

Chapitre 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction

Le béton est un matériau de construction composite moderne, simple d'emploi et extrêmement répandu. Il se compose d'une matrice cimentaire (pâte de ciment hydraté) qui amalgame les inclusions rigides (graviers et sable). Un béton contient environ (en volume) :

eau : entre 14 et 22 % ; ciment : entre 7 et 14 % ; granulats (dont sable) : entre 60 et 78 %.

Pour différents bétons ayant un même dosage en ciment mais avec un rapport eau/ciment différent, on remarque que ses propriétés s'en retrouvent affectées. En effet, selon la combinaison des trois composants majeurs du béton, le matériau obtenu aura différentes propriétés (rhéologie, propriétés mécaniques, perméabilité...). L'ajout d'additions et d'adjuvants (cendres volantes, fumées de silice, superplastifiants...) permet de modifier les propriétés souhaitées

Le sable est l'élément inerte essentiel entrant dans la composition du béton. Son utilisation permet d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton. Les sables utilisés dans le béton, sont soit du sable naturel de rivière ou fabriqué issu des pierres concassées. En général, des études ont révélé que les sables concassés présentent des taux très élevés de fillers sous forme de limon, argile, ou poussière de calcaire. Il est évident que ces matériaux, s'ils existent en quantités excessives, peuvent avoir des effets défavorables sur les propriétés du béton frais et durci. À l'état frais, à cause de leur importante surface spécifique, ces matériaux demandent beaucoup d'eau pour produire un béton avec la consistance désirée. Cette demande élevée en eau aura un impact direct sur la résistance et le retrait de dessiccation du béton à l'état durci. En outre, la couche d'argile sur la surface d'agrégat va gêner l'adhérence entre la pâte du ciment et l'agrégat, ce qui dégrade la résistance et la durabilité du béton.

La demande sans cesse croissante sur les granulats a provoqué un épuisement rapide des sablières et une exploitation anarchique des sables de mer causant ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages en ayant des répercussions directes sur les ressources naturelles, l'érosion des berges d'oued et l'avancée de mer. Les carrières génèrent des millions de tonnes de sable comme un sous-produit. Ce sable est rarement utilisé dans la confection des mortiers et bétons en raison de leurs taux élevés en fines qui varie de 8 à 30 % et provoquant ainsi un problème de stockage au niveau des carrières. Plusieurs pays dans le monde tels que la France, l'Espagne, l'Angleterre, l'Argentine et le Maroc ont le même problème dans certaines régions, et par conséquent des programmes de recherches ont été menés pour les

utilisations des sables de carrières dans la confection des mortiers et bétons. Ces études ont conduit ces pays à réviser leurs normes en particulier le taux de fines admissibles.

Dans ce chapitre, on tentera de faire une synthèse bibliographique sur les constituants du béton hydraulique, en particulier le sable de concassage, en présentant certains résultats de recherches, en Algérie et à l'étranger, relatifs à la valorisation de ce sable comme substitution au sable alluvionnaire dans la fabrication du béton.

1.2. LES BETONS

1.2..1. Pâte de ciment

D'après la norme NF P 15-301 de 1994, « le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau ».

La pâte de ciment, est donc le « liant » entre les différents constituants du matériau béton, son étude est donc importante pour comprendre certaines propriétés du matériau final. Elle est constituée d'anhydres, d'hydrates (produits de l'hydratation du ciment entre le ciment et l'eau) et de pores (partiellement saturés en eau). Donc le ciment est un liant minéral obtenu par décarbonatation d'un calcaire et décomposition d'une argile à une température avoisinant les 1450 °C. Le clinker, issu de ce procédé, peut avoir des compositions variables mais les oxydes principaux sont toujours les mêmes : la chaux (CaO), la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et la ferrite (Fe₂O₃). Le clinker est un matériau de base auquel on peut trouver nombre d'ajouts pour la préparation des ciments, qui sont disponibles sur le marché. On peut ainsi ajouter, des cendres volantes, des laitiers de hauts fourneaux, ou encore des fumées de silice. On modifie ainsi la composition du ciment et par voie de conséquence ses propriétés. Le clinker, broyé sous forme d'une poudre fine souvent d'une couleur grise, en contact avec l'eau li s'hydrate et forme des minéraux hydratés très stables. Les principaux composés du ciment portland sont :

Les silicates tricalciques (alite) : 3CaO.SiO ₂	[C ₃ S]
Les silicates bicalciques (bélite) : 2CaO.SiO ₂	[C ₂ S]
Les aluminates tricalciques : 3CaO.Al ₂ O ₃	[C ₃ A]
Les aluminoferrites tétracalciques : 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	[C ₄ AF]
Autres : (sulfates, alcalins, impuretés,...)	

Les silicates de calcium C₃S et C₂S à peu près 75 % de la masse du ciment. Les caractéristiques granulaires du ciment sont exprimées par sa granulométrie et sa finesse de mouture. Cette finesse de mouture appelée aussi surface spécifique de Blaine peut atteindre 4000 cm²/g et plus pour les ciment à forte résistance au jeune âge. [1,15, 3]

1.2.2. L'hydratation du ciment Portland

Un ciment est constitué de phases anhydres qui vont s'hydrater en présence d'eau. C'est l'ensemble de ces réactions que l'on définit comme l'hydratation du ciment. Le clinker, constitutif de l'essentiel de ce que l'on nomme un ciment Portland, peut être pris en exemple pour décrire le processus d'hydratation. Dans le cas de ciments dits « mélangés », les réactions sont identiques, seules vont changer les proportions ou certaines stœchiométries des hydrates formés.

Au contact de l'eau, les phases anhydres du clinker, notamment les silicates tricalciques (C_3S) et bicalciques (C_2S), se dispersent en solution aqueuse pour donner différents ions tels que Ca^{2+} , OH^- , $SiO_4H_2^{2+}$, $SiO_4H_3^-$, $SiO_7H_4^{2+}$. Une fois que leur seuil de solubilité est atteint, ces anhydres se combinent en molécules hydratées par précipitation puis nucléation. Ce sont des réactions exothermiques car elles mettent en jeu beaucoup d'énergie. La pâte fraîche obtenue se présente comme un système dispersé de grains de silicates [6, 7]. Les équations (1) et (2) représentent les réactions chimiques produites durant l'hydratation et donnant les composés hydratés du matériau, selon [8] :



Les hydrates principalement formés du ciment Portland sont les silicates de calcium hydratés de la forme $C_3S_2H_3$, notés « C-S-H » ou appelé gel de C-S-H dû à son faible degré de cristallisation. Ces C-S-H sont à l'origine du pouvoir adhérent de la pâte de ciment et améliorent sa résistance. En effet, Les C-S-H présentent une grande surface spécifique et une porosité d'environ 28 % [9],[7].

Les surfaces des C-S-H sont de plus très attractives. Elles adhèrent entre elles et avec les autres éléments constitutifs du béton (sable, granulats, portlandite...), ce qui explique le rôle de « colle » du ciment. En plus de ce gel, la pâte de ciment contient des cristaux grossiers comme la Portlandite $Ca(OH)_2$ symbolisée « CH » ayant peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique et diminuant la durabilité du béton par sa solubilité dans l'eau. On cherche donc à limiter cette Portlandite (en ajoutant par exemple de la fumée de silice).

On trouve également les aluminates (ou sulfo-aluminates de calcium hydratés) qui cristallise en plaquettes hexagonales empilées entre les grains de ciment hydratés. La séquence de formation des sulfo-aluminates comprend l'apparition du trisulfo-aluminate de calcium ou étringite.

La proportion de ces hydrates dans la pâte de ciment hydratée est fortement dépendante de la composition du ciment (teneur en C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF).

De plus, la quantité d'eau apportée durant la fabrication du matériau est généralement supérieure à la quantité utile à l'hydratation complète du ciment, pour favoriser la maniabilité à l'état frais. Cependant, avec l'avancée de l'hydratation, le cheminement de l'eau jusqu'aux phases anhydres est gêné par les hydrates déjà formés. Ainsi, même si elle ralentit considérablement, l'hydratation se poursuit dans la microstructure du matériau par diffusion de l'eau. La quantité d'eau est généralement rapportée à la quantité de ciment et cela est noté rapport Eau sur Ciment (E/C). Plus le matériau présente un E/C faible, plus sa matrice cimentaire est dense. De ce fait, le rapport E/C est un paramètre qui influence la microstructure se formant durant l'hydratation [6,5].

1.2.3. Propriétés des bétons

1.2.3.1. Propriétés physiques

1.2.3.1.1 Ouvrabilité

C'est l'aptitude d'un béton à une bonne adéquation à la méthode de sa mise en œuvre dans un ouvrage donné compte tenu de ses caractéristiques. Elle est influencée par la granulométrie et la forme des granulats, par le dosage en ciment et en eau, par l'emploi éventuel d'adjuvants. Les essais de mesure de consistance du béton les plus courants sont l'essai d'affaissement au être d'Abrams (norme NF P 18-451) et l'essai d'étalement à la table à secousses ; mais les essais Vébé et indice de serrage ne s'appliquent qu'à des bétons très fermes [10].

