

CHAPITRE 3

SQUELETTE GRANULAIRE

3.1 INTRODUCTION

Les matériaux utilisés pour la confection des bétons (granulats, liant, adjuvants) doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage.

L'ensemble des matériaux tels que le sable, les graviers, les gravillons et les pierres concassées qui constituent le squelette du béton sont dénommés les granulats.

Ces granulats étant d'origine diverse (naturel, artificiel) où provenant de sous produits industriels. Il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais au laboratoire.

Certaines propriétés des granulats sont directement liées aux caractéristiques intrinsèques des roches originales (masse volumique réelle, degré d'absorption, la résistance à la fragmentation). D'autres caractéristiques dérivent du mode de l'élaboration des granulats (extraction et concassage). Il s'agit ici des paramètres liés à la distribution dimensionnelle des grains (granulométrie). A ces paramètres s'ajoutent des caractéristiques liées à l'angularité et à la forme du grain, sa propreté et sa réactivité chimique.

Pour les granulats destinés aux bétons, seuls ces caractéristiques sont recherchées :

- A la mise en œuvre : granulométrie, angularité et la teneur en eau.
- En service : l'affinité au ciments, la résistance mécanique, la gélivité, l'alcali réaction et la teneur en chlorures et en sulfates.

Généralement les granulats utilisés pour la réalisation des mortiers et des bétons se subdivisent en deux classes :

- Les granulats denses (lourds).
- Les granulats légers.

3.2 LES GRANULATS DENSES

Se sont les granulats utilisés pour obtenir des bétons de masse volumique de l'ordre de 2500 kg/m^3 . cette classe inclue les granulats naturels (le sable, le gravier, la pierre concassée) et les granulats artificiels (laitier cristallisé et briques concassées).

3.2.1 Sables et graviers naturels

Les sables et les graviers naturels sont des matériaux provenant de l'érosion des roches où de leur concassage, composés de minéraux résistants.

La plupart des sables et graviers naturels destinés à être incorporés dans les mortiers et les bétons sont obtenus des bords des rivières (se sont généralement des granulats roulés), le sable broyé provenant du broyage des roches éruptives et métamorphiques non altérées, doit avoir des grains à peu près cubiques, et la teneur en fines doit être limitée, les autres sources du sable sont :

- La mer (se sable doit être bien lavé afin d'éliminer les sels y contenu).
- Les dunes : cette variété de sable et d'une qualité médiocre du fait des éléments très fins qu'il contient.

La composition granulométrique du sable et sa teneur en impuretés poussiéreuses, vaseuses, argileuses et organiques influencent beaucoup la qualité du béton.

La quantité des ces impuretés ne doit pas dépasser 3 % dans les sables naturels et 5 % dans les sables broyés.

L'argile est l'impureté la plus nuisible dans le sable naturel, elle enrobe les grains, se qui empêche leur adhésion à la pierre de ciment en abaissant ainsi la résistance du béton.

3.2.1.1 Composition minéralogique

a. Le sable

Le sable est une masse pulvérulente de grains minéraux de (0,14 à 5 mm) de dimension. Les particules sont généralement composées d'un seul minéral : le quartz, d'autres minéraux existent mais avec de faibles quantités (les feldspaths, les micas, et les grains de minerai de fer). (Komar,1980)

Les sables de quartz sont les plus utilisés pour la confection des bétons lourds.

b. Le gravier

Le gravier est une accumulation meuble de fragments de roches inégalement roulées dont les dimensions vont de 5 à 70 mm. Composé d'une variété de minéraux (hétérogène) tels que : le quartz, quartzite, granite qui sont les constituants communs des graviers.

3.2.2 Les granulats concassés

Se sont un mélange de fragments anguleux de pierres de dimensions allant de 5 à 70 mm obtenus par le broyage de différentes roches :

- Les roches sédimentaires (siliceuses où calcaires).
- Les roches métamorphiques (quartzites, marbres, ...)
- Les roches éruptives (granites, basaltes et porphyres ...).

