

Les Ajouts Minéraux

Ce chapitre est composé de deux parties

La première partie est : généralité sur les ajouts minéraux.

La deuxième partie est : Effet de filler de calcaire sur béton autoplaçant.

A. Généralité sur les ajouts minéraux

II.1 Définition

La section suivante traitera de l'incorporation de certains ajouts minéraux et chimiques dans les bétons. On fera le point sur les mécanismes d'action de ces sous-produits ainsi que sur leurs effets sur les caractéristiques rhéologiques, mécaniques et physiques des bétons. [11].

De nos jours, l'utilisation des sous-produits minéraux est en train de devenir un devoir national et un impératif économique dans certains pays. L'industrie du ciment et du béton s'est intéressée à cette nouvelle orientation en utilisant certains de ces produits au cours du processus de fabrication du ciment ou du béton [11]. Toutefois, cette utilisation est régie par certaines caractéristiques recommandées afin de ne pas nuire aux résistances et à la durabilité des bétons.

II.2 Origine et classification

Il existe deux types d'ajouts selon leurs origines :

- Ajouts minéraux inertes
- Ajouts minéraux actifs (naturels ou artificiels)

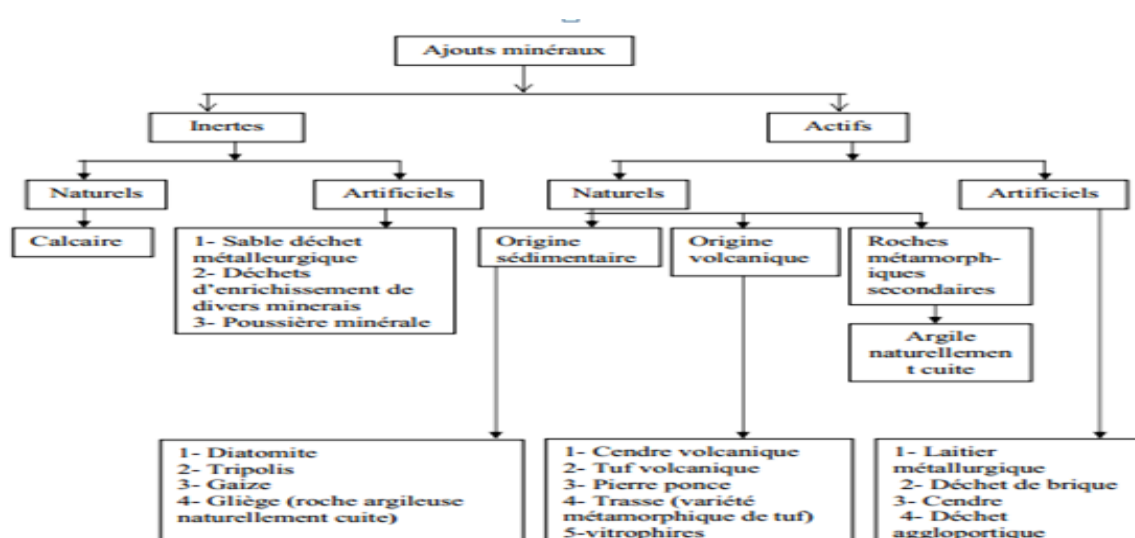


Figure II.1 : Classification de l'ajout minéral [12].

II.2.1 Les ajouts inertes

Les ajouts inertes sont des éléments naturels ou artificiels chimiquement inertes qui ne jouent aucun rôle dans le processus de fabrication, d'hydratation, ou de durcissement du ciment portland mais peuvent modifier les propriétés finales du produit, ils sont généralement utilisés au niveau du broyage du clinker.

Les roches carbonatées telle que le calcaire, craie, dolomie, sont largement utilisées comme ajouts naturels inertes au ciment.

La priorité est accordée aux roches les plus dures pour éviter un éventuel colmatage de la matière lors du broyage.

Les ajouts inertes sont moins connus dans la pratique de l'industrie cimentière, ils sont habituellement utilisés lorsque la cimenterie ne dispose pas de source d'ajouts minéraux actifs.

II.2.2 Les ajouts minéraux actifs

Il existe deux types d'ajouts minéraux actifs

II.2.2.1 Ajouts minéraux actifs naturels

Les ajouts minéraux actifs d'origine sédimentaire sont les dolomites, les tripolis et les gaizes, ils se rapprochent par leurs compositions chimiques.

Les ajouts minéraux actifs d'origines volcaniques sont représentés par les pouzzolanes, les cendres, le tuf et la pierre ponce

II.2.2.2 Ajouts minéraux actifs artificiels

Parmi les ajouts actifs artificiels on peut citer :

- Les déchets siliciques actifs.
- Les argiles cuites (déchets de briques et de tuiles).
- Les cendres des combustibles.
- Les laitiers métallurgiques.
- Les déchets siliciques actifs obtenus à la suite de l'extraction de l'alumine à partir de l'argile renferment souvent l'anhydrite sulfurique a quantité élevée.

- Les argiles cuites se pressentent sous forme de poudre fine obtenue à la suite de broyage de l'argile à teneur élevée en KAOLINITE (Al_2O_3 , $2SiO_2$, $2H_2O$) spécialement cuite à une température de 600 à 800°C.

-Les laitiers métallurgiques sont également utilisés dans la production du ciment autant qu'ajouts minéraux actifs.

L'activité des laitiers est déterminée à partir de sa composition minéralogique et du rapport des phases cristallines et vitreuses qui dépendent des conditions de refroidissements.

