

I.1 Introduction :

À cette époque, la plupart des concepteurs étaient tout à fait satisfaits de calculer des structures avec des bétons de 15 à 20MPa. Ces bétons leur étaient bien connus, ils étaient économiques, compétitifs et permettaient de construire des structures de façon sécuritaire.

Au début des années 1960 dans la région de Chicago, les bétons à haute résistance ont, en quelque sorte, vu le jour et ont commencé à être utilisés en quantité non négligeable dans plusieurs structures majeures. Même si la résistance des premiers bétons à hautes résistance qui ont alors été développés peut paraître modeste de nos jours, il faut se rappeler qu'à cette époque les bétons usuels avec lesquels on construisait des structures avaient une résistance à la compression essentiellement comprise entre 15 et 30MPa [1].

Il faut aussi se souvenir que le ciment et les adjuvants qui étaient disponibles à cette époque n'étaient pas aussi performants que ceux dont on dispose à l'heure actuelle pour fabriquer des BHP. La plupart des ciments commerciaux n'étaient pas broyés aussi finement qu'à l'heure actuelle et surtout les réducteurs d'eau commerciaux utilisés à cette époque étaient essentiellement à base de lignosulfonate et ne permettaient de diminuer la quantité d'eau de gâchage que de 8 à 10 % [1].

Les premiers bétons à haute résistance ont été développés dans un tel contexte historique, de façon à pouvoir mettre en valeur les qualités des bétons à haute résistance, les concepteurs et les producteurs de béton ont fait appel à un moyen simple et efficace pour convaincre les propriétaires d'utiliser un tel matériau pour lequel on n'avait aucune expérience et sur lequel on avait finalement très peu de données techniques [1].

En fait, l'augmentation de la résistance à la compression du béton qui avait pu être obtenue était attribuable à la diminution de la valeur du rapport eau/ciment en sélectionnant des réducteurs d'eau un peu plus efficace que la majorité des produits commerciaux disponible à cette époque. En outre, la diminution du rapport eau/liant vers des valeurs comprises entre 0.35 et 0.40, a commencé à s'apercevoir que le choix du ciment était aussi critique. Le ciment choisi devait bien performer, non seulement d'un point de vue mécanique, mais aussi d'un point de vue rhéologique. Les premiers ciments utilisés pour fabriquer des bétons à haute résistance étaient des ciments de Type I ou de Type II ASTM ou des ciments qualifiés comme type II modifiés [1].

De façon à diminuer le plus possible le rapport eau/liant, le dosage en réducteur d'eau était augmenté le plus possible par rapport aux dosages qui étaient normalement utilisés dans des bétons ayant des résistances à la compression de 20 ou 30MPa. Cependant, le dosage en réducteur d'eau ne pouvait être augmenté de beaucoup, car, à ce moment-là, très vite cette

augmentation du dosage en réducteur d'eau se traduisait par un retard de prise significatif ou par une quantité d'air entraîné excessive qui, évidemment, diminuait la résistance finale du béton. Les bétons à haute résistance étaient utilisés uniquement dans des applications intérieures [2].

Comme on vient de la voir, le moteur principal du développement des bétons à hautes résistances en Amérique du Nord (figures I.1 ; I.3) a été essentiellement économique, dans le domaine des bâtiments de grande hauteur et porté par des producteurs de béton et des entrepreneurs [1].

Ainsi, l'apparition et le développement des BHP en France se sont essentiellement déroulés au sein du génie civil dans le domaine des ponts et autour de deux entités pionnières:

L'administration de l'Equipement sous la férule du Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées avec la réalisation d'un premier ouvrage d'art en 1984 dans la région de Melun au sud de Paris. Il est remarquable de noter, que dans la communication relative à cette expérience, on trouve pour la première fois sous la plume de Yves MALIER [2], alors responsable de la division matériaux et structures pour ouvrages d'art au LCPC, l'appellation « bétons à hautes performances » au lieu de « haute résistance ».

L'entreprise Bouygues, sous l'impulsion de son directeur scientifique de l'époque, Pierre Richard, avec la réalisation d'un plot d'essai sur la dalle du viaduc SNCF de l'A.86 dans la région parisienne en 1984, puis du pont de l'île de Ré et de l'arche de la défense de 1985 à 1987, à ce stade, une part importante de la recherche et développement dans le domaine des BHP s'est fédérée autour des Projets Nationaux.

- Le projet national « Voies nouvelles du matériau béton ».

- Puis le projet national « BHP ».

Parmi les nombreux apports de ces structures, on peut distinguer :

- L'évolution des règlements de calcul BAEL et BPEL avec une première extension aux B60 en 1994 puis aux B80 en 1999. Cette dernière reposant sur un important travail scientifique en particulier au niveau de retrait et du fluage.

I.2 Définition :

On appelle Béton à Hautes Performances (BHP), les bétons hydrauliques ordinaires (Sable + Eau + Gravier + Ciment) auxquels on rajoute des adjuvants (Fluidifiant et éventuellement des ultra fines) pour augmenter leur performances, dont la résistance, qui doit dépasser les 60MPa à 28 jours [3].

Cependant, la résistance à la compression élevée n'est pas la seule et la principale propriété des BHP, car plusieurs autres propriétés se trouvent améliorées, telles que la très faible perméabilité donc une durabilité accrue.

Le BHP apporte en outre des avantages multiples par rapport au béton ordinaire citons, à titre d'exemple :

- la maniabilité est accrue sans risque de ségrégation lors de la mise en œuvre,
- la durabilité des structures est améliorée par la forte compacité du béton avec une perméabilité à l'air et à l'eau réduite, une résistance aux agressions et une meilleure résistance à l'alcali- réaction, une plus grande résistance à l'abrasion et une meilleure tenue aux cycles de gel/dégel,
- Il permet de concevoir des structures plus minces grâce à l'augmentation des caractéristiques mécaniques (compression, traction, module d'élasticité) tant au jeune âge qu'à long terme.

Cependant, les propriétés améliorées des BHP ne peuvent être obtenues que grâce à plusieurs dispositions simultanées concernant :

- Les granulats doivent être de bonne qualité, la résistance du béton pouvant être limitée par celle des granulats eux-mêmes, l'emploi d'adjuvants spécifiques, notamment des super plastifiant réducteurs d'eau ainsi que des ajouts minéraux tel que la cendre volante, le laitier du haut fourneau, la fumée de silice.... etc.
- L'emploi de ciments de classe élevée à des dosages compris entre 400 et 550 kg/m³. Ces dernières années ont vu l'utilisation de bétons de résistance en compression de plus en plus élevée pouvant aller de 50MPa jusqu'à 400MPa et même de 800MPa en utilisant des traitements thermiques et mécaniques appropriés et des produits spéciaux comme la poudre métallique [4]. De telles résistances élevées ont donné une nouvelle classification de bétons, ils sont actuellement appelés bétons à haute résistance (BHR), bétons à hautes performances (BHP), bétons à très hautes performances (BTHP), bétons à poudres réactives (BPR), et bétons fibrés ultra performants (BFUP) [1].