1.2.3.1.2. Le retrait

C'est une diminution dimensionnelle du béton en absence de chargement, dûe à l'élimination d'une partie de l'eau de gâchage et aux réactions d'hydratation des grains de ciment. Le siège du retrait se situe dans la pâte du ciment, selon les circonstances, peuvent se développer dans un béton cinq types de retrait : le retrait plastique, le retrait de séchage, le retrait endogène, le retrait thermique et le retrait de carbonatation.

Ces retraits provoquent des contraintes internes qui se matérialisent par l'apparition de fissures micro et macroscopiques à la surface de béton ou dans l'ensemble de sa masse, ces fissures détériorent l'esthétique et endommagent l'élément, tels l'accélération de la corrosion du béton et des armatures en laissant pénétrer des agents agressifs. On distingue les retraits suivants :

1.2.3.1.2.1. Retrait plastique

C'est le premier retrait de dessiccation qui se développe à la surface d'un béton encore à l'état plastique, c-à-d l'eau de gâchage n'est pas encore liée aux constituants du ciment, elle n'est retenue que physiquement et mécaniquement donc elle peut s'évaporer comme elle peut être absorbée par un coffrage en bois trop sec ou par des granulats poreux non humidifiés. Il dépend de la vitesse de dessiccation qui dépend à son tour de la température de l'air et du béton, de

l'humidité relative et de la vitesse du vent. Ce retrait est moins important pour le béton par rapport à la pâte de ciment et au mortier, car le squelette de granulats s'oppose aux contraintes. L'amplitude du retrait plastique est 5 à 10 fois plus élevée que celle du retrait observé après prise, et il est irréversible, conduit à des fissures peu profondes limitées à la surface supérieure du béton. Ce type de retrait peut être limité par l'utilisation des coffrages étanches non absorbant ou en fournissant au béton à partir de ses surfaces libres de l'eau, ou en scellant ces surfaces pour empêcher toute évaporation [11, 12].

1.2.3.1.2.2. Retrait endogène

Endogène parce qu'inhérent aux matériaux avec absence de tout échange d'eau avec l'extérieur. L'évolution de ce retrait est directement liée à la cinétique d'hydratation des grains de ciment. Le retrait endogène peut avoir deux origines :

1. Une origine chimique due à l'hydratation de la pâte de ciment qui s'accompagne d'une diminution de volume absolu, ceci vient du fait que le volume des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes initiaux de l'eau et du ciment, c'est le phénomène de la contraction Le Chatelier [6,12,11].
2. Une origine physique, la porosité très fine créée par l'hydratation du ciment draine de l'eau des capillaires les plus grossiers ce qui assèche, le réseau des pores capillaires. Par suite, même en absence d'un squelette rigide, la dessiccation des capillaires va provoquer un raccourcissement progressif du matériau, appelé retrait hydrique endogène (retrait d'auto-dessiccation ou retrait d'hydratation). Mais si le béton est mûri à l'eau, les gros capillaires drainent à leur tour l'eau de la source extérieure, par conséquent, il n'y a plus de phénomène de dessiccation, il se trouve même que le béton gonfle (Le Chatelier, 1904) [6,12,11].

1.2.3.1.2.3. Retrait de séchage

C'est un retrait de dessiccation qui se développe à partir de la surface de l'élément de béton durci exposé à l'air ambiant, son intensité dépend de la réserve d'eau disponible dans le matériau après les réactions d'hydratation, et donc directement du rapport E/C et de l'hygrométrie ambiante. Il existe trois principales théories qui expliquent les mécanismes du retrait de dessiccation : la dépression capillaire, la variation de la tension superficielle et la variation de la pression de disjonction [12].

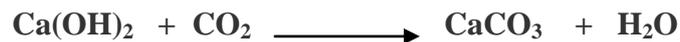
1.2.3.1.2.4. Retrait thermique

Résulte de la baisse de la température du béton tout juste après sa prise, température occasionnée, soit par la chaleur d'hydratation du ciment qui est une réaction exothermique, soit par la variation thermique du milieu de conservation. Le retrait thermique dépend de plusieurs facteurs comme la composition, la finesse de mouture et la quantité du ciment, la forme et les

dimensions de l'élément, de la température initiale du béton et la température ambiante... etc [11].

1.2.3.1.2.5. Retrait de carbonatation

Est un exemple de couplage entre vieillissement et dessiccation, se développe principalement dans les premiers centimètres du béton, le gaz carbonique de l'atmosphère réagit avec la portlandite Ca(OH)_2 (le CO_2 réagit presque avec tous les composants de l'hydrate sauf sulfate de calcium) pour former un carbonate de calcium, cette réaction libère l'eau :



Le retrait est occasionné par l'évaporation de cette eau libérée. Le retrait de carbonatation se traduit par des fissures peu profondes et principalement limitées aux surfaces exposées du béton [11].

1.2.3.1.3. La compacité et la porosité

Sont des caractéristiques physiques essentielles du béton, conditionnent plusieurs propriétés de ce dernier telle sa perméabilité, ses résistances mécaniques, son module d'élasticité et surtout sa durabilité. On distingue les pores contenus dans les granulats leur taille et leur volume n'évoluent pas, par contre ceux se trouvant dans la pâte de ciment leur dimension diminue avec la progression d'hydratation on distingue [11,1] :

- Les pores capillaires ($0.01 \mu\text{m} \leq \varnothing \leq 0.5 \mu\text{m}$) occupent les espaces entre les grains de ciment en suspension dans l'eau, leur taille et leur volume dépendent du rapport E/C. La perméabilité du matériau est essentiellement dépendante des ces pores.
- Les pores relatifs aux hydrates ou pores des gels ($\varnothing < 40$ angströms) sont présents dans le gel de C-S-H. Le volume de ces pores n'est pas affecté par le rapport E/C. Ces pores sont divisés en pores inter-cristallites qui se situent entre les gels et les pores intra-cristallites présents à l'intérieur du gel lui-même.
- Les bulles d'air occlus ($\varnothing > 1 \text{ mm}$) piégées non intentionnellement à l'intérieur du béton lors du malaxage du béton frais[1].

1.2.3.1.4. Perméabilité et diffusivité :

La perméabilité est l'aptitude d'un matériau à se laisser pénétrer et traverser par un fluide (eau, air ou un autre gaz ...) sous l'effet d'une pression motrice. Elle est directement liée aux caractéristiques du réseau poreux (forme, dimension, distribution, sinuosité,... etc), la perméabilité des matériaux cimentaires varie avec la progression de l'hydratation [1].

La diffusion est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration, elle ne dépend pas de la taille des pores mais de leur

interconnexion [12], les mécanismes et les lois qui régissent la perméabilité et la diffusivité sont différents mais les moyens d'action les limitants sont les mêmes c-à-d limiter le volume occupé par l'eau et la connectivité du réseau capillaire, car le béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs extérieurs.

1.2.3.1.5. DEFORMABILITE

1.2.3.1.5.1. Définition de la rhéologie

La rhéologie représente l'étude de la déformation et de l'écoulement de la matière sous l'effet d'une contrainte appliquée. La déformation et l'écoulement sont en fait les conséquences de mouvements relatifs des particules d'un corps les unes par rapport aux autres. La rhéologie est capable d'intégrer l'étude de l'ensemble des substances, qu'elles soient liquides ou solides. Dans le cadre des matériaux fluides, on s'intéresse plus particulièrement à leur écoulement.

1.2.3.1.5.2. Module d'élasticité

Par définition, ce paramètre traduit l'aptitude à la déformation sous contrainte d'un béton. Il correspond au rapport de la contrainte à la compression σ_c à la déformation longitudinale relative ε . Son expression est donnée par la relation suivante :

$$E = \frac{\sigma_c}{\varepsilon}$$

ε est sans dimension. Son expression est donnée par :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

où L est la longueur de la base de mesure, ΔL le raccourcissement mesuré sur cette base.

Certaines relations expérimentales relient le module élastique du béton à sa résistance à la compression f_c . Ces relations sont généralement des lois de puissance. Par exemple, celle proposée dans le règlement français du béton armé BAEL est donnée par la relation suivante :

$$E_{ij} = 1100 (f_{c,j})^{1/3}$$

Le module d'élasticité se mesure généralement par un essai d'extensométrie en compression. Selon la norme ISO 6784, après surfaçage soigné et disposition de l'extensomètre dans la zone centrale de l'éprouvette, on applique sous la presse trois cycles de « chargement-déchargement » jusqu'au tiers de la charge de rupture (déterminée auparavant par un essai de compression sur une éprouvette du même mélange). La mesure de la déformation s'effectue lors du troisième chargement. [49]

1.2.3.1.5.3. Modèle trispère du module d'élasticité

De Larrard, fait intervenir les propriétés d'élasticité des constituants (module du granulat, module de la pâte de ciment, etc.) et propose dans ses travaux un modèle plus élaboré qui repose sur un calcul d'homogénéisation (modèle trispère) [49].