On utilise fréquemment les granulats de nature minéralogique suivante : siliceuse, calcaire et granitique.

3.2.3 Le laitier cristallisé

Le terme laitier du haut fourneau est limité seulement aux laitiers formés par la production du fer, et ne couvre pas les laitiers formés lors de la production des métaux non ferreux.

L'utilisation du laitier cristallisé comme granulats de béton est conditionné principalement par sa stabilité, il doit être en outre dense et doit avoir une texture cristalline plutôt que vitreuse.

Ces caractéristiques dépendent fortement de la composition chimique du laitier et de son mode de refroidissement.

La coulée de laitier, encore liquide est directement déversée dans des fosses adjacentes au haut fourneau, où encore transportée par wagons dans les aires de refroidissement spécialement aménagées au dehors de l'usine.

Le laitier se refroidit lentement à l'air libre par couches d'une dizaine de centimètres d'épaisseur . lorsque la solidification en masse est réalisée (température de 400°C à 500°C) on arrose la fosse avec de l'eau froide pour abaisser la température du laitier à 150°C environ. Cet arrosage présente deux avantages :

1. Il permet de réduire quelque peu le séjour des matériaux dans les fosses en accélérant leur refroidissement.
2. Il provoque de nombreuses fissures dans la masse du laitier, ce qui facilite son extraction ultérieure.

Toute fois, il ne convient pas de faire descendre la température du laitier au dessus de 90°C lors de l'arrosage, afin que le laitier soit assez sec pour se prêter commodément à des opérations de broyage et de tamisage (Aïtcin, 1966).

Selon (P. Huttemani, 1955) les laitiers dont la température T de coulée est relativement basse $1350^{\circ}\text{C} < T < 1425^{\circ}\text{C}$ et dont l'indice de basicité est compris entre 1.2 et 1.3 se prêtent particulièrement bien à ce type de refroidissement.

Le laitier cristallisé obtenu, présente une forte densité apparente et une bonne résistance au choc et à l'usure.

Les laitiers coulés à plus basse température, une fois solidifiés, sont souvent poreux, car leur grande viscosité empêche les gaz dissous de se dégager au cours du refroidissement.

3.2.3.1 Composition minéralogique du laitier cristallisé

La majorité des laitiers sont stables, mais dans certaines conditions où le laitier est à faible teneur en Al_2O_3 , il est considéré instable. Ceci est dû au passage des silicates bicalciques ($2CaO.SiO_2$) de la forme β à la forme γ accompagné par une augmentation du volume, se qui provoque une autodestruction du laitier (c'est le phénomène d'effusement). (Léa,1971) et (Venuat, 1989).

Afin d'utiliser le laitier cristallisé en guise de granulats il faut respecter les deux conditions suivantes :

$$(a): CaO + 0,8MgO \leq 1,28SiO_2 + 0,4Al_2O_3 + 1,75S.$$

$$(b): CaO \leq 0,9SiO_2 + 0,6Al_2O_3 + 1,75S.$$

Selon F. Hubbard la teneur en soufre qui peut atteindre 3 % ne réagit pas chimiquement avec les fers à béton.

3.2.4 Les briques concassées

L'incorporation des briques concassées dans le béton en tant que granulats, donne naissance à des bétons un peu légers (2080 kg/m^3 à 2240 kg/m^3). Selon La porosité des granulats de briques. Dans le cas des poids réduits, la résistance mécanique sera affectée.

L'utilisation des briques concassées et conditionnée par leurs teneur en SO_3 qu'elle ne doit pas dépasser 1 %.

3.3 LES GRANULATS LEGERS

Se sont les granulats utilisés pour obtenir des bétons de masse volumique ne dépassant pas 1600 kg/m^3 (sans affecter la résistance). Au cas où cette masse atteindra 640 kg/m^3 le béton ainsi réalisé est destiné à la réalisation des éléments non chargés.

Ce type de granulats se subdivise en : granulats naturels légers et granulats artificiels légers.