- L'utilisation des ajouts minéraux actifs dans l'industrie du ciment est préférée grâce à leurs avantages par rapport aux ajouts inertes.

II.3 Rôle des ajouts minéraux actifs

Le rôle des ajouts minéraux actifs consiste à fixer la portlandite $Ca(OH)_2$ du ciment qui se dégage lors de l'hydratation de C_3S pour former des compositions difficilement solubles (stables) qui contribuent à la résistance du ciment.

Les ajouts minéraux actifs améliorent la compacité du mortier et du béton, cette compacité donne une meilleure protection du ciment à l'agressivité des eaux douces et des sels.

II.4 Différents types d'additions minérales

Une addition minérale est une poudre d'une finesse supérieure à celle du ciment. Elle peut être ajoutée et/ou substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajoutée directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Elle permet ainsi d'améliorer certaines propriétés ou conférer aux matériaux des propriétés particulières. On distingue deux types d'additions : les additions inertes et les additions réactives. Les données bibliographiques (AFGC), recommandent l'emploi de quantités importantes de fines dans un BAP pour assurer sa stabilité à l'état frais et éliminer les risques de ségrégation. Quand ce Volume est occupé intégralement par du ciment Portland, il fournit au matériau durci, un niveau de performance excessif par rapport aux spécifications demandées. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que le dégagement de chaleur engendré par les réactions exothermiques produites lors de l'hydratation du ciment peuvent provoquer des fissurations de l'élément et il est donc naturel de remplacer une partie de ce volume par des additions minérales, qui sont moins réactives que le clinker et d'un coût inférieur sur le plan énergétique et environnemental. On passera en revue dans cette partie, les additions minérales qui seront utilisées lors de l'étude expérimentale.

II.4.1 Fillers (calcaire et siliceux)

Ce sont des poudres de roche (calcaire ou siliceuse) obtenues par broyage et/ou sélection, dont les caractéristiques sont définies par la norme [NF EN P 18-508] respectivement pour les fillers calcaires et siliceux. La demande en eau de fines. Siliceuse telles que le quartz est supérieure à celle des fillers calcaires d'usage plus courant dans les bétons. Ceci est dû à la forme anguleuse des particules de quartz. En plus de leur effet physique, des études sur les fillers calcaires ont montré qu'ils présentent une certaine activité physico-chimique, qui favorise l'accélération de l'hydratation du clinker par la création de sites de nucléation (germination) hétérogène, notamment, lorsque l'addition est finement broyée. Néanmoins, l'effet n'est remarquable que seulement au jeune âge. D'après les mêmes études, le calcaire réagit avec les aluminates du ciment pour former des carboaluminates de calcium hydratés, qui sont favorables à la durabilité du matériau.

À long terme, les fillers siliceux peuvent contribuer faiblement à une réaction pouzzolanique L'un point de vue industriel, les fillers calcaires présentent de bonnes caractéristiques de régularité à la production. D'autre part, leur couleur généralement claire les rend favorables à l'obtention de parements architectoniques.

II.4.2 Laitier granulé de hauts fourneaux

Les minerais de fer sont utilisés pour la fabrication de la fonte ; en plus de leurs phases ferreuses, ces minerais contiennent aussi des minéraux proches de ceux du cru du clinker. Lors du processus de fusion du minerai dans les hauts fourneaux à une température allant de 1135 à 1350°C, se produit la séparation gravitaire, la fonte se dépose dans la partie inférieure du four, tandis que le laitier surnage en partie supérieure dû à sa faible densité par rapport à la fonte. À la sortie du four, le laitier à une température avoisinant celle de la fusion, est refroidi brusquement à l'eau (trempe) et le laitier prend l'appellation de laitier granulé défini par la norme [NF EN15167-1] La vitrification du laitier granulé par la trempe confère au matériau son pouvoir hydraulique latent. Un broyage fin du laitier lui permet d'être utilisé comme addition dans les ciments et les bétons.

Considéré au début comme un déchet de la sidérurgie, ensuite comme coproduit, l'utilisation du laitier granulé reste cependant limitée en Algérie au domaine de la cimenterie en raison de son faible pouvoir hydraulique. Le laitier granulé procure au matériau des performances mécaniques et une durabilité accrue c'est pourquoi les ciments au laitier sont particulièrement indiqués pour les bétons soumis à des ambiances agressives

II.4.3 Poudre de verre à bouteilles

Les verres de silicates auxquels se rapportent les verres utilisés dans cette étude sont composés d'oxydes formateurs, fondants, stabilisants et colorants.

L'ingrédient de base est la silice (SiO_2) qui représente environ 68 à 74% de la masse et constitue l'élément formateur. Les fondants et les stabilisants sont constitués par (K_2O , Na_2O , CaO , MgO). La couleur du verre est obtenue en additionnant aux crues, certains oxydes métalliques. Ainsi, le (Fe_2O_3) donne la couleur brune, le (Cr_2O_3) la couleur verte, le CuO la couleur bleue, le MnO_2 la couleur rose, et le AgO la couleur jaune. Leur emploi dans le verre permet de diminuer la température de fusion et d'augmenter la durée de travail du verre lors du façonnage. Les proportions entre ces trois constituants vont dépendre en grande partie les caractéristiques d'un verre. On obtient par fusion entre 1400°C et 1500°C une masse visqueuse, amorphe, homogène et transparente, le verre.