Le module du béton est déduit de celui des deux phases présentes dans le composite et de la structure granulaire du mélange, décrite par les compacités g et g^* . La relation s'écrit :

$$E = \left(1 + 2g \frac{E_g^2 - E_m^2}{(g^* - g)E_g^2 + 2(2 - g^*)E_g E_m + (g^* + g)E_m^2} \right) E_m$$

où E_g et E_m sont respectivement les modules du granulat et de la matrice. E_m est déduit de la résistance à la compression du composite, selon la relation suivante :

$$E_m = 226 f_c$$

Rappelons que g est la compacité réelle du squelette granulaire et g^* sa compacité maximale. Pour calculer E , il faut connaître au préalable le module E_g du granulat. Si celui-ci n'est pas mesuré directement sur la roche mère, on peut alors l'estimer avec une bonne précision en réalisant des bétons dont on mesure E et f_c . Les relations précédentes permettent alors de trouver E_g . C'est cette approche qui a été adoptée pour la suite. Elle a permis de comparer E_g à la résistance des roches mères. Par ailleurs, d'après la relation ci-dessus, on peut vérifier que c'est bien les granulats les plus rigides qui donne les bétons les plus rigides, si tous les paramètres de la formule restent équivalents par ailleurs (E_m , g , et g^*).

1.2.3.1.5.4. Effet des granulats sur le module d'élasticité

Le module d'élasticité des agrégats constitue un des facteurs déterminant de la résistance du béton. Généralement la résistance du béton augmente avec l'augmentation du module d'élasticité des agrégats. Cette relation peut être expliquée par l'effet de la rigidité des agrégats sur la distribution des contraintes dans le béton sous charges.

A déformation égale la part des charges supportées par les agrégats augmente avec la rigidité (c'est à dire le module d'élasticité); et par conséquent la part supportée par la pâte de ciment diminue.

Pour cette raison, pour formuler un bon béton, il est préférable d'utiliser un gros granulat dont le module d'élasticité est aussi voisin que possible de celui du mortier qui l'enrobe de façon à minimiser les déformations différentielles au niveau de l'interface mortier – gros granulat qui pourraient nuire à l'adhérence du mortier ou de la pâte de ciment hydraté sur le gros granulat.

1.2.3.2. Propriétés mécaniques

1.2.3.2.1. Résistance mécanique

La résistance mécanique est l'une des caractéristiques essentielles du béton. Le béton est employé, en général, comme matériau porteur et le taux de travail d'un ouvrage en béton dépend de sa résistance mécanique qui évolue avec le durcissement du béton. La résistance mécanique d'un béton dépend de plusieurs paramètres à savoir :

- la nature et la qualité des constituants (ciment, granulats, eau, adjuvant)
- les conditions de mise en œuvre de ces constituants
- les conditions thermo hygrométriques ambiantes de conservation.

Elle est définie par la résistance à la compression et par la résistance à la traction.

- **Résistance à la compression** : est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton armé. Le béton est caractérisé par la résistance à la compression R_{c28} mesurée sur des éprouvettes écrasées à 28 jours selon la norme NF EN 12390-3.

- **Résistance à la traction** : Elle est moins étudiée que la résistance à la compression car le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression, et son comportement en traction est quasi fragile. Le comportement en traction du béton peut être identifié par l'essai de flexion sur trois points, désignée par F_{t28} .

1.2.3.2.2. Durabilité

Elle est généralement utilisée pour caractériser de façon très générale la résistance d'un béton face à l'attaque d'un agent agressif physique ou chimique (Moranville, Regourd, 1982), et aussi aux contraintes mécaniques (fluage). La durabilité du béton dépend des facteurs qu'il n'est pas toujours aisé d'isoler : condition de mise en œuvre, composition des différents constituants (ciment, granulats, eau, adjuvant), âge du béton, conditions climatiques et le milieu dans lequel le béton est exploité.

Les facteurs influençant la durabilité peuvent être internes au béton comme la porosité, perméabilité et diffusivité, la fissuration, les ions chlorure (présent dans certains accélérateurs et eau de gâchage), réactions alcalis granulats, les ions sulfates (oxydations des pyrites contenues dans certains granulats calcaires), ou externes les ambiances hivernales (la répétition des cycles de gel dégel, l'action des sels de déverglace, formation des sels gonflants), les ambiances chimiquement agressives notamment le dioxyde de carbone, les eaux de pluies, de neige, les eaux souterraines, l'eau de mer, les acides ainsi que toutes les solutions résultant de la dissolution de sels ou de gaz [13]. Le béton est caractérisé par une basicité accentuée dû à la nature de la pâte durcie qui est composé de :

- de 15 à 20 % de portlandite : base forte
- environ 70 % de C-S-H : considérés comme des sels d'acide faible (silicique) et de base forte $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- 10 à 15 % d'aluminates et sulfoaluminates de calcium
- une solution interstitielle, dans les pores et capillaires enrichie en alcalins (NaOH et KOH) dont le pH varie entre 12.5 et 13.5.

Alors que le pH de l'environnement est en général inférieur à ces valeurs, ce qui donne une réaction entre le milieu extérieur et le béton pour former des sels et de l'eau sous la forme suivante :



Cette réaction peut améliorer la durabilité du béton si le sel formé possède des propriétés liantes, on peut citer l'exemple de la carbonatation superficielle du béton de ciment portland par le CO_2 de l'air, mais le pH de la solution interstitielle du béton diminue jusqu'à environ une valeur de 9 ce qui entraîne la dépassivation des armatures. Dans le cas où le sel formé est soluble ce qui crée des risques de dégradation par dissolution et lessivage. Par ailleurs les aluminates du ciment (anhydres ou hydratés) réagissent avec les ions sulfates pour former l'étringite secondaire potentiellement expansive ($3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) [14]. Sous certaines conditions le C-S-H peuvent aussi réagir avec les sulfates et conduire à la formation de thaumasites ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSiO}_2 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$) entraînant des phénomènes expansifs et surtout une désagrégation de l'ensemble du liant [14]. Il a été toujours dit qu'un béton mécaniquement résistant n'est pas nécessairement durable.

1.2.3.2.3. Développement mécanique du béton

La résistance mécanique du matériau se développe durant l'hydratation : on parle alors de prise du béton. La formation progressive des hydrates permet l'obtention d'une matrice cimentaire résistante mécaniquement. Ces propriétés mécaniques sont mesurées par des essais de résistance en compression simple normalisés à 28 jours. On trouve parfois des mesures à différentes échéances permettant de suivre cinétiquement l'hydratation des matériaux. La **figure 1.1** montre l'évolution dans le temps de la résistance mécanique d'un béton ($E/C=0,49$) confectionné avec différents ciments [48].

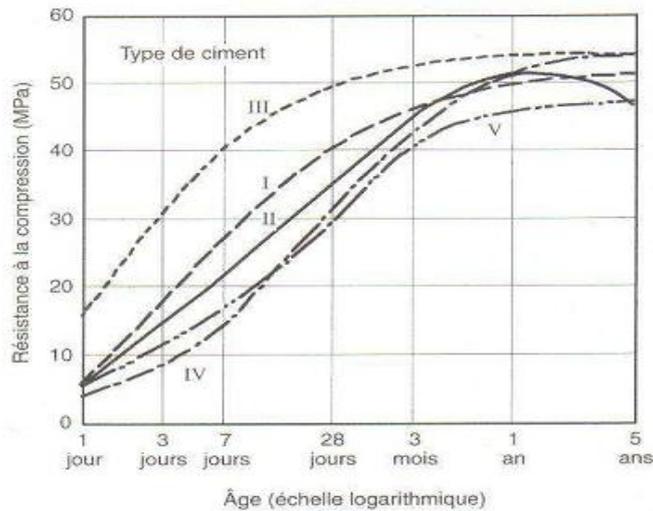


Figure 1.1 : Développement de la résistance mécanique d'un béton ($E/C=0,49$) [48]

Le développement des propriétés mécaniques d'un béton est fonction de sa formulation et en particulier de la nature du ciment. Certains ciments comme les CEM I font l'essentiel de leur hydratation très tôt et développent donc l'essentiel de leurs propriétés mécaniques entre un et quelques mois. En revanche, pour des ciments à hydratation plus lente (comme les ciments mélangés, contenant de fortes proportions de laitiers de hauts fourneaux ou de cendres volantes), ce processus peut se dérouler sur plusieurs années.

Un autre paramètre influant sur la résistance mécanique est le rapport E/C . Comme mentionné précédemment, l'augmentation du dosage en eau augmente la porosité capillaire et donc abaisse la compacité. Une conséquence macroscopique de ce processus est une chute des résistances mécaniques, comme le montre la **figure 1.2** concernant l'étude d'un béton auto compactant [48 , 15 , 16]

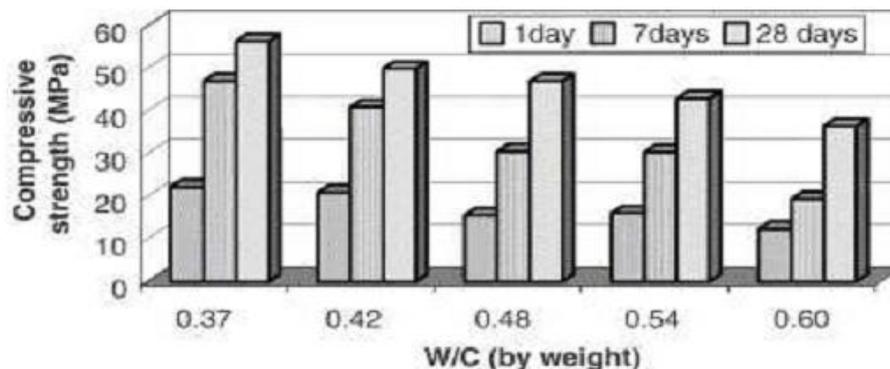


Figure 1.2 : Influence du rapport E/C sur la résistance en compression [15]

L'augmentation du rapport E/C fait donc diminuer la résistance du matériau et ceci quelque soit son âge. Ceci est à relier à la quantité d'eau libre présente au sein du matériau, qui conditionne la porosité et par conséquent la résistance du béton.