3.3.1 Les granulats naturels légers

Ce groupe contient seulement, la pierre ponce qui est une pierre d'origine volcanique, formée des laves fondues. C'est une matière vitreuse présentant des cavités ; sa couleur varie du blanc au jaune.

Le béton réalisé à partir de la pierre ponce présente une masse volumique de l'ordre de (640 kg/m^3 à 1280 kg/m^3).

3.3.2.2 Les granulats artificiels légers

Il s'agit ici, principalement des granulats d'argile, de schiste et du laitier expansé. La pâte constituant la matière première est homogénéisée avec une teneur bien déterminée d'eau.

Les nodules fabriquées à partir de cette pâte sont portées rapidement à haute température (environ 1300°C) pour former des grains durs, à l'intérieur desquels une quantité importante de bulles de gaz sont enfermées. Leur granularité est souvent peu étalée et la forme des grains est plus arrondie que celles des granulats naturels.

Leurs masse volumique et de l'ordre de 1000 kg/m^3 à l'état sec (rappelons que la masse volumique des granulats naturels est environ de 2600 kg/m^3 environ).

3.4 PROPRIETES ESSENTIELLES DES GRANULATS NATURELS :

Les granulats sont soit obtenus directement par criblage, où les grains se présentent alors sous une forme arrondie, soit issus d'un concassage, où les grains ainsi obtenus présentent des arrêtes.

Le choix des granulats est indispensable parce qu'il représentent 75 % du volume de béton, d'où la qualité dépend fortement de la qualité des granulats, leurs propriétés jouent un rôle majeur dans les caractéristiques du béton soit :

- au niveau de sa mise en œuvre :
la granulométrie, l'angularité et la teneur en eau.
- au niveau du comportement mécanique et les performances à long terme :
l'affinité au ciments, résistance mécanique, gelivité, alcali réaction potentielle et la teneur en chlorures (Chanvillard, 1999).

3.4.1 La granulométrie des granulats fins et grossiers

La dimension des granulats utilisés dans le béton passe de plusieurs dizaines de millimètres à moins d'un dixième de millimètre. Pour tous les bétons, on mélange des éléments de diverses grosseurs, la distribution de la grosseur des éléments s'appelle granulométrie.

Il existe six classes granulaires principales caractérisés par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés :

- Les fillers 0/D avec $D < 2$ mm et les passants à 0,063 mm ≥ 70 %.
- Les sables 0/D avec $D < 6,3$ mm ($D < 4$ pour les sables à béton).
- Gravrillons d/D avec $d > 1$ mm et $D < 31,5$ mm.
- Graves 0/D avec $6,3 < D < 80$ mm.
- Ballast $d > 25$ et $D > 50$ mm.

Les passants à d et les refus à D doivent lors de l'analyse granulométrique respecter des limites, qui sont présentées dans plusieurs ouvrages.

3.4.2 La finesse des sables

Il existe une grande variabilité entre les différents sables, qui affecte de façon majeure les performances du béton. Pour juger globalement la granulométrie d'un sable, on calcule un paramètre à partir de l'analyse granulométrique appelé : module de finesse du sable.

(Popovics, 1967) a montré que le module de finesse correspond à la moyenne logarithmique de la distribution granulométrique.

Le module de finesse ne peut pas être utilisé seul pour décrire la granulométrie d'un granulat, mais il est valable pour indiquer des petites variations dans le cas de granulats élaborés à partir d'une même source. (Neville, 2000).

Le module de finesse élevé caractérise un sable grossier et à l'inverse un module faible caractérise un sable fin.

3.4.3 Texture et forme des granulats

Outre les caractéristiques pétrographiques des granulats, les caractéristiques d'aspect sont également importantes plus particulièrement la forme des grains et la texture de leurs surface.

La tableau 3.1 présente les différentes formes de granulats selon la norme BS812.

Tableau 3.1 : différentes formes de granulats (Neville, 2000).