Figure I.1 : Gratte- ciel de la région de Chicago construits avec des bétons à très haute résistance [2]



Figure I.2 : Edifice la Laurentienne à Montréal. Colonne expérimentale de 119.9Mpa [2]

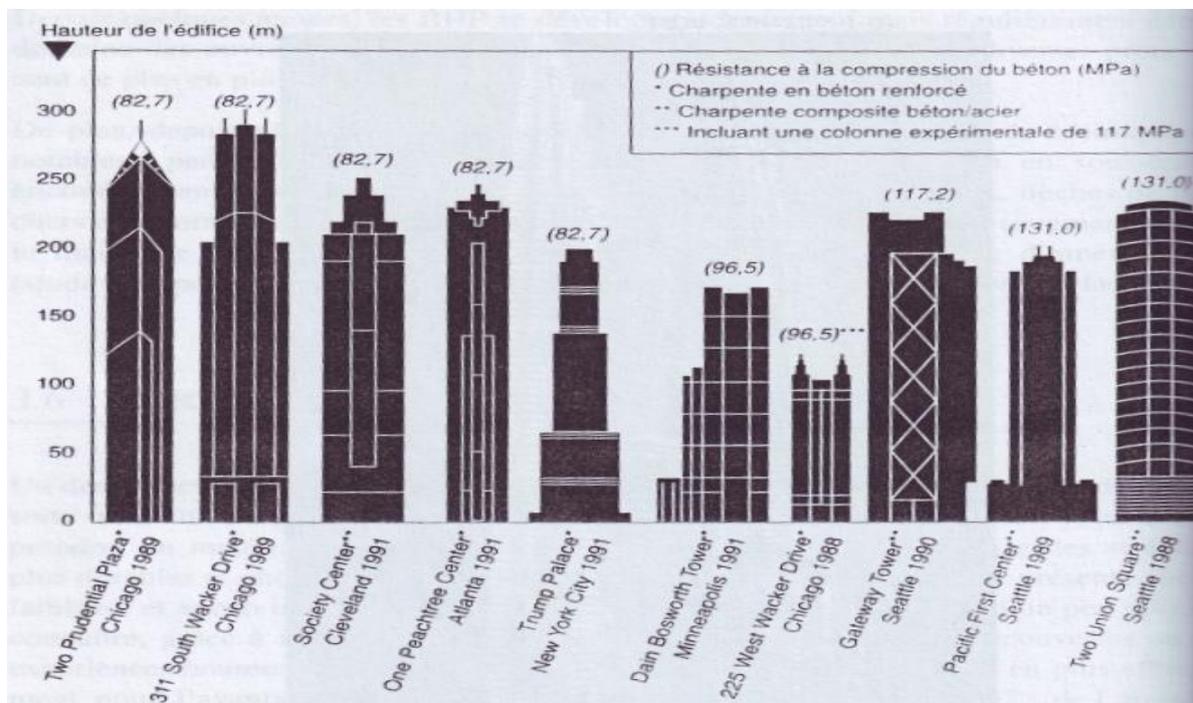


Figure I.3 : Le béton à haute résistance se profile à l'horizon des Etats-Unis (tiré de Concrète Technologie Today , 1994)[1]

Des gratte-ciel peuvent être construits sur des sols qui ont une capacité portante marginale [2], des piliers et des tabliers de pont peuvent être conçus avec des BHP pour construire des ponts qui sont plus élancés et plus élégants et qui peuvent s'harmoniser beaucoup plus avec le paysage (figure I.4).

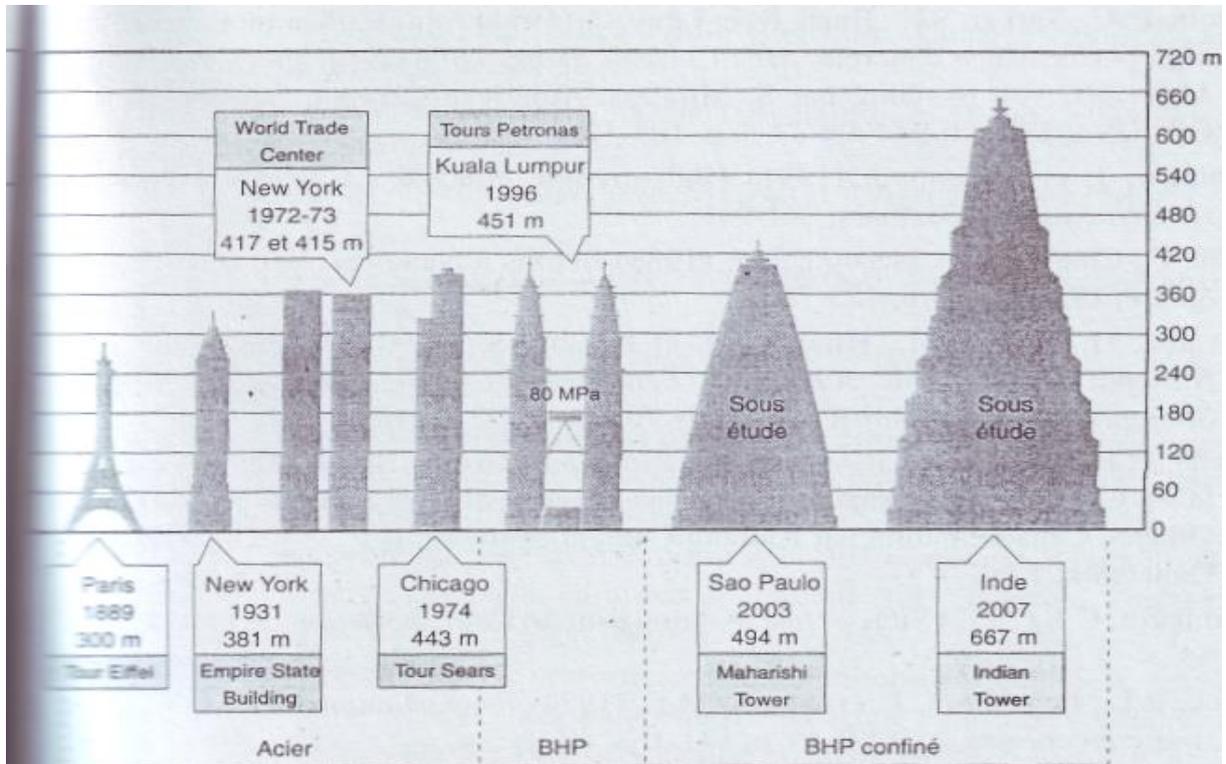


Figure I.4 : Progression de la hauteur des gratte-ciel [2]

Bien sûr, les bétons à haute performance ne sont pas un remède universel qui ralentit le développement de tous les autres types de bétons. Le béton à haute performance a ses limites, mais c'est un béton durable qui permettra aux concepteurs et aux architectes de dépasser les limites du béton actuel. Parallèlement à ces développements dans le domaine des BHP, nous avons pu voir récemment d'autres bétons de pointe se tailler des marchés de riche tel le béton renforcé de fibres, le béton auto plaçant, le béton coulé sous l'eau, le béton à haute performance compacté au rouleau et le béton de poudres réactives [1].