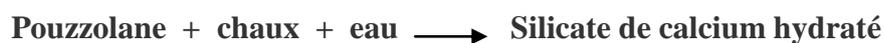
1.3. LES AJOUTS MINÉRAUX

1.3.1. Généralités

Les ajouts sont des matériaux minéraux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelques fois également au béton afin d'améliorer les propriétés du mortier ou du béton grâce à une activité hydraulique et / ou pouzzolanique.. Ils sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir un ciment composé ou divers plus économique. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la composition du béton.

On peut fabriquer des bétons en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts minéraux lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance et durabilité. Les ajouts minéraux cimentaires typiques sont les cendres volantes (C.V), le laitier granulé de haut fourneau (L.G.H.F) et les fumées de silice (F.S). L'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques [17].

La plupart des ajouts minéraux ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C_2S et du C_3S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland (N F P 18-508). On peut écrire donc une réaction pouzzolanique de la façon simple suivante :



Il faut noter qu'à la température de la pièce, cette réaction est généralement lente et peut se développer sur plusieurs semaines. Cependant plus la pouzzolane est fine et vitreuse, plus sa réaction avec la chaux est rapide. L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C_2S et du C_3S (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux contribue à la chute de résistance de la pâte de ciment hydratée. Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau, ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte de ciment. Le seul aspect positif de la présence de chaux dans un béton est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures d'acier.

Quand on fabrique des bétons, si on utilise 20 à 30% de pouzzolane, théoriquement, on pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment portland pour la transformer en

C-S-H. Cependant, les conditions dans lesquelles on utilise le béton sont très différentes de cette situation idéale et la réaction pouzzolanique n'est jamais complète. Ces matériaux étant des sous produits industriels, leurs compositions chimiques sont en général moins bien définies que celle du ciment Portland.

1.3.2. Avantages des ajouts minéraux

1.3.2.1 Avantages techniques

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

1.3.2.2. Avantages économiques

Typiquement, le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plupart des matériaux (ajouts) susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou béton sont des sous-produits, et, à ce titre, demandent relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment Portland. Toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et le coût élevé du transport qui en résulte risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels. De même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés. Bien qu'il soit difficile à prédire, le prix des ajouts cimentaires pourrait se comparer à celui du ciment si la demande en béton ne diminuait pas, dans ce monde que menace le (CO₂). Et c'est bien le gaz carbonique (dioxyde de carbone) qui pourrait finalement décider de la valeur de ces denrées.

1.3.2.3. Avantages écologiques

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). De fait, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de (CO₂). En général l'utilisation de cendres volantes (C.V) et de fumées de silice (F.S) comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie. Le laitier, par contre, doit être granulé et sa granulation provoque l'émission d'environ 0,07 tonne de (CO₂) par tonne de laitier granulé de haut fourneau (L.G.H.F) produit. A cela, il faut ajouter les émissions de CO₂ causées par le transport des matériaux (ajouts) jusqu'au

chantier de construction. Les études montrent que le transport (par camion et chemin de fer) d'une tonne d'ajouts cimentaires sur une distance de 1000 Km libère environ 0,022 tonne de (CO_2).

1.3.3. Classification des ajouts minéraux

Selon la norme ENV 2006, les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes.

1.3.3.1. Principaux ajouts minéraux inertes

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à $60\mu\text{m}$ ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305). En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats. Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau,...). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière.

1.3.3.1.1. Fillers calcaires

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

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

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine. Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles:

- ✓ Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- ✓ Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- ✓ Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C_3S et du C_3A et à la formation de carboaluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- ✓ Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.

1.3.3.1.2. La poussière

La poussière est une matière à particules fines , récupérée à la sortie du four , lors de son passage avec la fumée , sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm^2/g . le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

1.3.3.2. Les ajouts minéraux actifs

Parmi ces ajouts on distingue la pouzzolane, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Nous nous intéresserons ici que par la pouzzolane puisqu'elle est l'ajout utilisée dans nos essais.

- La pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [18].

Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

A) pouzzolane naturelle

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

B) Pouzzolane artificielle

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite et moler. Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories [18] :

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

1.3.3.2.1. Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées (cas des squelettes siliceux de micro-organismes). Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux [19] et [20].

Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactives. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux. L'activité pouzzolanique s'explique par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux (portlandite). Des tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation ne suffisent pas pour déterminer la réactivité pouzzolanique. D'autre part, la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure [18].

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

- ajouts de produits chimiques.
- broyage à une finesse plus élevée.
- traitement thermique.

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

1.3.3.2.2. Propriétés hydrauliques des pouzzolanes

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme [19] [20].

1.3.3.2.3. Propriétés physiques de remplissage des pouzzolanes

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité [19] [20].

1.4. LES ADJUVANTS

1.4.1. Définition

L'adjuvant est un produit incorporé au moment du malaxage du béton à un dosage inférieur ou égal à 5 % de la masse de ciment du béton, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et / ou à l'état durci [AFNOR NF EN 934-2/A2, 2006]. Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule, mais peut présenter une ou plusieurs fonctions secondaires. Plusieurs catégories sont définies par la norme. Il existe plusieurs types d'adjuvants qui sont régis par la norme NF EN 934-2 : plastifiants/superplastifiants, rétenteurs d'eau, entraîneurs d'air, accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise, hydrofuges...etc.

1.4.2. Rôle des adjuvants

Les adjuvants comme indiqué précédemment sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors du malaxage ou avant leur mise en œuvre, provoquent des modifications des propriétés du béton, notamment à l'état frais [21].

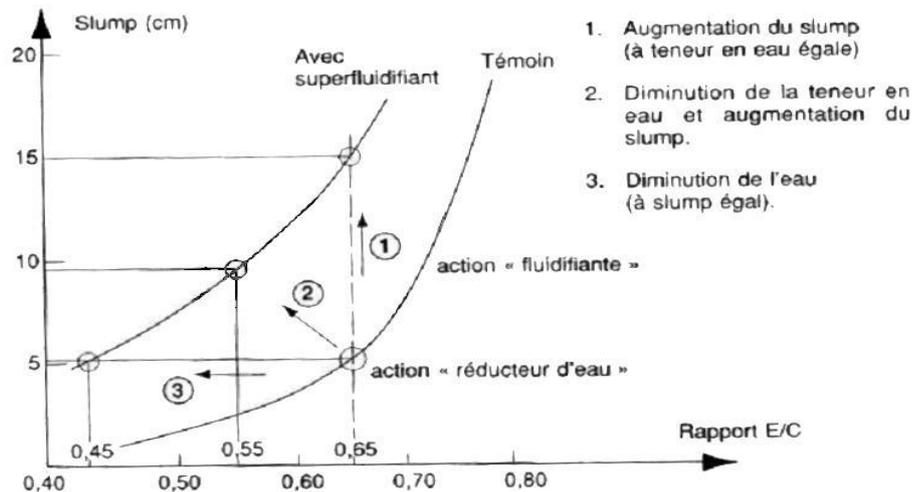


Figure 1.3 : Utilisations des superplastifiants [21]

Les plastifiants et les superplastifiants permettent, comme décrit dans la **figure 1.3** [21], soit de réduire le dosage en eau à maniabilité constante, induisant donc un gain de résistance en compression, soit d'augmenter l'affaissement à teneur en eau constante. Les deux types de produits sont différenciés par leur efficacité en terme de réduction d'eau, les superplastifiants étant plus efficaces. Les premières générations de superplastifiants étaient des résines du type mélamines sulfonées, naphthalènes-sulfonates ou vinyles sulfonates. Un superplastifiant permet de réduire la quantité d'eau et donc d'augmenter la résistance mécanique du béton tout en contrôlant sa rhéologie. Il devient possible de rapprocher considérablement les grains de ciment lorsqu'ils s'hydratent durant le mélange. Cet effet permet ainsi de confectionner des bétons à matrice cimentaire très dense et très imperméable qui présentent une résistance à la pénétration des agents agressifs sans commune mesurée avec celle des bétons ordinaires [24].

