]

II.5 Les ajouts minéraux actifs :

II.5.1 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 [10]. Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

II.5.1.1 Pouzzolane naturelle :

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



Figure II. 1 : Pouzzolane naturelle.

II.5.1 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.

II.5.2 La fumée de silice :

La fumée de silice est un sous-produit de la production de silicium ou de Ferro silicium. Elle est le résultat de la réduction du carbone et du quartz de très grande pureté dans un four à arc électrique. Les grains s'élèvent sous forme de vapeur oxydée émise par les fournaies chauffées à 2000 °C. Elle sera captée une fois refroidie dans d'énormes poches de tissu, sa densité est autour de 2,2 à 2,5 et sa surface spécifique peut varier de 10 à 25 000 m²/kg (6 à 10 fois plus grande que celle du ciment). Dans notre cas la densité de la fumée de silice utilisée est de 2,22.

Les particules de la silice sont sphériques dont le diamètre est inférieur à 0,1 µm, c'est-à-dire 100 fois plus faibles que les particules de ciment. Le diffractogramme de rayon X montre un halo de diffraction situé au niveau de la raie principale de la cristobalite. [11]

Tableau II. 2 : Composition chimique de fumée de silice.

Ajout	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	cl	P.A.F	Σ
Fumée de silice	88,72	0,78	2,54	/	3.70	1,06	2,817	0,141	/	99,75

II.5.3 Le laitier de haut fourneau :

Au moment de la production de la fonte, le surnageant qui est développé dans des conditions de température d'environ 1500 °C, est refroidi dans l'eau pour former un matériau granuleux ressemblant à un sable vitreux appelé laitier.

Le matériau est ensuite broyé finement et incorporé dans le béton comme substituant partiel de ciment. La taille des particules et la finesse dépendront de sa dureté et du temps de broyage.

Le laitier utilisé dans nos mélanges a une finesse Blaine de 420 m²/kg, et une densité de 2,85. [5]

Tableau II. 3 : Composition chimique de laitier.

Ajout	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	P.A.FF	Σ
Laitier	29,43	10,16	0,36	31,87	3,70	2,40	0,485	0,016	21,57	99,99

II.5.4 Metakaolin :

Le Metakaolin (MK) est l'un des matériaux cimentaires développés récemment pour le béton performant. Il est produit en calcinant l'argile épuré de kaolinite dans une température variant de (650 à 800 °C) pour chasser l'eau chimiquement liée dans les interstices du kaolin et détruire la structure cristalline, qui convertit effectivement le matériau en phase de MK, un aluminosilicate amorphe. La dimension particulaire du MK est généralement moins de 2µm, qui est sensiblement plus petit que des particules de ciment. Il est typiquement incorporé dans le béton pour remplacer 5 à 20 % de ciment. L'oxyde d'aluminium et le dioxyde de silicone sont les deux composants principaux du MK. [12]

II.6. L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil :

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

II.6.1 Intérêt du point de vue technique :

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration. [8]

II.6.2 Intérêt du point de vue économique :

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puis qu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, si non aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland. [8]

II.6.3. Intérêt du point de vue environnemental :

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO₂. Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO₂. [8]

II.7 Effets des ajouts sur les propriétés des mortiers :**II.7.1 Amélioration de l'ouvrabilité :**

Si nous ajoutons une quantité d'une fine poudre à un mortier, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des cendres volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un mortier pour obtenir une certaine consistance.

Pour cette même consistance l'utilisation des poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire. La demande en eau et la maniabilité d'un mortier contenant des ajouts minéraux dépend de leur forme et de la granulométrie des particules. La norme ASTM C 618 limite la quantité des particules > 45 µm à un maximum de 34 % [13].

II.7.2 Durabilité :

Par rapport au ciment Portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité pour un même rapport E/L.

Les conditions pour que cette réaction se passe sont. La perméabilité du mortier, la quantité de CH (Ca(OH)₂) et la quantité d'aluminate dans le mélange à cause de leur bonne imperméabilité et surtout d'une faible quantité de CH, des mortiers faits à partir de ciment au laitier résistent très bien à l'attaque des sulfates, malgré une quantité

importante de C3A dans le ciment. Les ajouts pouzzolaniques tels que le laitier, diminuent l'expansion des mortiers qui se produit par réactions entre les alcalis du

ciment et les granulats réactifs. Les alcalis sont piégés dans le C-S-H formé par l'ajout [8].

II.7.3 Développement des résistances :

Bien que le développement des résistances soit lent, les résistances à long terme dépassent quelques fois celles du ciment Portland sans ajouts, à condition d'optimiser la quantité d'ajout. Cette Augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de C-S-H. [8]

II.7.4 Développement des mortiers à haute résistance :

L'utilisation des ajouts, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la durabilité des mortiers, en remplacement d'une partie du ciment, tend à diminuer les résistances initiales et à augmenter les résistances finales. Les pouzzolanes très réactives, comme les fumées de silice, sont capables de donner des mortiers à haute résistance, tant à jeune âge. Tous les ajouts utilisés qu'à long terme, surtout si la quantité d'eau est diminuée par l'addition d'un agent réducteur en remplacement partiel des granulats fins augmentent les résistances à tous les âges. Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment, tandis que celles à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et le remplacement du CH par du C-S-H. [14]

II.8 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. Le tableau (II.) (Donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes). [14]

Tableau II. 4 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes. [14]

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 Ghoulane	Calcaire/Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	
ACC	M'sila	calcaire
	sig	Pouzzolane Naturelle

II.8 conclusion :

Le présent chapitre II présente une revue générale sur les ajouts minéraux, principalement, les additions inertes (fillers de calcaire, la poussière) et les additions actives (pouzzolane, fumée de silice et laitier).

Leur classification, effet et caractéristique étant montrées un aperçu a été donné sur l'usage de ces ajouts dans les ciments et mortiers en Algérie.