Du fait de sa nature vitreuse et du contenu de certaines quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement [1]. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland dans les bétons. Différentes études ont pu montrer que la couleur du verre, autrement dit sa composition chimique, joue un rôle conséquent sur les propriétés mécaniques de ce dernier affirment que le verre à base d'oxyde de fer (Fe_2O_3), est le verre qui possède la plus faible activité pouzzolanique, derrière le verre à base d'oxyde de chrome (Cr_2O_3) puis le verre à base d'oxyde de plomb (Pb). [12]

II.4.4 Fumée de silice

Il s'agit d'un sous-produit de la fabrication du silicium métal et de ses alliages, en particulier du Ferro-silicium, la fumée de silice obéit à la norme [NF EN 13263-1] Elle se caractérise par un diamètre des particules sphériques ultra fines (entre 0,01 et quelques micromètres) et par une teneur en silice amorphe de plus de 90%. L'emploi de la fumée de silice doit se faire conjointement avec un fluidifiant du type superplastifiant afin de remédier à l'agglomération causée par sa finesse. Une bonne dispersion, permet aux particules de la fumée de silice de se placer entre les interstices des grains de ciment, diminuant ainsi la quantité d'eau nécessaire au mélange. L'utilisation de la fumée de silice conduit à des bétons extrêmement compacts à caractéristiques mécaniques élevées et une résistance nettement renforcée vis-à-vis des milieux agressifs.

Cependant, le niveau de performances atteint par l'ajout de fumée de silice et leur prix excessif (entre 5 à 10 fois plus onéreux que le ciment), ainsi que l'utilisation conjointe des

superplastifiants, réserve ce produit de luxe à des utilisations bien particulières, telles que les ouvrages d'art, les grattes ciel, les plates-formes pétrolières, etc.

II.5 Utilisation des additions minérales en Algérie

Bien que l'emploi des additions minérales se soit généralisé dans le monde, il reste très limité en Algérie. Vu la disponibilité en grande quantité de ces ajouts tels que le laitier granulé, le calcaire ou la pouzzolane naturelle et leurs coûts relativement réduits par rapport au ciment, leurs emplois dans le domaine du génie civil n'est pas encore répandu. En effet, de nombreuses études ont été réalisées, traitant de l'influence des additions minérales sur plusieurs aspects des bétons. Actuellement, l'emploi des additions se limite seulement au secteur de l'industrie cimentaire pour la production du ciment composé. Le tableau II.1 résume l'utilisation des différentes additions dans les cimenteries algériennes.

Dans ce qui suit est rapporté l'effet des additions sur l'écoulement et sur les propriétés rhéologiques notamment la viscosité plastique et apparente, dont les différentes définitions sont données plus loin dans le texte

Tableau II.1 : Utilisation des additions minérales dans les cimenteries algériennes [2]

Cimenterie	Ajouts utilisés
Ain touta (Batna) Ain el kebira (sétif) Hamma Bouzian (constantine) Tebessa	Pouzzolane Laitier granulé
Meftah (alger) Rais Hamidou (alger) Sour el ghoulane (Bouira)	Tuf/calcaire Calcaire/tuf
Chlef	calcaire
M'sila	Laitier granulé Pouzzolan
Beni saf(tlemcen) Zahana (oran) Saida	pouzzolane

II.6 Effets des additions minérales sur l'écoulement des matériaux cimentaires

II.6.1 Effet du filler calcaire

Largement employé dans les nouveaux bétons, tels que les BAP et à des dosages élevés, le filler calcaire se caractérise par de faibles besoins en eau par rapport au ciment. En effet,

plusieurs auteurs [12], rapportent que son utilisation influence peu la demande en eau et peut conduire à une légère diminution de viscosité du mélange cimentaire.

Plusieurs travaux [13] [14] révèlent que l'ajout du filler calcaire pour un dosage constant en ciment, diminue la viscosité d'une pâte de ciment et cela malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides. Cet ajout, entraîne une augmentation du seuil de cisaillement si la concentration volumique en solides de la suspension augmente [14]. Cependant, au-delà d'une certaine valeur critique en filler calcaire qui tient compte du rapport E/C, on assiste à une augmentation de la viscosité [13]

II.6.2 Effet du laitier granulé de hauts fourneaux

Des études antérieures [15] montrent que l'ajout du laitier granulé de hauts fourneaux en substitution du ciment, permet globalement de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité des pâtes de ciment. D'après les travaux de [16] les laitiers adsorbent le superplastifiant, ce qui se traduit par une demande en superplastifiant plus importante pour obtenir un même étalement ou valeur de seuil de cisaillement.

Le laitier granulé favorise l'écoulement des pâtes, principalement à cause de sa demande en eau qui est moins importante que celle du ciment [17] mais aussi à cause de sa morphologie [18] En effet, rapporte que l'écoulement du laitier dépend de deux composantes : une composante physico-chimique liée au potentiel d'interaction entre les particules et de l'interaction des fines avec le liquide saturant et une composante granulaire liée aux frottements des particules.