Le mécanisme physique, permettant au superplastifiant d'augmenter la maniabilité du béton, est résumé comme suit [23 ,22] : le ciment, dont la taille des grains varie de l'ordre de quelques microns à une centaine de microns, est obtenu par broyage. Ce dernier provoque une désorganisation de la surface des grains, et donc la création de sites chargés électriquement. Par conséquent, le ciment présente, à l'état concentré, une structure floculante: les charges opposées s'attirent mutuellement pour former des agrégats de particules. Au sein d'une suspension (béton frais), les grains de ciment forment des agglomérats qui emprisonnent une certaine quantité d'eau,

qui n'est plus alors disponible pour donner de l'ouvrabilité au mélange. Le rôle des superplastifiants est donc de casser ces agglomérats pour rendre cette eau disponible. Ce type d'adjuvant se compose de molécules organiques solubles dans l'eau, portant des charges électriques (négative par exemple) réparties sur leur longueur. Ces molécules viennent donc se fixer aux points chargés positivement situés à la surface des grains de ciment et forment des boucles au-dessus de cette surface. Grâce à cette boucle, tout se passe comme si le grain de ciment avait acquis une forte charge négative. Chaque grain de ciment, étant chargé de cette façon, tend à s'écarter de ses voisins. Ces forces de répulsion peuvent être assez grandes pour fragmenter des agglomérats et libérer l'eau liée. Parmi les nouvelles générations de superplastifiants, on trouve la famille des polycarboxylates. Ils sont en général plus efficaces et fournissent un maintien de l'ouvrabilité plus long. Ces produits agissent sur les grains de ciment, comme exposé ci-dessus, mais plutôt par effet d'encombrement stérique [25]. Ces superplastifiants hauts réducteurs d'eau à effet fluidifiant prolongé sont des polymères acryliques (chargés négativement) sur lesquels sont fixés des polymères non chargés (polyoxydes d'éthylène) ou présentant des groupements terminaux anioniques. Spécialement conçu pour le béton de bâtiment et de génie civil, ils permettent la confection de bétons à hautes performances. Leur action dispersante, liée aux groupements polyoxydes d'éthylène très encombrants, est principalement due à des forces de répulsion stériques. Ces adjuvants présentent deux effets qui peuvent être à l'origine de la dispersion : – la défloculation par répulsion électrostatique suite à l'adsorption de molécules portant de nombreuses charges de même signe (**Figure 1.4**) ; – la lubrification des grains par répulsion stérique due à l'encombrement des molécules (**Figure 1.5**).

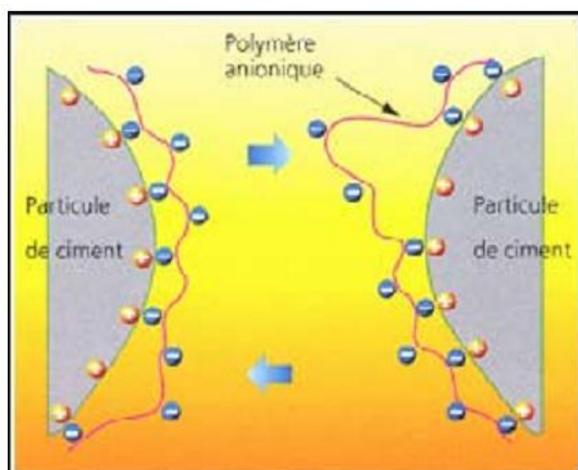


Figure 1.4 : Particules de ciment recouvertes de polymères anioniques : dispersion par répulsion électrostatique [24]

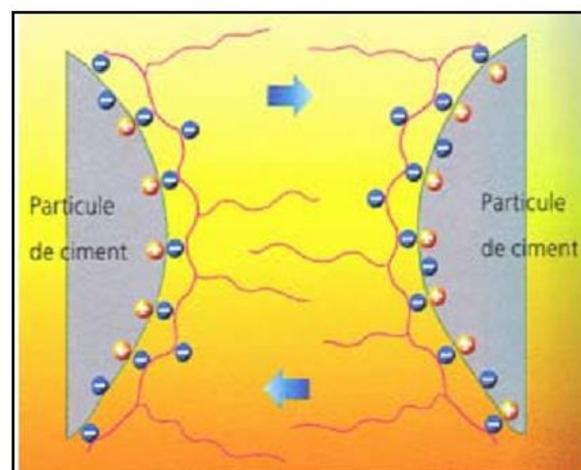


Figure 1.5 : Particules de ciment recouvertes de polymères à fort encombrement stérique: dispersion par répulsion stérique [24]

1.5. LES GRANULATS POUR LE BÉTON

La définition de granulat est donnée par la norme XP-P 18.540 : « ensemble de grains de dimensions comprises entre 0 et 125mm destiné notamment à la confection des mortiers et des bétons ». Les sables sont des granulats dont le diamètre du plus gros grain doit être inférieur à 2mm. Les granulats ont une influence importante sur les performances mécaniques et sur les déformations différées du béton obtenu. En effet ils ont, en règle générale, de meilleures performances mécaniques que la pâte de ciment. L'origine du granulat doit être prise en compte pour l'explication du comportement différé du béton en conditions séchantes à température ambiante, et à hautes températures.

Les granulats peuvent également contribuer à la dégradation d'une structure en béton. En effet les granulats ne subissent pas de déformations différées à l'échelle de la durée de vie des structures. Les déformations différées de la pâte de ciment sont donc empêchées ce qui se traduit par :

- Des déformations différées à l'échelle du béton bien plus faibles que celles observées sur pâte de ciment.
- L'apparition de contraintes internes auto induites (sans chargement mécanique extérieur) dans la pâte de ciment et les granulats.

La forme et la rugosité des granulats ont une grande influence sur la compacité du mélange granulaire, qui est également sensible à la granulométrie (distribution de taille des granulats utilisés dans un béton donné). La granulométrie a pour but d'optimiser la réduction du volume des vides afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques du béton. [26]. La forme et la nature (calcaire, siliceuse, silico-calcaire) des granulats choisie joue également sur l'adhérence avec la matrice cimentaire. Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine soit naturelle, soit artificielle, soit recyclée.

1.5.1. Les principes de fabrication des granulats

Il n'est pas toujours possible de trouver dans la nature des gisements de granulats qui ont exactement les caractéristiques techniques désirées leur permettant de remplir sans traitement les fonctions auxquelles on les destine. Il faut impérativement les transformer dans des installations de production, ou bien les fabriquer en concassant et en tamisant des morceaux de roches abattus par dynamitage sur le front de taille d'une carrière.

Les granulats sont donc produits suite aux quatre opérations suivantes:

- l'extraction de la matière première;
- le concassage;
- le criblage;
- le stockage avant expédition.

Parfois, une seule opération complète ou remplace un de ces quatre traitements. Par exemple, la cuisson des nodules d'argile ou de schiste prend place entre le concassage et le criblage et lorsque les nodules sont moulés, le concassage est supprimé.

1.5.1.1. Les granulats concassés de roche massive (granulats de carrière)

Les granulats concassés de roche massive sont des granulats naturels extraits de carrières. Ils sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur confère des formes très angulaires. Nous nous intéresserons aux roches massives les plus couramment utilisées dans l'industrie du béton. Parmi celles-ci, quatre roches sont d'origine magmatique : granite, porphyre, basalte, diorite ; deux roches sont d'origine métamorphique : quartzite, marbre ; une roche est sédimentaire : le calcaire. [27]

□ Roches d'origine magmatique

Le granite est une roche magmatique consolidée en profondeur. Il est constitué de quartz, de feldspath et de mica. Les porphyres ou rhyolites sont des roches de composition similaire au granite, elles contiennent de gros cristaux de feldspath, de quartz ou d'éléments ferro-magnésiens. Le basalte est une roche lourde, dont les éléments essentiels sont le feldspath calco-sodique et le mica. Les diorites sont des roches de teinte sombre, d'aspect granitoïde, constituées de feldspath et de mica.

□ Roches d'origine métamorphique

Les quartzites sont des grès très compacts formés uniquement de grains de quartz cimentés par de la silice. Les marbres sont des calcaires grenus (à grains microscopiques). Ils sont constitués de grains de calcite (CaCO_3) de grosseur uniforme ou irrégulière, regroupés sans orientation mais sans laisser de vide.

□ Roches d'origine sédimentaire

Les calcaires sont principalement constitués de calcite. Ils montrent un très fin développement de petits grains de taille uniforme ou irrégulière.

1.5.1.2. Extraction des granulats concassés

Ils sont produits à partir de bancs rocheux. Pour le carrier, une bonne connaissance géologique de son gisement peut orienter, du moins dans une certaine mesure, son exploitation vers tel ou tel banc, telle ou telle zone afin de produire des granulats ayant les caractéristiques requises. L'extraction se fait par abattage à l'explosif, après que la première couche de découverte qui porte principalement sur la terre végétale ait été éliminée au buteur. L'abattage sert à fragmenter le massif que le matériau soit repris aisément par les engins et acheminé à l'usine de traitement.

Après l'abattage, on procède fréquemment à un pré criblage appelé "scalpage". Le scalpage permet d'éliminer les restes de découverte et de roches altérées dans l'abattage [28].

Le matériau scalpé ou non, est ensuite concassé pour être amené à la dimension d'utilisation.

1.5.1.2.1. Le concassage

Le concassage est la division des matières dures en fragments grossiers. Ce procédé permet de transformer des gros fragments de roches en une série de granulats qui répondent en quantité et en qualité aux divers besoins de l'industrie: granulats pour béton, granulats routiers,...etc. Cette opération est réalisée en plusieurs étapes, concassage primaire, secondaire et tertiaire, par exemple, séparés l'un de l'autre par des criblages. Les équipements qui permettent le concassage des blocs rocheux sont appelés concasseurs [28]. Ces appareils de concassage peuvent être classés en deux catégories suivant qu'ils travaillent:

- par écrasement entre deux pièces de concassage;
- par chocs et projections sur des enclumes fixes;

Le choix des concasseurs affectés à ces opérations est évidemment très lourd de conséquences pour le carrier puisque, d'une part les concasseurs représentent un investissement important et, d'autre part, la productivité de l'installation, la qualité et le prix de revient des granulats en dépendent énormément

Habituellement, le concasseur primaire est un concasseur à mâchoires, les autres étant des giratoires. Cependant, actuellement, on trouve également des concasseurs primaires giratoires. Les concasseurs à mâchoires ou giratoires sont des appareils qui travaillent par écrasement dont une pièce broyante est fixe et l'autre mobile.

a) **Concasseurs travaillant par écrasement :**

Dans cette catégorie d'appareils, on trouve des concasseurs dont une pièce broyante est fixe et l'autre mobile tels que les concasseurs giratoires ou à mâchoires et des concasseurs dont les deux pièces broyantes sont mobiles tels que les concasseurs à cylindres.