Tous ces bétons sont conçus pour des marchés qui sont restreints mais rentables, où la compétition est limitée. Il est évident que cette courte liste de bétons spéciaux n'est pas complète et qu'elle s'allongera très rapidement avec le temps car il sera de plus en plus intéressant d'offrir aux propriétaires et aux entrepreneurs des solutions plus élégantes, plus économiques, plus durables et finalement plus rentables que celles où l'on utilise un béton de 20 à 30Mpa [1].

Chose intéressante, on découvre parfois que ces bétons intelligents pourraient fournir d'avantages additionnels que ceux pour lesquels ils ont été initialement conçus. Par exemple, l'on peut citer le cas du béton auto plaçant qui a été développé au Japon afin de faciliter la mise en place du béton dans des éléments structuraux congestionnés et qui maintenant commence à être utilisé comme « béton silencieux » ou béton « sans bruit » [4].

L'aperçu historique rappelé ci-dessus a mis en évidence l'intérêt de perfectionner le béton qui s'est caractérisé par l'appellation BHP.

I.3 Les voies d'obtention des hautes performances :

Les études ont montré les effets néfastes pour la résistance et la durabilité des excès d'eau non hydratée mais nécessaire à la maniabilité et la mise en œuvre. Il était donc nécessaire de chercher à réduire raisonnablement ce dosage en eau en introduisant des fluidifiants. En parallèle les chercheurs voulaient du béton une roche massive et compacte en incorporant des ultrafines [5].

Ainsi deux voies se constituèrent pour obtenir les hautes performances [6] :

I.3.1 Défloculation des grains de ciment :

Cette défloculation est obtenue par l'emploi de produits organiques (condensés de formaldéhyde et mélamine sulfonât ou condensés de formaldéhyde et naphthalène sulfonâtes). Elle permet aux grains de ciment en suspension dans l'eau de retrouver leur granularité originelle (entre 5 et 50 µm pour l'essentiel). Cette première voie conduit à une réduction sensible de la quantité d'eau nécessaire puisque une forte part de celle-ci n'est plus, comme dans le béton traditionnel, piégée dans les floccs de grains de ciment et donc peu utile à la maniabilité.

I.3.2 Extension du spectre du mélange granulaire :

Cette extension est obtenue par utilisation d'éléments ultrafins (fumées de silice, fillers calcaires, etc.), chimiquement réactifs, destinés à remplir les micros vides de l'empilement de grains en améliorant ainsi la compacité du mélange tout en faisant progresser encore les qualités de sa rhéologie à l'état frais, corollairement, la quantité d'eau nécessaire à la mise en œuvre du béton peut encore être réduite.

Notons que la première voie peut être utilisée seule et conduit déjà à des gains de propriétés constructives, d'ouvrabilité et durabilité intéressantes.

La seconde voie, évidemment, implique le recours simultané à la première, tant il est sur inutile de compléter le spectre du mélange granulaire en direction des éléments très fins si l'on n'a pas, avant tout, réduit la floculation.

Au plan des réalisations industrielles, il est désormais, par différentes expérimentations, que, en, tous lieux avec les matériaux locaux, l'application de ces principes simples permet, sans majorer le prix de base du béton de façon sensible, d'obtenir des bétons à hautes performances qualifiés, en termes de résistance caractéristique à la compression, par des valeurs comprises entre 60 et 80MPa (pont de Joigny).

Une approche plus fine, un choix plus strict des constituants de base, une acceptation d'un accroissement du prix plus sensible, une obligation absolue d'utiliser les deux voies précédemment citées peuvent conduire déjà, dans les conditions d'un processus industriel, à l'obtention de résistances comprises entre 90 et 140 MPa (Seattle 118MPa) dont le concepteur estimerait avoir besoin pour son projet.

Enfin, une approche de nature différente faisant appel à des constituants très sélectionnés (ciments et granulats de qualités exceptionnelles, adjonction de polymères,...), à de nouveaux processus d'élaboration (serrage, autoclavage,...) et à de nouveaux types de fonctionnement (confinement,...) peut, pour construire des objets pour lesquels le prix de base peut se dégager des valeurs usuelles, permettre d'atteindre des résistances mécaniques de plusieurs centaines de méga pascals et ouvrir ainsi le champ à de nouvelles applications ou leur faible prix relatif sera bien souvent très compétitif avec celui des matériaux plus nobles habituellement choisis.

I.4 Principes des BHP :

Il faut admettre que pendant longtemps les progrès réalisés dans le domaine des BHP ont été plutôt le fruit d'une approche empirique que d'une approche fondamentale et scientifique. Cependant, à l'heure actuelle, on peut quand même expliquer les meilleures performances des BHP en se basant sur des principes scientifiques établis, bien qu'il ne soit pas toujours possible d'expliquer toutes les propriétés des BHP dans leurs moindres détails.

En fait, tant et aussi longtemps que les BHP seront fabriqués avec des matériaux aussi simples et peu coûteux que ceux que l'on utilise pour faire des bétons usuels, il n'est pas évident qu'une recette magique simple puisse donner directement la composition optimale d'un BHP donné. Il faudra donc toujours, en un endroit donné, rechercher la meilleure combinaison de matériaux locaux pour obtenir un BHP ayant un rapport eau/ciment désiré.

Comme on le verra, fabriquer un BHP est une opération un peu plus compliquée que de produire un béton usuel.

Les raisons en sont simples : au fur et à mesure que la résistance à la compression visée augmente, les propriétés du béton ne sont plus simplement reliées au rapport eau/liant, le

paramètre fondamental qui gouverne les propriétés des bétons usuels par l'intermédiaire de la porosité de la pâte de ciment hydraté [4].

I.4.1 Amélioration de la résistance de la pâte de ciment hydraté :

La pâte de ciment hydraté peut, en première approximation, être considérée comme un matériau monocristallin. La dépendance de la résistance à la traction d'un matériau monophasique cristallin par rapport à sa porosité s'exprime généralement par la relation exponentielle suivante :

$$S = S_0 \cdot e^{-bp} \quad (\text{I.1})$$

Où :

S : la résistance à la traction du matériau qui a une certaine porosité ;

S_0 : La porosité ;

p : la résistance à la traction intrinsèque du matériau lorsque la porosité est nulle ;

b : paramètre qui dépend de la taille et de la forme des pores.

La résistance à la compression d'un matériau fragile est plus grande que sa résistance à la traction parce que, en traction, un matériau se rompt par la propagation rapide d'une simple fissure alors qu'il faut qu'un certain nombre de fissures de traction se réunissent pour causer une rupture en compression.

Il n'y a pas encore eu d'approche spécifique pour dériver la résistance à la compression d'un matériau poreux à partir de la connaissance des caractéristiques de sa microstructure.

$$f'_c = f_c(1 - p)^m \quad (\text{I.2})$$

f'_c : C'est la résistance à la compression du matériau contenant une porosité ;

f_c et p : représente la résistance à la compression intrinsèque d'un matériau donné lorsqu'il a une porosité nulle, et

m : est un paramètre qui dépend de la nature des liens inter cristallins que l'on trouve dans le solide.

La résistance d'une pâte de ciment hydraté peut être améliorée en considérant de façon plus détaillée les paramètres suivants :

Porosité : endroit donné peuvent diminuer considérablement la résistance d'un matériau.