Classification	Description	Exemples
Arrondie	Complètement usée par l'eau ou par l'attrition	Gravier de rivière ou de plage, sable de désert ou de dune.
Irrégulière	Naturellement irrégulière ou partiellement usée avec des angles arrondis	Autres graviers : Silex
Plate	Matériau dont l'épaisseur est faible par rapport au deux autres dimensions.	Roche laminée.
Angulaire	Bords très bien définis aux intersections de surfaces planes rugueuses.	Roches concassées de tout type, laitier concassé
Allongée	Matériau habituellement angulaire dont la longueur est beaucoup plus importante que les deux autres dimensions.	-
Plate et allongée	Matériau beaucoup plus long que large et plus large qu'épais.	-

En ce qui concerne les gros granulats, il est préférable de rechercher une forme régulière des éléments. Les granulats plats exercent une influence défavorable sur la durabilité des bétons.

La texture de la surface de granulats affecte sa liaison avec la pâte de ciment, et influence aussi la demande en eau du mélange (en particulier dans le cas des granulats fins).

La texture de la surface dépend de la dureté, de la dimension des grains et de la caractéristique des pores de la roche mère, autant que les forces agissant sur la roche pour produire les surfaces lisses ou rugueuses du granulat.

Le tableau 3.2 résume la texture des surfaces des granulats :

Tableau 3.2 : différentes textures des surfaces des granulats. (Neville, 2000).

Texture de la surface	Caractéristiques	Exemples
Vitreuse lisse	Fracture conchoïdale.	Silex noir, laitier vitreux
Lisse	Roche usée par l'eau où adoucie par la fracture où le laminage, où roche micro grenue.	– gravier – ardoise-marbre – certain cryolites.
Granuleuse	Fracture montrant des grains arrondis plus au moins uniformes.	Grés, oolithe
Rugueuse	Fracture grossière d'une roche à grains fins où moyens, ne contenant pas de particules cristallines visibles.	Basalte – felsite – calcaire – porphyre .
Cristalline	Contenant très visiblement des particules cristallines.	Granite – gabro gneiss
Alvéolaire	Avec des pores et des cavités visibles.	Brique – pierre ponce – laitier expansé – clinker – argile expansée.

La forme et la texture de surface des granulats influencent considérablement la résistance des bétons, la résistance à la flexion est plus affectée que la résistance à la compression et l'incidence de la forme et de la texture est particulièrement significative dans le cas des bétons à haute résistance. (Kaplan, 1958)

Une texture plus rugueuse entraînera peut être une forte adhérence, plus grande entre le granulat et la matrice de ciment.

En général, la texture et la forme des gros granulats, ont un effet appréciable sur la maniabilité des bétons.

3.4.4 Liaison des granulats

la liaison entre les granulats et la pâte de ciment est un facteur important dans la résistance des bétons. en particulier la résistance à la flexion.

La liaison est engendrée en partie par l'imbrication des granulats et de la pâte de ciment hydratée due à la rugosité de la surface des granulats.

Une surface plus rugueuse, comme celle des granulats concassées génère une meilleure liaison, de même les granulats moins durs, plus poreux et ayant une minéralogie hétérogène présentent eux aussi une meilleure liaison

Les liaisons chimiques peuvent être existés dans le cas des calcaires et des dolomies et éventuellement des granulats siliceux. (Penkala et Krzywoblacka, 1972).

3.4.5 La résistance des granulats

La résistance inadéquate des granulats limite leur utilisation, puisque leurs propriétés physiques influent sur la résistance des bétons.

Il est possible que l'influence des granulats sur la résistance des bétons ne soit seulement due à leur résistances mécaniques, mais aussi, à un certain degré à leurs absorption et à leurs caractéristiques de liaison.

En général, la résistance et l'élasticité des granulats dépendent de leur composition minéralogique, de leur texture et de leur structure. (Neville, 2000).

3.4.6 La propreté des granulats

les granulats peuvent contenir en quantité limitée (inférieur à 0,1 %) des déchets de bois, débris végétaux ...etc. Par contre il ne doivent pas contenir d'hydrocarbures où de matière organique. Une attention particulière est prise dans le cas du sable, il s'agit de sa teneur en fines, essentiellement argileuses.