□ **Concasseurs giratoires**

Le pied de l'arbre principal étant engagé dans un mouvement excentrique, décrit un cercle; sa tête étant fixe, l'arbre décrit un cône autour de l'axe vertical de l'appareil. À mi-hauteur de cet arbre, une pièce broyante, appelée le cône ou la noix, oscille à l'intérieur d'une pièce fixe appelée l'anneau de broyage ou bol. Ainsi, pendant le fonctionnement en charge de l'appareil, le cône roule sur les matériaux, ce qui réduit l'usure des pièces broyantes. Selon la géométrie interne qu'on leur donne, les concasseurs giratoires peuvent être utilisés comme concasseurs primaires, secondaires ou tertiaires [29].

Les concasseurs giratoires primaires présentent de larges ouvertures d'entrée qui leur permettent d'accepter les plus gros blocs. Actuellement, les plus gros appareils en service ont des ouvertures d'admission atteignant dans le sens radial plus de deux mètres, ce qui permet d'admettre des blocs de 10 à 15 tonnes de poids unitaires avec une production pouvant dépasser 3500 t/h. Ces concasseurs ainsi chargés à plein, travaillent constamment au maximum de leur capacité. Le rapport de réduction de ce type de concasseur est de l'ordre de 6 à 8.

Les concasseurs giratoires secondaires ne sont pas habituellement utilisés pour fabriquer des matériaux finis. On demande donc à ces appareils d'avoir une capacité de prise aussi grande que possible afin de pouvoir être alimentés sans difficulté. Ils doivent permettre une bonne prise des matériaux et comporter une chambre facilitant l'admission et l'évacuation.

Les concasseurs giratoires tertiaires ou finisseurs sont utilisés lorsque l'on traite des matériaux durs et abrasifs et que l'on veut obtenir des gravillons de bonne cubicité. Divers fabricants se sont penchés sur les améliorations techniques permettant de créer les conditions idéales de production de granulats de qualité. Ces conditions sont les suivantes:

- vitesse d'écrasement bien adaptée pour permettre une meilleure prise des matériaux dans la zone d'alimentation et favoriser une bonne évacuation des produits, et de ce fait obtenir une compacité favorisant l'autobroyage;
- grand nombre de chocs sur toutes les faces des produits surtout dans la zone parallèle de finition (partie de finition de la chambre de broyage) de favoriser l'autobroyage et la rupture des éléments longs et plats;
- broyage en milieu dense, compact et homogène.

On voit donc que le mode d'utilisation, les caractéristiques mécaniques du concasseur giratoire et les caractéristiques physiques de sa chambre de concassage ont une influence extrêmement importante sur le rendement et la qualité des produits.

□ **Concasseurs à mâchoires**

Le principe général de ces appareils est le suivant: le matériau est écrasé entre deux mâchoires, l'une mobile et l'autre fixe. Le mouvement de la mâchoire mobile est différent suivant qu'il s'agit d'un appareil à simple ou à double effet. Les concasseurs à mâchoires à simple effet sont constitués d'un bâti en acier sur lequel est montée la mâchoire fixe. Le balancier, équipé de la mâchoire mobile, est suspendu sur un arbre excentré. Cet arbre est muni de deux volants d'inertie comportant des masses d'équilibrage. L'amplitude de la mâchoire mobile est réglée par l'inclinaison du plan du volet par rapport au plan du balancier. Dans un cycle complet, la mâchoire mobile commence par s'écarter de la mâchoire fixe avec un mouvement ascendant, puis elle se rapproche avec un mouvement descendant qui entraîne les produits vers la sortie.

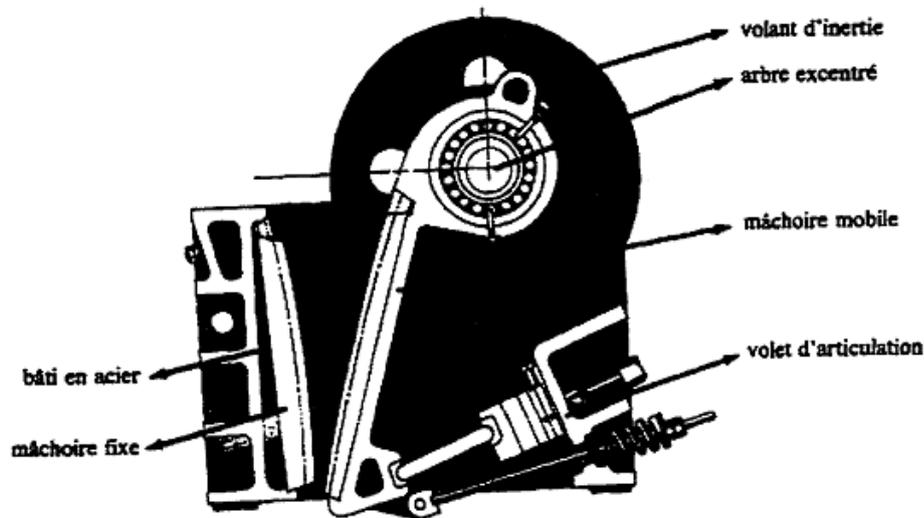


Figure 1.6: Concasseur à mâchoires à simple effet [29].

Un concasseur à mâchoires à double effet comporte un bâti sur lequel sont montés la mâchoire fixe et deux balanciers: l'un, le balancier moteur, entraîné par l'arbre excentrique, décrit des cercles dans sa partie haute, ce qui engendre un mouvement vertical alternatif. Ce mouvement vertical est transformé en un mouvement alternatif horizontal transmis au pied du balancier porte- mâchoire. Le mouvement de la mâchoire mobile est donc purement horizontal, ce qui limite l'usure due au va-et-vient vertical. Les qualités essentielles de ce type de concasseur sont sa robustesse et sa facilité d'entretien. Par contre, si la roche exploitée est à la fois dure et abrasive, et si le rendement horaire recherché est élevé (≥ 1000 t/m), il est souvent préférable d'utiliser soit un concasseur giratoire, soit un concasseur à choc. Le rapport de réduction de ce type de concasseur est de d'ordre de 4 à 5.

b) Concasseur travaillant par chocs

Le principe général en est toujours le même. Un rotor tourne à grande vitesse à l'intérieur d'une enceinte fermée équipée de plaques de chocs ou d'enclumes. Le rotor muni d'un certain nombre de pièces de chocs, fixes dans le cas des concasseurs à chocs, mobiles dans le cas des broyeurs à marteaux, projette les matériaux sur les enclumes. Le concassage s'effectue par chocs des particules sur les percuteurs ou marteau du rotor, par chocs des matériaux entre eux, par chocs des matériaux sur les enclumes. Les concasseurs à chocs permettent de très grands rapports de réduction pouvant aller jusqu'à 30, mais produisent un pourcentage important d'éléments fuis; par contre, ils sont très sensibles à l'usure. Lorsqu'on a affaire à des matériaux tant soit peu abrasifs contenant plus de 10 % de silice. Il importe cependant de rappeler que les broyeurs à marteaux permettent d'obtenir des granulats de cubicité inégalable.

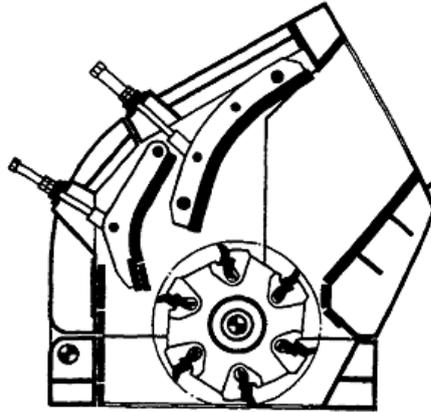


Figure 1.7: Concasseur à choc primaire [30].

Le concasseur «à projection» est un nouveau type de broyeur qui fonctionne par projection. Les granulats à broyer sont introduits par le tube d'alimentation sur la face supérieure du concasseur. Le rotor, tournant à grande vitesse, projette les matériaux à la périphérie, soit sur un matelas de matériaux qui sert d'écran de broyage, soit dans certains cas sur des enclumes interchangeables en métal anti-abrasion. La production comporte un pourcentage important d'éléments fins et la cubicité des particules obtenues est excellente. Ces appareils sont parfois utilisés uniquement en correcteur de forme.