II.6.3 Effet de la poudre de verre

Très peu de données concernant l'effet du verre sur le seuil de cisaillement et la viscosité existent dans la littérature. Cependant, des essais sur coulis additionnés de poudre de verre de 10 et 20% en substitution du ciment ont été réalisés par, [11]

Les résultats montrent que le point de saturation des coulis passe de 1,1% pour les coulis témoins sans substitution à 1% pour les deux pourcentages de remplacement. L'auteur rapporte que le verre interagit avec le superplastifiant, il consomme environ 0,1% de superplastifiant en moins que le ciment et conclut que le verre a un effet fluidifiant. D'autres essais d'étalement au mini-cône ont été effectués par le même auteur sur des coulis avec 10, 20, 30 et 40% en remplacement du ciment, il conclut que de forts pourcentages de verre favorisent le maintien de la maniabilité et qu'il existe une interaction entre le verre et le superplastifiant, ce dernier étant moins actif lorsqu'il y a du verre. [11]

Chen et al (2016) rapportent que l'étalement d'un béton diminue avec l'ajout de poudre de verre pour une taille des particules qui varient entre 38 et 300 μ m, en raison de la forme angulaire des particules. Le superplastifiant devrait donc être utilisé lorsque la teneur en verre en substitution au ciment est supérieure à 30% afin d'éviter le phénomène de ségrégation [19].

II.6.4 Effet de la fumée de silice

L'influence de la fumée de silice sur le comportement rhéologique ne fait pas l'unanimité des auteurs. Des études sur le sujet [16] ont montré que la fumée de silice augmente le seuil de cisaillement et la viscosité, en augmentant la compacité des mélanges. Tandis que [21] rapporte que l'ajout de la fumée de silice ne modifie pas la viscosité. D'autres études réalisées par [11], révèlent une demande en eau et en superplastifiant plus importante, due à l'utilisation de la fumée de silice par comparaison avec un mélange de référence. Cette observation est valable aussi bien pour des pâtes de ciment que pour des bétons [16]

II.7 Effets des additions minérales sur les propriétés physico-chimiques des matériaux cimentaires

II.7.1 Effet filler ou effet de remplissage

L'incorporation d'additions au sein d'un matériau cimentaire améliore son squelette granulaire. En effet, plusieurs études [22], [23] [24] montrent l'existence d'une optimisation des propriétés du squelette granulaire par l'ajout d'additions.

Ces fines particules s'intercalent entre les interstices des grains de ciment remplissant ainsi une partie du volume des vides. Le résultat de ce remplissage se traduit par une meilleure maniabilité du mélange et un accroissement des résistances pour un même rapport E/C et des propriétés de transfert.

II.7.2 Effet chimique ou pouzzolanique

L'effet chimique 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 contribuent à la résistance mécanique au même titre que les produits hydratés du ciment, mais aussi à l'amélioration de la durabilité. Cet effet bénéfique est fonction de nombreux paramètres et tient compte de la composition chimique ou minéralogique de l'addition, de sa surface spécifique et du type de ciment.

La réaction pouzzolanique concerne principalement la fumée de silice, la poudre de verre, la cendre volante siliceuse, etc. La silice amorphe contenue dans ces matériaux réagit, en

présence d'eau, avec la portlandite formée pendant l'hydratation des C_3S et C_2S pour former des silicates de calcium hydratés C-S-H, mais d'un rapport C/S voisin de 1, donc plus riche en silice [15], suivant l'équation 1.1 :



L'activité hydraulique concerne plus particulièrement le laitier granulé, qui développe des propriétés d'hydraulicité et demande une présence d'eau. Cette réaction est très lente d'où la nécessité de le broyer finement et de l'activer par ajout d'une base forte. On obtient alors des C-S-H dont le rapport C/S est plus important que celui des C-S-H issus de la réaction pouzzolanique [26].

Il est à noter que ces réactions pouzzolanique et hydrauliques prennent toutes leurs ampleurs pour des longues échéances [27].

II.7.3 Effet physique ou de surface

L'incorporation d'addition inerte ou réactive au sein d'une matrice cimentaire contribue au développement des résistances à court terme. Il n'est plus à démontrer [24] [28] que les additions jouent le rôle de sites de nucléation préférentiels au cours des réactions d'hydratation du ciment. L'effet de surface consiste à la création des sites préférentiels d'hydratation constituée par les surfaces procurées par l'addition minérale. Par conséquent, l'épaisseur de la couche d'hydrate qui se forme autour d'un grain de ciment anhydre est réduite, facilitant ainsi l'hydratation du cœur anhydre par phénomène de diffusion.

La présence d'additions entraîne une accélération de l'hydratation du ciment qui se traduit par un développement des résistances mécaniques au jeune âge. On s'attend donc à ce qu'il y ait une amélioration des résistances mécaniques avec l'augmentation de la finesse des additions [30]. Cependant, plus que la surface spécifique, c'est vraisemblablement le nombre de particules d'addition par unité de volume de pâte qui est le paramètre essentiel de ce phénomène [31].

II.8 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil

II.8.1 Intérêt du point de vue économique

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car 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 utilisaient déjà ce

mécanisme chimique dans leurs 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.

II.8.2 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 C_3A du mélange et par conséquent du risque de dégradation sulfatique. [14]

B. La deuxième partie Effet de filler de calcaire sur béton autoplaçant

II.9 Effet de filler de calcaire sur béton autoplaçant

Introduction

L'intérêt est maintenant focalisé sur le rôle joué par l'addition minérale dans le matériau autoplaçant. La suite de l'étude bibliographique va donc s'évertuer à mettre en avant les relations existantes entre les propriétés des fillers calcaires et leurs comportements dans une matrice cimentaire en se focalisant principalement sur les propriétés à l'état frais.

II.9.1 Propriétés requises du filler calcaire en tant qu'addition minérale

Un filler calcaire est une fine minérale obtenue par broyage d'une roche calcaire de manière à répondre aux critères de conformité de la norme sur les additions minérales calcaires [NF EN -P18-508]. L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement (Tableau II .2), s'insère dans le squelette granulaire du ciment.