3.4.7 La densité des granulats

Dans la plus part des bétons, les granulats incorporés sont du type calcaire, silico calcaire où des silex ; ils représentent alors des densités de l'ordre de 2,5 à 2,7 selon leur niveau de porosité.

Dans le cas des granulats légers, la densité est de l'ordre de 0,9 à 1 pour les argiles expansées et de 0,7 à 1.0 pour les schistes expansés.

3.4.8 Porosité et absorption des granulats

La porosité des granulats, leur imperméabilité et leur absorption influencent certaines de leurs propriétés ; leur liaison avec la pâte de ciment hydratée, leur stabilité chimique et la résistance du béton au gel et dégel.

La taille des pores des granulats est très variable, certains pores sont complètement à l'intérieur du granulat, d'autres débouchent à la surface.

L'absorption de l'eau par les granulats est déterminée en mesurant l'augmentation de la masse d'un échantillon sec après avoir été immergé dans l'eau .

Le gravier généralement une absorption plus élevée que la roche concassée de même type pétrographique. Parce que sa surface est plus poreuse et absorbante en raison de son altération. (Neville, 2000).

Les pores à la surface des granulats affectent leur liaison avec la pâte de ciment ce qui influence la résistance du béton.

3.4.9 la réaction alcali – granulats

Depuis quelques années, un nombre croissant de réactions chimiques nocives entre les granulats et la pâte de ciment hydratée ont été observées. Il s'agit en particulier :

Des réactions alcali silice, et des réactions alcali carbonate.

3.4.9.1 Réaction alcali silice

La réaction la plus commune est la réaction entre les phases siliceuses réactives des granulats et les alcalis du ciment. Les formes réactives de la silice sont l'opale (amorphe), la calcédoine, et la tridynite (cristalline).

De façon simplifiée, l'évolution de la réaction alcali silice est détaillée par (Merz, 2002) et (Sprumget, 1998) comme suit :

- Concentration des alcalis dans la solution interstitielle lors de la progression de l'hydratation.
- Les ions OH^- , Na^+ , K^+ migrent de l'eau interstitielle vers l'acide silicique (SiO_2) réactif des granulats.
- Formation d'un gel de silice alcalin susceptible de se gonfler.
- Augmentation de la pression intérieure due à la poursuite de la réaction et l'absorption de l'eau.
- Fissuration, lorsque la résistance à la traction des granulats est dépassée et faible formation de gel.
- Désagrégation des granulats depuis l'intérieur et forte formation de gel.

3.4.9.2 Réaction alcali carbonate

Ces réactions sont observées principalement dans les granulats composés de dolomite ainsi que de calcaire à grains fins avec inclusions de minéraux argileux. D'une façon simplifiée les réactions peuvent être formulées comme suit :

- (1) dolomite + hydroxyde alcalin \rightarrow calcite + brucite (oxyde de magnésium) +
carbonate alcalin.
- (2) carbonate alcalin + hydroxyde de calcium \rightarrow carbonate alcalin + hydroxyde
alcalin.

Il s'agit d'une dedolomitisation, liée à une diminution du volume. Des gonflements se produisent parce que lors de la transformation de la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) où $\text{Mg}(\text{OH})_2$, la porosité augmente. De l'humidité peut ainsi arriver jusqu'aux inclusions d'argiles lesquelles gonflent.

Ces carbonates alcalins (Na_2CO_3 , K_2CO_3) libérés réagissent avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$ du ciment, ce qui libère des hydroxydes alcalins (NaOH , KOH).

3.4.9.3 Facteurs d'influence pour les réactions alcali granulats (RAG)

De nombreux facteurs exercent de manière très diverse une influence sur les (RAG) :

- la teneur en granulats réactifs (ainsi que le type et la taille de ces granulats).
- La teneur en alcalins du béton et la composition de solution interstitielle.
- Les propriétés du béton.
- Un taux d'humidité élevé en béton.
- Une hausse température.
- Les charges alcalines externes (dues aux eaux souterraines, aux eaux sulfatées, ...).