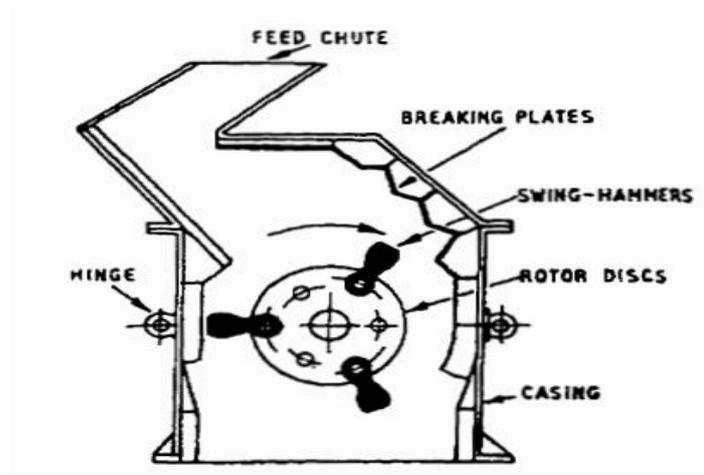


Figure 1.8 : Concasseur à projection dit finisseur (ou correcteur de forme) [30].

c) Choix du type de concasseur

Il n'existe pas de concasseur idéal; les différents types de concasseurs que nous venons de décrire présentent des avantages et des inconvénients, compte tenu du type de roche qui doit être traité et de l'utilisation prévue des granulats produits. Les facteurs qui interviennent lors du choix d'un concasseur sont :

- la dimension des plus gros morceaux des produits d'abattage;
- le débit horaire;

- le rapport de réduction désiré;
- la dureté et l'abrasivité de la roche à traiter;
- la granulométrie désirée des produits fins;
- la forme des produits concassés;
- la consommation d'énergie et la puissance des moteurs;
- les caractéristiques mécaniques du concasseur (rusticité, facilité d'entretien, facilité de remplacement des parties usées par abrasion, facilité des réglages, etc.).

En conclusion, les paramètres tels que les caractéristiques mécaniques de la roche, la granularité du matériau à l'entrée du concasseur, le débit d'alimentation et sa régularité, le réglage du concasseur, ont une grande influence sur la forme, l'angularité, la granularité et le débit du produit de concassage. Il faut donc que les appareils choisis, soient bien réglés et bien utilisés. En particulier, le débit d'alimentation doit varier aussi peu que possible, et pour éviter les dérèglages accidentels, il faut surveiller les concasseurs à l'aide d'instruments de contrôle, ampèremètre, voltmètre, etc.

1.5.1.2.2. Le criblage

Le criblage est l'opération qui permet de séparer un ensemble de granulats en deux sous-ensembles, l'un contenant les éléments plus gros d'une dimension donnée, l'autre les plus fins. Le criblage est l'opération complémentaire du concassage. Avant chaque concassage, on commence par éliminer les matériaux qui ont déjà une dimension inférieure à celles des particules les plus petites qui sortiront du concasseur: on parle de précriblage. Cette opération vise plusieurs objectifs:

- augmenter le rendement horaire du concasseur.
- éliminer les particules de roche Les plus fragiles qui ont été réduites les premières en particules de petites dimensions.
- limiter l'abrasion dans le concasseur puisque ce sont les particules les plus fines qui causent le plus l'usure du concasseur.

Après le concassage, le système de tamisage, constitué par un empilement de cribles inclinés à mailles carrées ou rectangulaires, permet de séparer les particules selon leur grosseur. L'efficacité du tamisage dépend des paramètres suivants:

- épaisseur de la couche de matériau sur le crible;
- vitesse de déplacement du matériau;
- fréquence et amplitude de vibration du crible;
- longueur et surface du crible.

D'autres paramètres tels que la proportion de passant, la forme des particules, la teneur en eau du matériau, influent sur les paramètres ci-dessus, compliquant ainsi le problème qui, il faut bien le dire, n'a pas de solution toute faite.

Le système de tamisage peut fonctionner en circuit ouvert, c'est-à-dire qu'aucune des particules qui a été classée n'est retournée vers le concasseur pour y voir sa taille réduite. Il peut fonctionner en circuit fermé avec le concasseur, c'est-à-dire que le refus du tamis supérieur est sans cesse retourné vers le concasseur.

1.5.1.3. Les granulats alluvionnaires

La plupart des granulats alluvionnaires sont des roches sédimentaires détritiques non consolidées [27]. En effet, les matériaux alluvionnaires sont le résultat d'une érosion sur place des différentes roches, les résidus de cette altération ayant été entraînés par les eaux de ruissellement puis par les rivières et les fleuves. Au cours de ce transport, des éléments sont arrachés par les cours d'eau aux terrains qu'ils traversent, ce qui explique l'hétérogénéité des alluvions [28].

1.5.1.4. Extraction des granulats alluvionnaires

Les exploitations de granulats alluvionnaires se trouvent dans les vallées où sont implantées des agglomérations, c'est-à-dire à proximité des besoins en granulats pour les bétons. La distance entre le gisement et le lieu d'utilisation est limitée ce qui diminue d'autant le coût de transport. Comme ces granulats se présentent déjà sous une forme granulaire et que par conséquent ils nécessitent moins de fragmentation, le coût de production est faible.

L'extraction des granulats alluvionnaires se fait généralement à l'aide de pelles mécaniques en site terrestre et par dragage en site aquatique. Le concassage est une opération auxiliaire pour les granulats alluvionnaires. Il est essentiellement employé pour augmenter la production des classes déficitaires à partir des classes granulaires excédentaires. Le criblage est l'opération principale du process. Il est généralement pratiqué dans un courant d'eau, ce qui permet de combiner les opérations de tamisage et de lavage [28].

1.5.2. Fabrication des granulats à l'étranger

1.5.2.1. Caractéristiques des granulats alluvionnaires

Due fait de leur érosion naturelle, les granulats alluvionnaires sont des matériaux aux formes arrondies. Comme de plus les matériaux sont peu concassés lors du process industriel, les granulats produits sont peu anguleux [28]. Le **tableau 1.1** donne les valeurs moyennes et l'étendue des caractéristiques des granulats alluvionnaires.

Caractéristique	valeur minimale	valeur moyenne	valeur maximale
Propriétés physiques			
Masse volumique réelle (tonnes/m ³)	sable 2,4	2,5	2,6
	gravillon 2,5	2,6	2,7
Absorption eau (%)	sable 0,5	0,8	1,2
	gravillon 0,6	0,8	2,1
Sensibilité au gel (%)	0	11	20
Module de Finesse	2,2	2,4	2,8
Teneur en fines (% <80 µm)	2,5	3,5	6
Équivalent de sable (PS en %)	70	85	90
Valeur de bleu (g de colorant/kg de fraction 0/2 mm)	< 0,7		
Matières organiques (%)	test négatif		
Impuretés (%)			
Éléments coquilliers (%)	0	0,1	1
Propreté des gravillons (%)	0,2	0,4	1,5
Propriétés mécaniques			
Los Angeles	15	22	30
Propriétés chimiques			
Teneur en soufre total (%)	< 0,1		
Teneur en sulfates (%)	< 0,1		
Teneur en chlorures (%)	< 0,02		

Tableau 1.1 : Caractéristiques moyennes des granulats alluvionnaires [31]

Les principales caractéristiques des granulats alluvionnaires sont leur faible teneur en fines (éléments inférieurs à 80 µm) et leur propreté (équivalent de sable élevé). Leur teneur en fines est inférieure à 4 % et leur équivalent de sable (PS) supérieur à 85 % en moyenne. Le module de finesse des sables alluvionnaires indique une valeur moyenne de 2.4 ce qui est caractéristique d'un bon sable à béton. Concernant les caractéristiques mécaniques, la valeur de l'essai Los Angeles qui est supérieure à 20 indique que les granulats alluvionnaires ont une résistance moyenne à la fragmentation par choc.

Les granulats alluvionnaires sont des matériaux de choix pour la fabrication des bétons hydrauliques et notamment des produits en béton courants. La forme arrondie ou roulée des granulats alluvionnaires confère au béton frais une maniabilité élevée qui facilite le serrage et permet l'obtention d'une compacité élevée.

1.5.2.2. Caractéristiques des granulats concassés

Dans le **tableau 1.2** les caractéristiques des granulats issus de roches massives concassées. Nous nous sommes intéressés aux types de roches les plus couramment utilisées dans l'industrie du béton. Parmi les granulats calcaires, il faut distinguer les calcaires durs des calcaires tendres. En effet, un calcaire dur possède des propriétés très proches d'une roche magmatique ou métamorphique tandis qu'un calcaire tendre présente une absorption d'eau, une sensibilité au gel ainsi que des propriétés mécaniques beaucoup moins favorables à la réalisation d'un béton [31].