La taille des granulats : en général, la résistance d'une phase cristalline augmente lorsque la taille des grains diminue.

Hétérogénéité : avec des matériaux multiphasiques, les hétérogénéités microstructurales sont une source de perte de résistance.

I.4.2 Porosité :

Quand les silicates anhydres des grains de ciment entrent en contact avec l'eau, leur hydratation commence toujours par une mise en solution. Au fur et à mesure que l'hydratation se développe et que la taille des pores capillaires diminue, si bien l'hydratation des portions non encore hydratées des grosses particules de ciment se fait plutôt par diffusion. Comme les premiers produits d'hydratation cristallisent à l'extérieur dans l'espace rempli d'eau qui entoure les grains de ciment (c'est-à-dire à l'extérieur des limites d'une particule de ciment qui s'hydrate), on les appelle des produits d'hydratation externe.

Par contre, lorsque les produits de l'hydratation se forment par des réactions à l'intérieur des limites des particules de ciment, on les appelle des produits d'hydratation interne, ils sont plus compacts et moins bien cristallisés que les produits d'hydratation externes.

Du point de vue de la résistance, il est donc très important d'obtenir une microstructure qui rassemble des produits internes plutôt qu'à celle des produits externes. Comme on le verra plus tard, le concept de produits d'hydratation interne et externe d'un ciment est utile pour apprécier le rôle des faibles rapports eau/ciment, des super plastifiants et des matériaux cimentaires que l'on utilise pour fabriquer des BHP.

Les principaux facteurs qui affectent la porosité de la pâte de ciment hydraté sont le rapport de l'eau disponible au volume de la phase de silicates qui peut s'hydrater et la quantité d'air piégé durant le malaxage. En 1982 [1], Féret a exprimé sous forme d'une loi :

$$f'_c = k \left(\frac{c}{c+a+e} \right)^2 \quad (\text{I.3})$$

Où :

f'_c : représente la résistance à la compression de la pâte de ciment hydraté,

c, e, a : Les volumes du ciment, de l'eau et d'air respectivement, et

K : est une constante qui dépend du type de ciment (Féret, 1892).

En divisant par c le numérateur et le dénominateur, l'expression de féret peut

être réécrite de la façon suivante :

$$f'_c = k \left(\frac{1}{1+\frac{a+e}{c}} \right)^2 \quad (\text{I.4})$$

-le volume d'air piégé est généralement inférieur à 1 ou 2 % du volume total du béton ; on peut donc négliger le terme a/c dans l'expression précédente :

$$f'_c = k \left(\frac{1}{1+\frac{e}{c}} \right)^2 \quad (\text{I.5})$$

Si l'on désire augmenter la résistance à la compression d'un béton, il devient évident-il qu'il faut absolument réduire le rapport eau/ciment. Quand le rapport eau/ciment de la pâte de ciment hydraté est réduit, les particules de ciment se rapprochent les unes des autres dans mélange fraîchement malaxé (Figure I.5). Les particules de ciment étant maintenant plus rapprochées les unes des autres, les produits d'hydratation externes ont moins d'espace à remplir pour relier les différentes particules de ciment et développer une certaine résistance initiale [1].

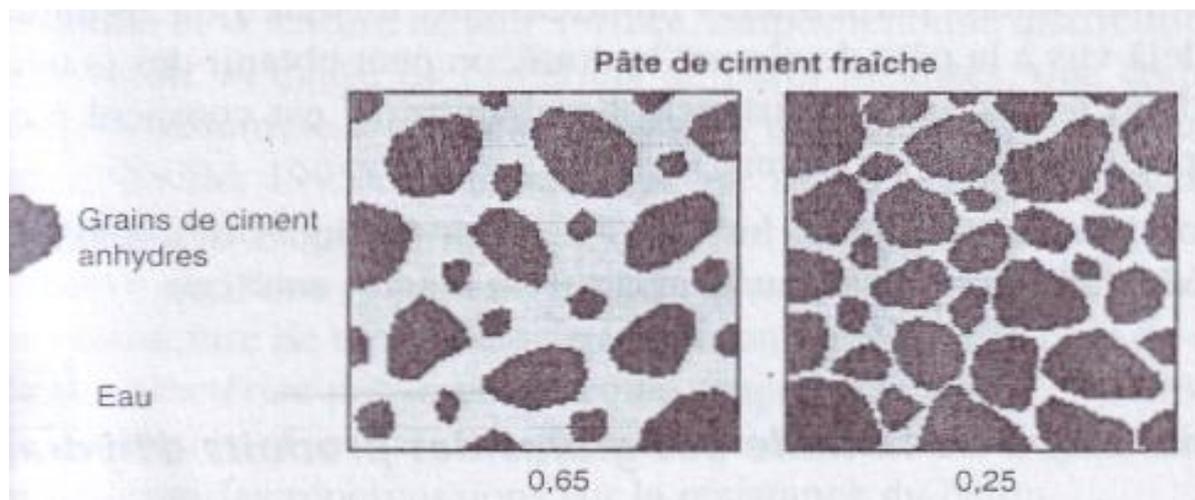


Figure I.5 : Représentation schématique de deux pâtes de ciment fraîches de rapports respectifs de 0,65 E/C et 0,25E/C [1]

I.4.3 Diminution de la taille des grains des produits d'hydratation :

La diminution du rapport eau/liant favorise la formation de produits d'hydratation internes qui sont caractérisés par une texture très fine, les C-S-H dans ces produits d'hydratation internes ressemblent beaucoup plus à une phase compacte ayant une apparence amorphe [1].

I.5 Choix des matériaux pour les BHP :

Lorsque l'on choisit les matériaux pour fabriquer un BHP, certains choix sont plus critiques que d'autres. Ainsi on commencera à considérer la sélection du ciment Portland même dans le cas où d'autres ajouts cimentaires sont utilisés en conjonction avec le ciment Portland.

La sélection se poursuit par celle du super plastifiant afin d'optimiser la combinaison ciment/super plastifiant.

Quand ces choix cruciaux sont faits, on évalue l'utilisation d'un ou plusieurs ajouts cimentaires. La sélection des granulats viendra par la suite puisque leur qualité devient de plus en plus critique pour augmenter la résistance à la compression du BHP. Il n'existe pas une

méthode précise pour formuler un BHP. Cette formulation dépend essentiellement de la résistance ainsi des performances visées par le BHP [1].

I.5.1 Le laitier à haut fourneau :

Le laitier est un sous-produit issu de la fabrication de la fonte. Lors de l'élaboration de la fonte dans le haut fourneau, il y a production de composés gazeux (gaz de haut fourneau), liquides (fonte, laitier) et solides (poussière de gaz). Ces éléments proviennent de la gangue des minerais, des cendres de combustibles et des additions siliceuses, calcaires ou magnésiennes des fondants. Les quantités de laitier par tonne de fonte sont donc déterminées par les conditions mêmes d'exploitation, et aussi par la nature du minerai.