Remarque :

Les cendres volantes et les laitiers sont certes alcalins mais en comparaison avec les ciments portland ils fixent proportionnellement d'avantage d'alcalis dans les produits d'hydratation.

3.5. PROPRIETES ESSENTIELLES DES GRANULATS ARTIFICIELS

le laitier du haut fourneau cristallisé par refroidissement lent, puis concassé est un granulats artificiel de couleur grise foncée, tirant parfois sur le vert (couleur qui dénote en général une teneur en soufre supérieure à 3 %) est un agrégat dur qui a été homologué par L'AFNOR (P18.302, septembre, 1960).

3.5.1 Densité du laitier cristallisé

le laitier cristallisé se présente sous forme d'une roche grisâtre, micro poreuse. Sa masse volumique absolue va de 2.85 à 3.10 g/cm³ (couramment 2.9 g/cm³). La masse volumique propre du matériau varie de 1.8 à 2.80 g/cm³ (en moyenne 2.25 g/cm³). En vrac, après concassage la masse volumique oscille entre 1.2 et 1.4 g/cm³.

3.5.2 Propriétés physiques du laitier cristallisé

Le laitier cristallisé se situe au dessus de la moyenne des granulats naturels (du point de vue caractéristiques chimiques et physiques) :

- Les conditions d'élaboration à hautes températures (1300°C à 1500°C) du laitier cristallisé, en font un matériau propre et d'une excellente tenue aux températures élevées.
- Un pouvoir élevé d'isolation thermique et phonique double que celui des granulats naturels.
- Une insensibilité au gel quasi-totale, ses micro pores sont du type fermés, donc n'absorbent pas l'eau par capillarité.
- Une rugosité de surface élevée, qui se conserve même en cas d'une usure de cette surface.

3.5.3 Propriétés mécaniques du laitier cristallisé

Le laitier cristallisé se situe dans la bonne moyenne des granulats naturels du point de vue caractéristiques mécaniques :

- Une fois concassé, son angle de frottement interne est important, parce qu'il est de bonne angularité.
- Un coefficient d'usure – choc (coefficient los Angeles) varie de 20 à 30.
- Un coefficient de polissage accéléré va de 0,50 à 0,55.

(a titre comparatif, pour les roches naturels, le coefficient de polissage accéléré va de 0,40 à 0,60).

3.5.4 l'influence des granulats du laitier cristallisé sur le béton

Grâce aux caractéristiques physico –chimiques du laitier cristallisé, son angularité, sa propreté, le granulat du laitier assure aux bétons et aux couches de chaussées des résistances en traction élevées et une très bonne tenue en fatigue aux sollicitations alternées.

Les propriétés du laitier assurent en outre aux bétons d'intéressants coefficients d'isolation thermique et acoustique.

La présence des sulfluides de calcium dans le laitier frais, ne présente pas de risque sur le béton si le contenu en sulfure ne dépasse pas 2 %.(Léa, 1971).

3.5.5 Utilisations industrielles du laitier cristallisé

L'utilisation du laitier cristallisé est très répandue dans la construction des soubassements, des routes et aéroports ainsi que dans la construction des voies de chemin de fer où il est utilisé comme ballast. Son emploi en tant qu'agrégat à béton est assez peu répandu en France .

Il n'en est pas de même au USA et dans certains pays européens : Allemagne, Belgique, Angleterre où de nombreux ouvrages d'art ont été réalisés en béton de laitier concassé. (Hubbard, 1955) et (Manche, 1955).

3.6 INFLUENCE DES PROPRIETES DES GROS GRANULATS SUR LA RESISTANCE DU BETON

La fissuration verticale qui se produit dans une éprouvette soumise à une contrainte uni axiale de compression apparaît lorsque la charge appliquée atteint 50 à 75 % de la charge de rupture. la contrainte à partir de laquelle se développent les fissures dépend en grande partie des propriétés du gros granulat, elle est plus faible lorsque les granulats présentent une surface lisse contrairement à ce que l'on obtient avec des granulats concassés de forme angulaire et de surface rugueuse , sans doute parce que l'adhérence est influencée par les propriétés de surface . (Jones et Kaplan, 1957).