(Figure II.2) et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

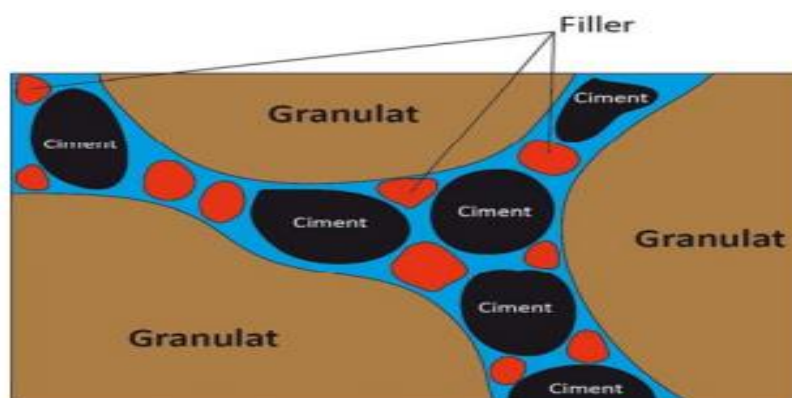


Figure II .2: illustration de l'effet filler

Les additions calcaires sont des additions de Type I classées comme quasiment inertes. Les Critères qui les définissent dans la norme [NF EP18-508] représentent des Propriétés physiques et chimiques (TableauII.2, Tableau II.3).

Tableau II.2: Critères sur les propriétés physiques

propriétés	Passant à 63 um	Blaine
critères	>63%	<2000cm ²

Tableau II .3: critères sur les propriétés chimiques

propriétés	Indice d'activité	Teneur $CaCO_3$	Valeur de Bleu	Teneur en surface
critères	>0.68	>62%	<1.3g/100g	<0.15%

Si l'addition calcaire répond aux critères de conformité de la norme [NF EP18-508], elle peut alors être prise en compte lors de la formulation du béton pour des dosages prescrits par la norme [NF EN 206-1]. Dans ce contexte une partie du filler calcaire peut être utilisée dans le calcul du liant équivalent (Eq. 1-1) en respectant les restrictions imposées par la classe d'environnement (Eq. 1-2)

$$\text{Liant équivalent} = \text{Leq} = C + K_A \text{Eq. (1-1)}$$

C = dosage en ciment en kg/m^3

A = quantité de l'addition en kg/m^3

k = coefficient de prise en compte de l'addition à condition que l'indice d'activité de L'addition calcaire soit supérieure à 0,71.

Et :

$$0 < \frac{A}{A+C} < 0.25 \quad \text{Eq. (1-2)}$$

II .9.2 Variation observée des propriétés des fillers

D'un point de vue de la composition minéralogique, la norme impose un dosage en calcite supérieur à 62 %, et nous retrouvons des fillers commercialisés couvrant cette gamme (exemple de 75% à 99,5%, valeurs extraites de [32] Certaines roches moins « pures » peuvent contenir d'autres composants principaux comme de la dolomie ou du quartz ainsi que des composants secondaires comme Al_2O_3 , Fe_2O_3 et des alcalins à des dosages variables.

De plus, des impuretés telles que le graphite, des argiles peuvent être présentes dans les inclusions de la roche. Présentes en dosages généralement faibles, ces impuretés peuvent influencer les propriétés des fillers et ont un potentiel réactif très important avec les composants du béton. Les argiles influencent notamment fortement sur la demande en eau [32] alors que le graphite peut avoir des interactions avec les adjuvants chimiques [33]. D'autre part, du fait à la fois du procès de production (broyage, tamisage) et de la nature de la roche (dureté, porosité), les fillers calcaires présentent des propriétés physiques très variables. Les principales propriétés mises en avant sont :

- la finesse, mesurée soit par la surface spécifique Blaine ou alors BET; on trouve des fillers allant de $2200 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $7700 \text{ cm}^2/\text{g}$ (en Blaine de $12000 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $70000 \text{ cm}^2/\text{g}$ (en BET respectivement [32],[34])

- la distribution granulométrique représentée par des indicateurs comme le diamètre à 50% de passant (d_{50}) de moins de $1\mu\text{m}$ à plus de $60\mu\text{m}$ [25] ou le coefficient d'uniformité de la distribution ($C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$).
- la morphologie des particules, variable d'un filler à l'autre [26] A ce stade, on constate que la conformité à une norme peut être donnée à des fillers dont les propriétés varient grandement. Qu'en est-il alors de l'incidence de cette variation sur les propriétés du béton aux états frais et durci?

II .10 Influence des filler calcaires sur les propriétés des bétons

Si un filler calcaire est essentiellement utilisé comme une addition inerte permettant de remplacer une partie du ciment et éventuellement d'augmenter le volume de poudre dans le béton, son influence sur les propriétés du béton depuis l'état frais jusqu'à l'état durci est un aspect important à prendre en compte pour limiter l'apparition de désordres (homogénéité, aspect de surface, baisse des résistances)

II .10.1 Rhéologie des mélanges cimentaires

Un béton est une suspension complexe du fait du grand nombre de paramètres de formulation induit par la grande distribution des particules considérées, de l'évolution dans le temps des propriétés dues aux réactions chimiques, et de la présence de nombreux adjuvants chimiques.