Il sort du trou de coulée à une température de l'ordre de 1500° C, il contient de la chaux (45 à 50%), de la silice (25 à 30%), de l'alumine (15 à 20%) et 10% environ de magnésie, oxydes divers et manganèse. le laitier est un véritable ciment manifestant par lui-même des propriétés hydrauliques, grandement activées d'ailleurs par la présence du clinker. Son hydratation, qui se traduit par le développement de résistances mécaniques est moins rapide que celle du portland surtout dans sa période initiale .elle dégage parallèlement moins de chaleur et accuse une sensibilité plus marquée aux variations de température (abaissement ou élévation).

Le laitier retient un peu moins bien l'eau de gâchage que le portland et craint donc davantage la dessiccation.

Mais chimiquement, il résiste normalement mieux tant à l'action destructrice des sulfates, qu'à la dissolution de la chaux par les eaux pures ou chargées en certains sels, ainsi que par celles contenant du gaz carbonique agressif.

La composition du laitier varie dans des proportions sensibles, suivant la marche du Haut fourneau et les conditions de son fonctionnement. Par voie de conséquence, les Constituants secondaires du laitier ne se trouveront pas aux mêmes concentrations, suivant que Le rapport laitier / fonte sera faible ou élevé. Ceci influera sur les propriétés du laitier.

Le laitier en fusion, liquide se séparant par gravité de la fonte en fusion, est évacué par le trou de coulée. Selon le mode de solidification, on obtient des produits différents tel que le laitier cristallisé, obtenu par refroidissement lent à l'air, donne une roche dure, angulaire et frottant qui, après concassage et criblage, est utilisé comme granulat dans le béton, matériaux d'assises de chaussées, enrobés bitumeux, remblais-Le laitier vitrifié [6], obtenu par refroidissement brutal (trempe) :

-par de l'eau sous pression (granulation) donnant le laitier, de granulométrie 0/5.

-à l'eau et l'air donnant le laitier bouleté, de granulométrie 0/20 environ.

Il résulte un laitier comparable au laitier granulé mais à granulométrie très étalée, ce qui permet son utilisation, d'une part une partie comme laitier granulé et d'autre part une autre comme granulats de laitier expansé. Cette technique de traitement offre notamment l'avantage d'un investissement modéré, de frais d'entretien raisonnables et d'une faible consommation d'eau (1 m³/t de laitier, soit 8 à 10 fois moins qu'en granulation classique) [7].

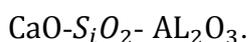
a) Laitier vitrifié moulu de haut fourneau :

Le laitier vitrifié moulu est une addition du type II. La norme distingue deux classes de laitier A et B ; la dernière est la plus réactive, sa finesse étant la plus élevée. Tous les laitiers couverts par la norme sont de type II au sens de la norme [8], mais seuls les laitiers de classe B sont substituables au sens et sous les conditions de la norme. Depuis que cette norme [8], est publiée (1992), aucune utilisation industrielle du laitier comme addition au béton n'a été signalée en France [9].

b) Composition chimique du laitier :

La composition chimique du laitier est un facteur qui détermine son emploi. Elle peut varier dans de larges limites suivant la nature du minerai, la nature et la qualité des fondants, du combustible et du procédé employé. Exception faite pour quelques fabrications spéciales, le laitier de haut-fourneau doit 92% de sa composition chimique aux quatre oxydes CaO - MgO SiO₂ et Al₂O₃. La présente dans le système ternaire CaO-SiO₂- Al₂O₃ la position du laitier par rapport à d'autres matériaux tels que ciment, pouzzolanes et verres industriels [10].

La connaissance de cette composition permet d'expliquer ou de prévoir ses propriétés mécaniques, physiques et chimiques Les principaux constituants du laitier cristallisé sont représentés dans le tableau ci-dessous :



c) Hydraulicité du Laitier Vitrifié :

Contrairement au ciment portland, qui est stable dans l'eau et s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier vitrifié n'est soluble que dans une eau alcalinisée. Il a donc besoin, pour faire prise, d'un agent d'addition appelé activant ou activateur. Lorsque le laitier est simplement mélangé à l'eau, une couche pseudo morphique, peu pénétrable se forme sur la surface du laitier et inhibé de ce fait la pénétration de l'eau au sein du grain et la dissolution des ions.

Il est alors nécessaire d'ajouter un activateur pour permettre l'hydratation du grain de laitier [7].

I.5.2 La fumée de silice :

La fumée de silice est un coproduit de la fabrication du silicium et de ses alliages. Les températures de travail très élevées (1500 à 3000 °C) au cours de l'élaboration du Silicium, provoquent d'importants dégagement de fumée qui sont captés en surface afin de protéger l'environnement. Suivant la composition des alliages, les produits secondaires ajoutés aux ingrédients principaux et les méthodes de fabrication les propriétés des fumées de silice sont assez diverses.

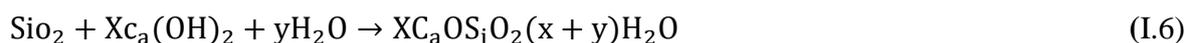
D'un point de vue chimique la fumée de silice est essentiellement composée de silice (plus de 90 %). de point de vue structural, elle est essentiellement composée de silice vitreuse. et du point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre 0,1 µm et 1 ou 2 µm. la dimension moyenne des ces sphères est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment moyen.

La densité de la fumée de silice est d'environ 2,2, une valeur usuelle pour la silice vitreuse. la surface spécifique de la fumée de silice ne peut pas être mesurée de la même façon que celle du ciment portland à cause de son extrême finesse : elle doit être déterminée par adsorption d'azote dans la documentation en trouve les valeurs entre 15000 et 25000 m²/kg, par contre 1500 m²/kg pour un ciment portland.

Ces caractéristiques très particulières (très forte teneur en silice, état amorphe, extrême finesse) ont font de la fumée de silice une pouzzolane très réactive.

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, mais aussi à un effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est l'effet filler. En outre, la fumée de silice à un effet non négligeable sur la germination des grains de portlandite $Ca(OH)_2$.

Les fumées de silice réagissent pouzzolaniquement avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratée (C-S-H), selon la réaction pouzzolanes suivantes :



Cet effet réduit la taille des pores, d'où une diminution de la porosité qui améliore les propriétés mécaniques du ciment.

Les fumées de silice grâce à leur morphologie offrent en outre l'avantage du béton frais. Elles n'interfèrent pas sur l'arrangement géométrique des grains de ciment dans la suspension,

les grains de silice peuvent venir se placer dans les espaces entre les grains de ciment sans modifier la disposition géométrique.

Mais en pratique, pour que ces deux effets (effet fillers et effet pouzzolanique) puissent se développer, il est nécessaire d'ajouter un fluidifiant au mélange.

L'ajout de fumée de silice entraîne une amélioration des résistances mécaniques en compression. Le dosage optimal en fumée de silice pour l'obtention de hautes résistances se situerait aux alentours de 10% de fumée de silice par rapport au poids de ciment.

Les particules de fumée de silice peuvent avoir un effet fluidifiant sur les bétons ayant un très faible rapport E/C. Cet effet n'est pas bien expliqué par les chercheurs : certains voient que l'action des petites sphères de fumée de silice est comme celle des billes d'un roulement, d'autres pensent que les particules de fumée de silice déplacent une certaine quantité d'eau que l'on retrouverait au sein des grains de ciment floclé. La combinaison de ces deux modes d'action de la fumée de silice entraîne la formation d'une microstructure très dense et d'une très bonne adhérence entre les granulats et la pâte de ciment hydratée [11].