L'influence du type de gros granulat sur la résistance du béton est en fonction du rapport eau/ciment, cette influence diminue avec l'augmentation de rapport eau/ciment. Au delà de 0.65, on ne remarque aucune différence de résistance d'un béton à granulat concassé où roulé.

La figure 3.1 représente la relation entre la résistance à la compression et l'âge des bétons confectionnés avec différents granulats avec $E/C=0,50$.

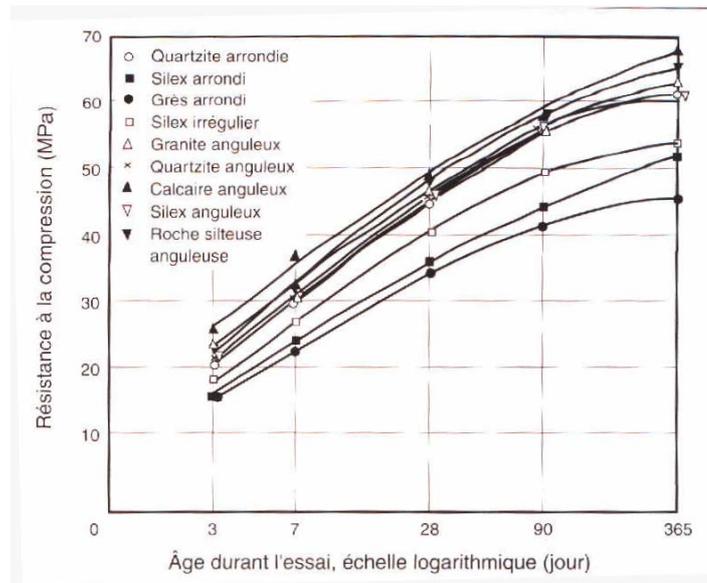


Figure 3.1 : la relation entre la résistance en compression et l'âge des bétons à base de différents granulats. (Neville, 2000).

3.7 ORIENTATION DE L'ETUDE

Le béton est un matériau très en demande et son utilisation ne cessera de croître au cours des années à venir. Aujourd'hui des milliers de chercheurs travaillent sans relâche dans tous les pays du monde, afin d'étudier ces matériaux pour mieux les connaître et pour les améliorer encore.

Toutefois la fabrication du ciment et du béton consomme une quantité considérable d'énergie, engendre l'émission d'importantes quantités de gaz à effet de serre et contribue à l'épuisement progressif des ressources naturelles.

Afin d'assurer la croissance de ce matériau de construction indispensable, l'approche du développement durable doit être intégrée à la production du ciment et du béton, ce qui permettra d'atteindre un équilibre entre les contraintes de protection de l'environnement et les considérations économiques et sociales.

Dans cette optique, l'étude suivante propose à produire un béton à grande durabilité, à un coût compétitif et avec un impact environnemental minimum, elle consiste à optimiser l'utilisation des ajouts cimentaires dont l'effet est très bénéfique et d'utiliser les résidus industriels afin de remplacer d'une part le ciment, et les granulats d'une autre part pour la confection des bétons.

Cette étude a pour objectifs :

- D'étudier le laitier granulé et cristallisé du haut fourneau du combinat métallurgique d'El Hadjar (Les propriétés chimiques et physiques).

- D'élaborer un liant au laitier sans clinker, en utilisant des activants de différents natures (activation alcaline).
- De proposer des méthodes efficaces pour améliorer certaines propriétés mécaniques du liant, afin d'élargir les domaines de leur applications.
- De mettre en valeur l'influence de la nature des granulats à incorporer dans le béton (naturels ou artificiels) sur le comportement du béton au laitier activé (béton basique).
- D'encourager les utilisateurs de matériaux à utiliser les granulats artificiels (le laitier cristallisé) pour la confection des bétons ordinaires.