Le matériau est alors défini par :

- un seuil d'écoulement τ (en Pa), qui représente l'énergie nécessaire pour initier l'écoulement au sein de la suspension;
- généralement la viscosité dynamique ou viscosité apparente μ (en Pas) (Eq.1-3) qui Caractérise le matériau en écoulement

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \text{ Eq. (1-3)}$$

Où τ (Pa) est la contrainte de cisaillement et $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement (s^{-1}).

Le seuil et la viscosité des matériaux cimentaires sont influencés par les frottements inter granulaires et le volume d'eau libre dans la suspension, eux même influencés par les paramètres de composition:

- la concentration volumique en solide qui lorsqu'elle augmente entraîne une augmentation à la fois du seuil et des viscosités [37];
- la distribution du squelette granulaire ;
- la forme des particules; des particules plus anguleuses entraînent l'augmentation des frottements inter particulaires [38];
- l'utilisation d'adjuvant [39]; le superplastifiant est le principal responsable de la variation du seuil de cisaillement et son comportement est différent selon l'état de déformation du matériau en écoulement

II .10.2 Caractéristiques du filler influençant les propriétés à état frais

La finesse d'un filler joue naturellement un grand rôle sur l'écoulement du béton. Mais des Résultats contradictoires apparaissent selon la définition donnée à la finesse et la relation avec à la demande en eau du béton Les sections **a** et **b** illustre ce fait Les composés secondaires et les impuretés contenus dans le filler sont également discutés dans la section

II .10.2.1 Surface spécifique

Puisque les fillers calcaires sont composés de particules de dimensions inférieures à 125 μm , leur surface spécifique va jouer un rôle prépondérant sur l'écoulement en suspension [40]

En effet, travaillant à l'échelle de la suspension de filler, [32],montrent une relation directe entre la demande en eau mesurée par l'intermédiaire du β_p (demande en eau déterminée à partir d'une combinaison de mesures d'étalement sur pâtes à teneur en eau variable [41]et la surface spécifique BET. On peut ainsi observer une augmentation de la demande en eau avec une augmentation de la surface spécifique BET (Figure II.3).

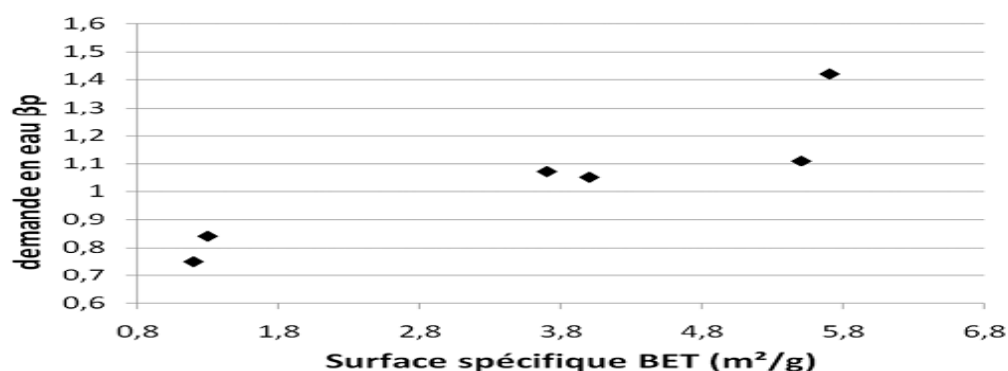
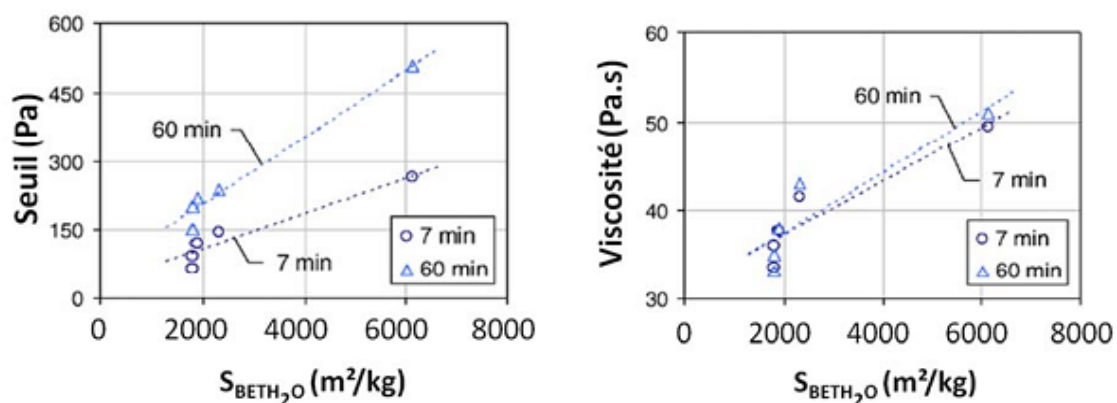


Figure II.3: Relation entre la demande en eau d'un filler et sa surface spécifique BET

Cette demande en eau plus importante induite par une surface spécifique plus importante du filler calcaire va alors influencer sur les propriétés d'écoulement des mélanges cimentaires. En effet, plusieurs recherches montrent que l'augmentation de la surface spécifique du filler (mesurée par la technique BET ou Blaine) entraîne une altération des propriétés d'écoulement (à teneur en eau fixée) que ce soit à l'échelle de la pâte, du mortier [32],[33], ou du béton [42], [36]. Dans l'exemple présenté sur la Figure II.4, Esping montre que pour un dosage en eau constant à l'échelle du béton on observe une augmentation du seuil de cisaillement et des viscosités avec l'augmentation de la surface spécifique du filler (mesurée ici par la technique BET utilisant des molécules d'eau).