I.5.3 Cendres volante :

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées dans les dépoussiéreurs de cheminée des centrales thermiques fonctionnant au charbon pulvérisé divisé. Ils peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes composition de phase, ils peuvent être classés en quelques grandes familles, parmi ces grandes famille en trouve : les cendres silicoalumineuses, les cendres silico-calciques et les cendres sulfocalcique qui on une très forte teneur en calcium et en soufre. Ce n'est pas toujours facile d'inclure une cendre volante dans une de ces classes, et pouvoir prédire son comportement pouzzolanique.

Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes aux autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment portland, elles peuvent contenir des sphères creuses, comme elles peuvent contenir seulement des particules angulaires leurs dimensions pouvant descendre jusqu'à $0,15 \mu\text{m}$, dans certains cas. L'étendue granulaire des cendres volantes varie de $0,5 \mu\text{m}$ à $4 \mu\text{m}$ selon la nature du produit, la masse volumique moyenne est d'environ $1,35 \text{m}^2/\text{g}$.

Pour développer une réaction pouzzolanique, la cendre volante doit contenir une quantité non négligeable de matériaux vitreux, de cet effet, il faut porter beaucoup d'attention et en se basant pas sur une généralisation de leurs efficacité quand elles sont utilisées comme ajouts dans les BHP [11].

I.5.4 Fillers :

Produits obtenus par broyage fin ou pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, kieselguhr, bentonite, cendres volantes...) naturelles ou non, agissant principalement, grâce à une granulite appropriée, par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment (accroissement de maniabilité, diminution de perméabilité et de capillarité, réduction de la fissurabilité...) les fillers sont inertes s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau ; ils sont actifs s'ils ont, même pareillement, des propriétés hydrauliques ou Pouzzolaniques en présence de ciment et d'eau [11].

I.5.5 Les ciments :

I.5.5.1 Généralités :

les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (vers 1450c) et le broyage d'un mélange minéral(calcaire+ argile en générale) ces poudre constituées de sels minéraux anhydres instables (en particules silicates et aluminates de chaux) forment avec l'eau une pâte capable moins rapidement d'ailleurs) d'où le nom de liants hydraulique par opposition avec « liants aériens » (à base de chaux grasse et maigre) qui ne peuvent durcit qu'au contact de l'aire .nous signalons ici que l'institut technique du Bâtiment et des Travaux publie un « Guide pratique pour l'emploi des ciments » (M.ADAM) ,(Bibliographie 5), Ce guide est réédite annuellement après mise à jour [12].

I.5.5.2 Les constituants du Clinker :

C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkérisation) du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéise et comprenant principalement de la chaux (CaO) de la silice (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃).Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrières (calcaire, argile, marne...). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur, donne des « portland » et confère aux ciments de ce groupe leurs propriétés caractéristiques.

I.5.5.3 Les quatre principaux constituants du clinker sont :

- Le silicate tricalcique : SiO₂, 3CaO (ou C₃S).
- Le silicate bi calcique : SiO₂, 2CaO (ou C₂S).
- L'aluminate tricalcique : Al₂O₃, 3CaO (ou C₃A),
- L'alumine-ferrite tétra calcique : Al₂O₃, 4CaO (ou C₄AF).

Tableau I.1 : Composition minéralogique de clinker [13]

Constituants	Composition et abréviation	Nom particulier	Pourcentage (%)
Silicate tricalcique	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C3S)	Alite	45-65
Silicate dicalcique	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C2S)	Bélite	15-25
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C3A)	Célite	0-15
Alumino-ferrite tétracalcique	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{F}_2\text{O}_3$		0-10

Les propriétés des ciments varient en fonction des pourcentages respectifs de ces différentes Phases :

-Le C3S qui libère au cours de l'hydratation une quantité de chaleur voisine de double de libérée par le C2S, donne au ciment une résistance rapide et élevée ; cette phase est responsable des résistances aux premiers âges.

-Le C2S permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme ; à fort pourcentage, la chaleur d'hydratation dégagée par le phénomène de prise est plus faible.

-Le C3A est la phase présentant la plus grande vitesse de réaction initiale d'où l'obtention de résistances initiales élevées, c'est la phase dont la réaction d'hydratation est la plus exothermique, de ce fait elle contribue essentiellement à la prise de la pâte de ciment alors qu'elle contribue peu à la résistance finale, elle est ailleurs facilement attaquée par les sulfates.

-Le C4AF, qui forme une solution solide de C2A et C2F réagit moins vite que C3A ; son rôle est mineur dans les réactions de durcissement du ciment.

Tableau I.2 : Composition chimique de clinker [13]

Les oxydes	SiO_2	Al_2O_3	F_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	P_2O_5	Mn_2O_3	TiO_2	Cl	Perteau feu
Minimum (%)	20.0	3.7	1.7	61	1.7	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0	0.2
Maximum (%)	24.3	7.1	5.7	68.1	4	1.4	0.7	1.3	0.6	1.2	0.4	0.1	1.1

I.5.5.4 Principe de fabrication du ciment :

Les matériaux naturels de carrière (calcaire, marne argile...) doivent d'abord être concassés puis broyés pour obtenir un mélange intime, homogène et bien dosé.

Ce broyage peut se faire à sec (procédé sec) ou en présence d'eau (procédé humide). Le mélange homogène ainsi réalisé passe dans un four rotatif ou se produit vers 1450 C en général, la « clinkérisation » terme habituellement utilisé pour caractériser l'évolution à haute température d'un système renfermant simultanément des phases solide et liquides (en fusion) ; c'est alors qu'ont lieu des réactions entre la chaux CaO et les oxydes acides SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ et que se forment les silicates, aluminates et alumine-ferrite de calcium, pour fixer les idées, précisons qu'un grand four moderne peut atteindre 200 m de longueur et 6 à 7 m de diamètre et produire près de 3000 t de clinker par 24 heures.

La cuisson terminée, le clinker qui se présente sous forme de grains plus ou moins arrondis de 0,5 à 3 cm de diamètre environ est refroidi rapidement pour éviter des transformations cristallines nuisibles.

Le clinker, additionné d'un peu de gypse (3 à 5%) avec éventuellement certains produits d'addition tels que laitier, cendres, pouzzolanes, est ensuite réduit en poudre fine dans un broyeur à boulets. La finesse de mouture est variable suivant les qualités recherchées ; elle peut varier de 2700 à 4500 cm²/g en surface spécifique Blaine ; sa valeur moyenne normale est de l'ordre de 3000 cm²/g.

Le ciment issu du broyage est conservé en silo un certain temps puis conditionné pour l'expédition en sacs, en containers ou en vrac (wagon, camion, péniche). Le tonnage total de la production française a atteint 25 millions de tonnes en 1968 [11].

I.5.5.5 Types de ciment, composition et désignation normalisée :

Les ciments courants conformes sont subdivisés en cinq types principaux :

- I Ciment Portland ;
- II Ciment Portland composé ;
- III Ciment de haut fourneau ;
- IV Ciment pouzzolanique ;
- V Ciment au laitier et aux cendres [13].