Figure

II.4: évolution des propriétés rhéologiques des BAP en fonction de la surface spécifique BET_{H_2O} de l'addition minérale d'après. [36].

Si l'on voit que la surface spécifique BET des fillers est un facteur important, influant sur les propriétés des mélanges cimentaires, celle-ci est à relier aux propriétés de la roche (porosité) et au processus de fabrication (morphologie) [36] mais également à la présence d'argiles [32] ;

II .10.2.2 Finesse et distribution

L'utilisation d'un filler permet par définition de combler les vides entre les grains de dimensions plus importantes du ciment. Cela conduit à la réduction de la demande en eau de la pâte de ciment ainsi obtenue [43]. Cet effet est d'autant plus marqué que le filler est fin. Ainsi, l'utilisation d'un filler plus fin (finesse Blaine) et avec une meilleure distribution (déterminée sur la base du coefficient d'uniformité de la courbe granulométrique) permet de réduire la quantité de superplastifiant pour la formulation d'un béton autoplaçant .

L'arrangement granulaire des particules est, au-delà de la finesse, aussi dicté par la morphologie du filler [43],

II .10.2.3 Influence des composés secondaires et des impuretés

Se focaliser uniquement sur les propriétés physiques des fillers comporte le risque d'observer des comportements encore plus contradictoires du fait de l'influence que peuvent avoir certaines propriétés de composition des fillers sur les propriétés d'écoulement.

Il est montré qu'une fois mis dans un système contenant d'autres constituants le ciment et l'adjuvant chimique, les interactions entre tous ces éléments jouent un rôle.

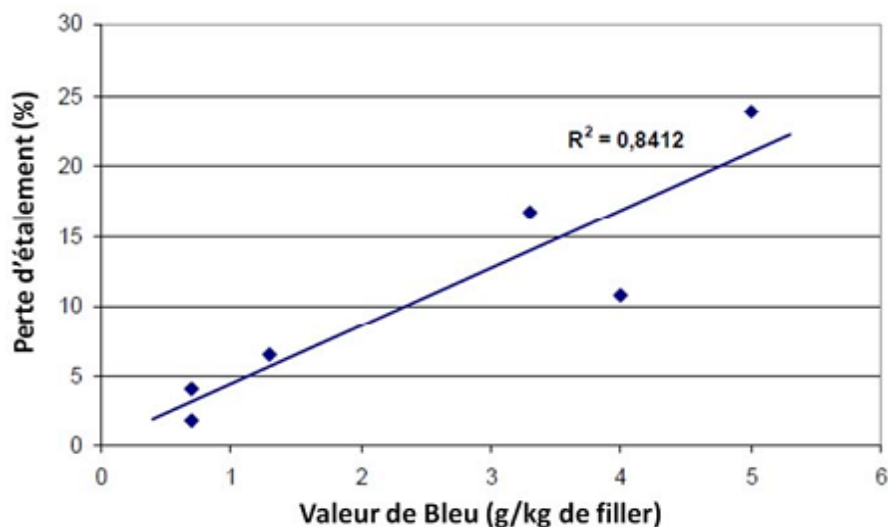


Figure II.5: perte d'étalement par rapport au mortier de référence (0% de filler) en fonction de la teneur en argiles des fillers (35% de filler en masse de ciment)

II .10.3 Influence du filler de calcaire sur état durci

II .10.3.1 Résistance mécanique

Il est montré que l'utilisation de filler permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges cimentaires (pâte, mortier, béton). Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler et le maximum de résistance est généralement atteint avec un taux de substitution de 10% [32], [44], [45]. Au-delà, l'effet du filler n'entraîne pas de modification des résistances ou alors entraîne une diminution. Une augmentation de la finesse du filler permet d'améliorer les résistances des mélanges cimentaires sur mortier.

Cette influence positive du filler sur les résistances mécaniques des bétons peut être expliquée par deux phénomènes. Tout d'abord, l'ajout de filler fin permet d'améliorer la densité de la matrice générale du béton et plus spécifiquement de la zone de transition pâte-granulats .[46]

-D'un autre côté, bien que qualifié d'addition inerte, le filler calcaire influe sur l'hydratation du ciment en servant de site de nucléation [47], mais également en modifiant les produits d'hydratation formés [48], [99], [50].

-En effet [51] montrent que dans une pâte de ciment contenant du filler calcaire, les analyses DRX mettent en évidence trois phases :

-De 1 à 7 jours, formation de carboaluminate hydraté, l'ettringite et diminution de la quantité de CaCO_3 ;

-De 7 à 28 jours, transformation de l'ettringite en aluminat hydraté; stabilisation de la formation de carboaluminate hydraté ;

-après 28 jours, l'excès d'ions carbonate en solution entraîne la transformation du Sulfoaluminate hydraté en carboaluminate hydraté (plus stable [52] ; l'augmentation des sulfates en solution entraîne la reconversion de sulfoaluminate hydraté en ettringite.* après 28 jours, l'excès d'ions carbonate en solution entraîne la transformation du sulfoaluminate hydraté en carboaluminate hydraté (plus stable [52] ; l'augmentation des sulfates en solution entraîne la reconversion de sulfoaluminate Hydraté en ettringite.