I.5.5.6 Propriétés des ciments:

a. La prise :

Le ciment est un liant hydraulique qui durcit au contact de l'eau et acquiert résistance et stabilité même sous l'eau.

L'association ciment-eau génère des réactions extrêmement complexes. Les silicates et aluminates qui se développent dans la phase hydratation, forment un gel cristallin qui marque le début du phénomène de (prise).

Le développement et la multiplication de ces microcristaux au cours de la phase de (durcissement), qui peut durer plusieurs mois, expliquent l'augmentation des propriétés mécaniques et font du ciment une véritable (roche composite).

Avant d'atteindre son stade final et durant son hydratation, la pâte de ciment passe par trois phases successives :

-la phase dormante : la pâte reste en apparence inchangée malgré le démarrage des premières réactions.

-le début et la fin de prise : après une à deux heures, pour la plupart des ciments, une augmentation brusque de la viscosité se produit, accompagnée d'un dégagement de chaleur - c'est le début de prise.

La fin de prise est effective lorsque la pâte cesse d'être déformable et devient un matériau rigide [13].

-le durcissement : hydratation du ciment se poursuit et la résistance mécanique continue à croître durant plusieurs mois. La résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle de contrôle.

b. Chaleur d'hydratation :

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier :

-La finesse de mouture: plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée

-La nature des constituants : les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires ;

-La nature minéralogique du clinker : plus la teneur en aluminat tricalcique (C3A) et silicate tricalcique (C3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte ;

-La température extérieure.

c. Retrait et gonflement :

La pâte de ciment se rétracte dans l'air sec (alors qu'au contraire elle gonfle dans l'eau), ce phénomène se poursuivant dans le temps et ceci pendant des durées d'autant plus longues que les pièces sont massives, c'est le retrait qui cause des fissures que l'on observe dans des Pièces en béton [13].

- Le retrait avant prise du essentiellement à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation et se traduit par l'apparition, à la surface du béton encore plastique, de grosses crevasses peu profondes, pouvant être refermées par talochage.
- Le retrait hydraulique qui découle de la contraction du béton ou du mortier en séchant.
- Le retrait thermique, qui est dû à la contraction du béton lors de son refroidissement, nombreux paramètres parmi lesquels :
 - la nature du ciment ;
 - le dosage en eau ;
 - la propreté des sables ;
 - la forme et la dimension des granulats ;

d. Surface spécifique (finesse Blaine) :

Elle permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique où surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment [14], Elle s'exprime en cm^2/g . Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2 800 et 3500 cm^2/g [13].

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse dès la réaction d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible à l'éventuellement et plus le retrait est important.

e. Les résistances mécaniques :

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit «Normal», à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm, la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment, elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPA.

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme [15] ; le sable utilisé est un sable appelé "sable normalisé", pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales [13].

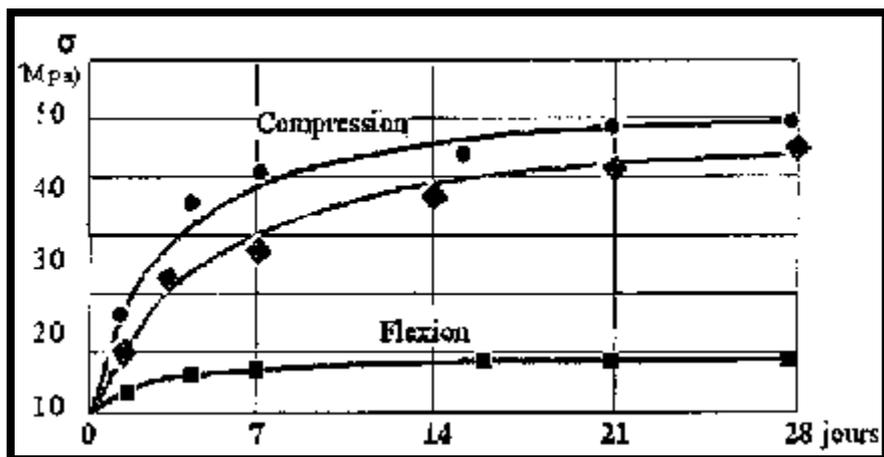


Figure. I.6 : Résistance du mortier normal en flexion et traction [13]

I.5.6 LES GRANULATS :

I.5.6.1 Généralités :

Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance, non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton, mais, selon leurs propriétés, ils affecteront la durabilité et les performances structurales du béton, en fait, on ne peut confectionner un béton résistant avec des granulats dont les propriétés sont médiocres, à l'origine on considérait les granulats comme des matériaux inertes dispersés dans la pâte de ciment, et cela pour des raisons purement économiques, on peut cependant juger les granulats comme des matériaux de construction liés en une masse cohérente par une pâte de ciment, en fait, les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et, dans certains cas, chimiques influencent les performances du béton.

Les granulats coûtent beaucoup moins cher que le ciment ; il devient alors économique d'en inclure la plus grande quantité possible dans un béton, contrairement au ciment, cependant, l'aspect économique n'est pas l'unique raison qui explique l'utilisation des granulats, car ces derniers confèrent au béton une plus grande stabilité sur le plan volumétrique et une meilleure durabilité que la pâte de ciment à elle seule [13].

I.5.6.2 Classification des granulats :

Les granulats utilisés pour le béton sont soit d'origine naturelle, soit artificiels.

a) Les granulats naturels :

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que le quartz et quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres [13].

➤ Granulats roulés et granulats de carrières :

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories qui doivent être conformes à la norme [16] (granulats pour bétons) :

➤ Les granulats alluvionnaires :

Dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires ;

➤ Les granulats de carrière :

Sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leurs donnent des formes angulaires. Une phase de pré criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage... la sélection de ce type de granulats devra donc être faite avec soin et après accord sur un échantillon.

b) Les granulats artificiels :**➤ Sous-produits industriels, concassés ou non :**

Plus employés, sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau, la masse volumique apparente est supérieure à 1,250 kg/m³ pour le laitier cristallisé concassé, 800 kg/m³ pour le granulat, ces granulats sont utilisés notamment dans les bétons routiers, les différentes caractéristiques des granulats de laitier et leurs spécifications font l'objet des normes [17].

➤ Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement :

IL s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux, carborundum...) ou granulats réfractaires.

➤ Granulats allégés par expansion ou frittage :

Ces granulats, très utilisés dans de nombreux pays comme l'URSS ou les États-Unis, n'ont pas eu en France le même développement, bien qu'ils aient des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressants, les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé norme [18], et le laitier expansé [18]. D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m³ selon le type et la granularité, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique, les gains de poids intéressants puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1, 200 et 2, 000kg/m³.

Ils sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé).

Très légers 20 à 100 kg/m³ ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600kg/m³, on voit donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrant, blocs de remplissage, dalles, ou rechargements sur planchers peu résistants.

I.5.6.3 Les caractéristiques des granulats :

a) Classe granulaire :

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles carrés dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres.