La formation de carboaluminate est également détectée lors de la formulation de mortier contenant des granulats calcaires. En effet, on peut observer à la surface des granulats des figures d'attaque. L'intensité de l'attaque des granulats calcaires par le sulfoaluminate hydraté dépend de la nature du granulat, de l'orientation cristallographique des grains de calcite et de la quantité de sulfoaluminate hydraté présent (c'est-à-dire de la température de cure et du rapport Eau/Ciment), [53,]

Les fillers calcaires accélèrent le degré d'hydratation du ciment (Figure II.6) et de ce fait l'action positive du filler sur les résistances est essentiellement marquée en ce qui concerne les résistances au jeune âge (entre 1 et 7 jours) [54], et a tendance à être négligeable au long terme [57], [55] ;

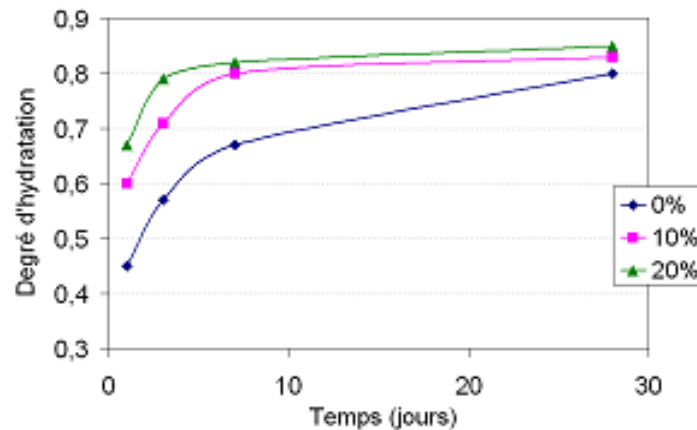


Figure II.6: évolution du degré d'hydratation en fonction du dosage en filler (0, 10, 20%)[55]

II .10.3.2 Durabilité

La durabilité des bétons peut être reliée en grande partie à la pénétration d'agents nocifs (CO_2 , chlorure...). L'étude de la perméabilité des bétons contenant des fillers calcaires est donc un point essentiel si l'on veut étudier leur comportement à long terme. Pour les essais de perméabilité, que ce soit au gaz ou à l'eau, les résultats semblent contradictoires suivant les études réalisées.

Alors que [59], trouvent une perméabilité au gaz plus importante pour les bétons contenant du filler calcaire, les essais de [56], [57] montrent qu'elle est égale voire inférieure à celle de bétons sans filler.

Les résultats trouvés pour la perméabilité et la sportivité à l'eau varient suivant les recherches effectuées. En effet, [58],[59] montrent que l'ajout de filler n'influe pas sur ces deux caractéristiques alors que [57] trouvent des valeurs légèrement inférieures pour les bétons fileries. Il faut, pour pouvoir interpréter ces résultats, tenir compte du fait que les essais de perméabilité sont fortement dépendants du prétraitement (température, durée de séchage) appliqué aux échantillons.

II .11 CONCLUSION

Les auteurs travaillant avec des fillers calcaires dans les compositions de bétons Autoplaçants, font rarement cas des propriétés complètes des fillers et relient généralement les propriétés du produit fini aux paramètres de formulation (dosage en eau et en superplastifiant) en négligeant les propriétés des fillers. En même temps, nous avons mis en avant que les fillers calcaires utilisés dans les formulations de bétons autoplaçants présentent une grande variabilité dans leurs propriétés. Ces propriétés, induites à la fois par la nature de la roche et le procès de

fabrication, influent sur les propriétés des bétons aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Suivant les paramètres. Considérés, et notamment l'exemple de la définition de la finesse (soit au sens de la surface spécifique, soit au sens de la distribution), les résultats obtenus semblent contradictoires. D'un côté, il est montré un accroissement de la demande en eau en fonction de la finesse (surface spécifique) alors que de l'autre, on constate une diminution de la demande en eau en fonction de la finesse (distribution).

Au-delà des paramètres physiques des fillers, il est également montré une grande influence des composés secondaires (oxyde de magnésium) ainsi que des impuretés (argiles) surtout lors de l'utilisation d'adjuvants chimiques.

Si lors des études présentées dans la littérature, l'utilisation d'un filler calcaire, généralement bien intégré dans la méthode de formulation, ne semble-t-il pas un obstacle pour la formulation d'un BAP, la réalité sur le terrain est toute autre.

Les études de cas montrent que les interactions multiples et imprévisibles qui peuvent exister entre les fillers et les autres constituants peuvent entraîner des comportements inattendus et parfois dommageables conduisant à la conclusion que le filler est impropre à une utilisation BAP.

La finesse influe de manière significative sur la quantité d'eau nécessaire pour remplir les vides dans la pâte

Le dosage en superplastifiant de saturation est beaucoup plus affecté par la finesse des particules des poudres que par leur composition chimique. Pour les fines calcaires utilisés, une augmentation de la surface de Blaine conduit à une diminution du dosage en superplastifiant répondant à la maniabilité du BAP.

La surface de Blaine affecte le maintien de l'ouvrabilité des BAP. La cinétique de diminution de l'étalement est plus prononcée pour le BAP formulé avec des fillers ayant une surface de Blaine " s_B " faible. La nature de la roche mère des fillers ne semble pas intervenir.

La finesse influe sur les propriétés physiques du BAP.

Les résultats issus des essais mécaniques mettent en exergue le rôle de la finesse des calcaires sur l'acquisition des résistances mécaniques notamment au jeune âge. L'addition de fillers de surface de Blaine élevée conduit à des BAP de résistance à la compression et de rigidité plus élevée.