On appelle « tamisât » la partie des granulats qui est passée à travers le tamis et le « refus » la partie qui est restée sur le tamis.

b) Analyse granulométrique :

Série principale européenne [19] :

0.063 -0.125 -0.25 -0.5 -1 -2 -4 -8 16 -31.5...

Série française principale [20] :

0.08 -0.16 -0.315 -0.63 -1.25 -2 -5 -10 -20...

On distingue les familles suivantes [21] :

Fine : fraction granulaire qui passe au tamis de 0.063mm ;

Filler : Granulats dont la plupart des grains passent au tamis de 0.063 mm ;

Sable 0 / D : $d = 0$ et $D \leq 4$ mm ;

Gravier : mélange de sable et de gravillon $d = 0$ et $4 \leq D \leq 45$ mm ;

Gravillond / D : $d \geq 2$ mm et $4 \leq D \leq 63$ mm

c) Courbe granulométrique :

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamis sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique ; la suite des valeurs de D est une progression géométrique de raison, La forme des courbes granulométriques apporte les renseignements suivants :

- Les limites d et D du granulat en question.
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins ; exemple pour : sable fins, sable normal et sable grossier.
- La continuité ou la discontinuité de la granularité.

d) Forme des granulats et l'état de surface :**➤ La forme des granulats :**

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques :

La longueur L : distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat.

L'épaisseur E : distances minimales de deux plans parallèles tangents au granulat.

La grosseur G : dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat.

Le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation : $\frac{L}{E} > 1,58$

L'ancienne norme [22] spécifiait que la valeur du coefficient d'aplatissement doit être :

$$A \leq 30\%$$

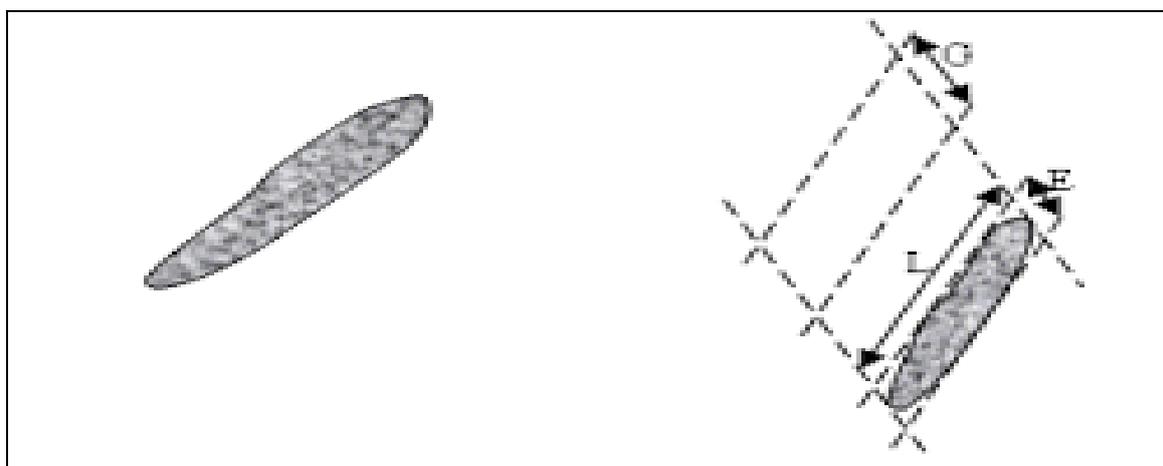


Figure. I.7 : Forme d'un granulat [13]

Dans les mêmes conditions $L \leq G \leq E$,

$$\text{l'indice d'allongement } \beta = \frac{G}{L} \leq 1$$

$$\text{l'indice d'aplatissement } \alpha = \frac{E}{G} \leq 1$$

On peut déterminer aussi :

La forme des granulats influence :

- La facilité de mise en œuvre et le compactage du béton.
- La compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.

➤ L'état de surface :

L'état de surface des granulats influence sur la compacité du mélange, l'adhérence du granulats à la pâte de ciment et sur la maniabilité du béton frais [12].

e) Module de finesse :

Le module de finesse (MF) du sable est défini dans la norme comme la somme des pourcentages cumulatifs retenus sur une série de tamis normalisés donnée, divisée par 100, Il indique la finesse d'un sable : plus le module de finesse est élevé, plus le sable est grossier.

B= trop fin Mode, finesse 1,80 à 2,20 (augmentation de dosage en eau alors la mise en œuvre facile mais la résistance du béton chute) ; A= préférentiel Mode, finesse 2,20 à 2,80 (la mise en œuvre facile et la résistance élevée) ;

C = trop grossier Mode, finesse 2,80 à 3,20 (Manque ouvrabilité donc la mise en œuvre est difficile, une bonne résistance mécanique et risque de ségrégation limité) [13].

I.5.7 L'eau de gâchage :

C'est une eau incorporée au mélange liant et granulats afin d'enclencher sa prise et conférer au béton sa plasticité, donc son ouvrabilité. La qualité de l'eau de gâchage doit répondre à la norme.

Toutefois, la qualité de l'eau joue le rôle primordial sur la qualité finale, les impuretés contenues dans l'eau peuvent influencer la prise du ciment ou la résistance du béton, elles peuvent aussi provoquer des taches à la surface du béton ou même favoriser la corrosion des armatures, pour ces raisons, la qualité de l'eau de gâchage ou celle utilisée pour le murissement doit être contrôlée, une distinction doit être faite entre la qualité de l'eau de gâchage et les eaux agressives susceptibles d'attaquer le béton, certaines impuretés trouvées dans l'eau qui sont agressives pour le béton durci peuvent le protéger lorsqu'elles se retrouvent dans l'eau de gâchage.

L'eau de gâchage ne devrait pas contenir de quantité excessive de matières organiques ou inorganiques, cependant, il n'existe pas de norme en ce qui concerne les limites autorisées. En effet, à ce jour, puisque les limites supérieures ne sont pas vraiment définies, une restriction sur les qualités de substances admises pourrait avoir des conséquences économiques très coûteuses.

Dans la plus part des projets, la seule spécification, quant à la qualité de l'eau, est qu'elle doit être potable, l'influence de ces matières inorganique sur le béton est certainement négligeable, généralement, la qualité de l'eau potable est suffisante pour la fabrication du béton, mais il existe quelques exceptions, par exemple dans certaines régions, l'eau potable est salée et peut contenir une quantité excessive de chlorures, de même, certaines eaux minérales peuvent contenir des quantités non négligeables de carbonates ou de bicarbonates alcalins, ce qui peut favoriser la réaction alcali-silice [13].

I.6 Conclusion :

Depuis longtemps, la relation entre la composition du béton et ces propriétés rhéologiques et mécaniques a intéressé les chercheurs. Ces dernières décennies, les travaux de recherche ont orienté vers les effets néfastes des excès de l'eau de gâchage, pour la résistance et la durabilité des bétons ainsi que la recherche d'un mélange de très haute compacité, lors de la composition du béton, ces deux voies de recherche sont abouties à des résultats très intéressants, et à la découverte des nouveaux bétons qui ont des performances très élevées et surtout au niveau de la résistance et de la durabilité, ce sont les Bétons à Hautes Performances (BHP) et à très Hautes Performances (BTHP).