Caractéristique	Type de granulat					Nature de la roche															
	Granite	Porphyre	Basalte	Diorite	Quartzite	Marbre	Calcaire														
	Propriétés physiques																				
Masse volumique réelle (tonnes/m ³)	2.6	2.7	2.8	2.5	2.6	2.7	2.7	2.8	2.9	2.6	2.8	2.9	2.5	2.6	2.7	2.5	2.6	2.7	2.2	2.5	2.7
Absorption eau (%)	0.7	0.9	1.3	0.4	0.8	1.2	1.2	1.5	1.8	0.3	0.5	0.7	0.6	0.9	1.4	0.2	0.4	0.7	0.3	0.5	0.7
Sensibilité au gel (%)	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Module de Finesse	2.9	3.1	3.3	2.	2.5	3.2	2.7	3.1	3.7	2.2	2.5	2.9	2.5	3.1	3.6	-	2.5*	-	2.4	2.9	3.6
Coefficient d'aplatissement (%)	11	14	16	13	14	15	11	14	17	8	10	12	14	15	16	7	12	23	1	7	12
Teneur en fines (% <80 µm)	9	11	17	10	14	18	7	9	12	13	13	15	9	12	16	•	10*	•	6	12	19
Équivalent de sable (PS en %)	58	64	71	53	59	71	65	68	70	62	64	68	48	63	75	•	75*	•	67	74	79
Valeur de bleu (g de colorant/kg de fraction 0/2 mm)	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.7
Matières organiques (%)	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif	test négatif
Impuretés (%)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Éléments coquilliers (%)	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet
Propreté (%)	0.3	0.9	1.6	0.6	1.1	2	0.2	0.5	0.9	0.6	1	1.7	0.9	1	1.1	0.7	0.9	1	1.1	2.8	6.2
	Propriétés mécaniques																				
Los Angeles	12	20	32	11	17	25	8	13	17	10	13	16	15	18	25	15	22	32	16	31	49
	Propriétés chimiques																				
Teneur en soufre total (%)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.3	<0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Teneur en sulfates (%)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Teneur en chlorures (%)	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02

* valeur unique

Tableau 1.2 : Caractéristiques des granulats issus des roches massives concassés [31]

Concernant les propriétés physiques, mis à part les calcaires tendres, toutes les roches étudiées ont une masse volumique légèrement plus élevée que celle des granulats alluvionnaires. Parmi ces roches, les basaltes et les diorites se différencient des autres roches par des masses volumiques réelles supérieures. Le coefficient d'absorption d'eau moyen et la sensibilité au gel des granulats concassés de roche massive sont comparables à ceux des granulats alluvionnaires, mis à part pour les calcaires tendres qui sont par définition des roches poreuses. De manière générale, les granulats concassés sont plus anguleux, plus écaillés et plus allongés que les granulats alluvionnaires [32] ; ils ont donc un coefficient d'aplatissement plus élevé.

Concernant la propreté des granulats concassés de roche massive, la valeur de bleu, les teneurs en matières organiques, en impuretés et en éléments coquilliers sont comparables à celles des granulats alluvionnaires. La spécificité des granulats concassés est leur importante teneur en fines (9 à 14 %) et leur équivalent de sable plus faible que celui des granulats alluvionnaires.

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, les granulats concassés de roche massive ont globalement un Los Angeles plus faible que celui des granulats alluvionnaires, ce qui signifie une meilleure résistance à la fragmentation par chocs. Il faut noter que les granulats de basalte et de diorite sont plus résistants que les autres granulats concassés de roche massive. Les granulats calcaires tendres peuvent avoir un Los Angeles supérieur à 30, ce qui est caractéristique d'une roche peu résistante à la fragmentation par chocs.

Enfin, concernant les teneurs en soufre total, sulfates et chlorures, rien ne différencie un granulats concassé de roche massive d'un granulats alluvionnaire.

1.5.2.3. Approvisionnement en granulats et spécificité des granulats concassés

L'utilisation de granulats concassés de roche massive dans l'industrie du béton est liée à la proximité de cette matière première. Lors de la formulation du béton, le problème majeur rencontré est celui de l'importante quantité de fines. En effet, la fabrication d'un sable de concassage génère de 9 à 14 % de fine ($< 80 \mu\text{m}$). Pour diminuer la teneur en fines, les carriers et les industriels du béton emploient différentes méthodes :

- ✓ le carrier défillérise partiellement le sable concassé ;
- ✓ le carrier défillérise totalement le sable concassé qui est ensuite recomposé par ajout de fillers de différentes natures ;
- ✓ le sable concassé est mélangé en usine à un autre sable pauvre en fines.

Le problème posé par l'abondance des fines est encore plus délicat avec les sables concassés de calcaire car ces granulats peuvent produire de nouvelles fines lors du malaxage du béton (le coefficient Los Angeles est une indication de la résistance à l'attrition des granulats).

1.5.2.4. Influence des granulats sur les process de fabrication

De manière générale, les bétons frais de granulats concassés sont moins maniables que les bétons frais de granulats alluvionnaires. Cette remarque est surtout valable pour les bétons frais de granulats concassés de roche éruptive ou métamorphique. Cette moindre maniabilité est due à l'angularité des grains ainsi qu'à leur forme allongée. Pour améliorer la maniabilité et la mise en place du béton frais, il est nécessaire d'augmenter la quantité de liants, la teneur en eau et d'ajouter des plastifiants ou des superplastifiants. L'augmentation de la quantité d'eau peut toutefois être minimisée en ajoutant du sable alluvionnaire de faible granulométrie.

L'influence des granulats sur l'usure du matériel de fabrication (malaxeur, moule, presse ...) est tout à fait différente si on utilise des granulats concassés de roche éruptive ou métamorphique ou si on utilise des granulats concassés de calcaire tendre. En effet, les granulats concassés de calcaire tendre ont un pouvoir abrasif moins important que les granulats concassés de roche éruptive, métamorphique ou de calcaire dur. Dans le cas des granulats de calcaire tendre, l'usure des malaxeurs, des presses et des moules est comparable à celle observée lors de l'utilisation des granulats alluvionnaires.

Dans le cas du sable du basalte concassé, qui est une des roches les plus abrasives utilisées dans l'industrie du béton, on observe que l'usure des malaxeurs et des presses est trois fois plus importante et que celle des moules métalliques est quatre fois plus importante que l'usure observée dans le cas des granulats alluvionnaires. En utilisant des marbres, des diorites ou des porphyres concassés, des industriels du béton ont observé une usure du matériel liée à la dureté des roches deux fois plus importante d'avec les granulats alluvionnaires. Même pour la production de dalles qui est effectuée à faible cadence, les moules s'usent plus vite. Il est à noter, à titre de comparaison, que l'emploi de granulats alluvionnaires concassés (ayant des grains plus anguleux que les granulats alluvionnaires ou concassés) provoque une usure du matériel supérieure de 10%.

1.5.2.5. Influence des granulats sur les caractéristiques des produits

Dans l'industrie française du béton, les granulats concassés de roches éruptives, métamorphiques et calcaires sont utilisés dans la fabrication de tous les produits en béton de consommation courante tels que les blocs, les pavés, les bordures, les regards, les dalles de voirie, les entrevous, les poutrelles... À condition de réduire les teneurs en fines de ces granulats, ceux-ci peuvent être utilisés en totalité de la fraction sable ou de la fraction gravillon.

Les caractéristiques mécaniques des produits obtenus sont souvent supérieures de 10 à 20 % à celles des produits fabriqués avec des granulats alluvionnaires. Ceci est dû à la dureté des granulats concassés qui en font des granulats particulièrement intéressants pour la production de produits de voirie par exemple.

L'utilisation des granulats concassés peut également être liée à la nécessité d'obtenir des caractéristiques précises au niveau de l'aspect ou de la teinte des produits. Par exemple, l'utilisation de calcaire concassé permet d'obtenir des produits de teinte plus claire. Pour certains industriels la teinte ou l'aspect des produits constitue la raison majeure qui justifie l'utilisation des granulats concassés. Lors de la fabrication des blocs et des entrevous, l'utilisation de granulats concassés favorise la cohésion du béton frais dans les moules. En outre, les blocs et les entrevous ne nécessitent pas de finition de surface et les enduits sont plus faciles à appliquer sur les faces

des blocs de granulats concassés. Les blocs et les entrevous sont donc, du point de vue technique, des produits très favorables à l'utilisation de granulats concassés, ce qui explique la forte proportion de granulats concassés utilisés pour leur fabrication.

1.5.3. Emploi du sable de carrières dans le béton hydraulique

En les récentes années, il a eu lieu un intérêt croissant de l'utilisation du sable concassé obtenu des carrières de calcaire dans quelques pays où le sable alluvionnaire n'est largement disponible. D'ailleurs, la demande en agrégats pour produire le béton est encore élevée pendant que les ressources naturelles sont en décroissance.

Une large quantité de matériau à la dimension de filler est produite durant le processus de concassage des calcaires peu solides en particulier, qui peut être utilisée comme agrégat. L'utilisation de ce matériau est bénéfique pour l'amélioration du béton de sorte à décroître le contenu en air. Pour plusieurs années, le calcaire a été de plus en plus utilisé dans le béton comme gros agrégat, filler ou constituant principal du ciment. Il est utilisé dans le béton haute performance comme dans celui d'ordinaire. Comparé au béton ordinaire, avec le même rapport E/C et même ciment, le béton avec une teneur élevée de filler et une répartition convenable, possède généralement des caractéristiques améliorées dans la résistance.

Certaines quantités de fillers dans le béton favorise l'amélioration de cohésion. Cependant, une quantité excessive de fillers tend à croître le besoin en eau et dégrade l'adhérence agrégat-pâte du ciment. Les fillers aident à réduire le contenu total d'air dans le béton. Par conséquent, ça va contribuer à améliorer la qualité du béton. La poussière du calcaire concassé est utilisée comme matériau filler dans le ciment, ou agrégat pouvant avoir quelques effets bénéfiques sur le béton dépendant du taux de substitution et de la composition chimique de la poussière.

En vue de ceci, il est donc nécessaire de contrôler le contenu d'agrégat en argile, limon et la poussière fine. ASTM C 33 et BS 883 ont mis des limites maximales entre 3 et 15 % de la masse du sable, selon le type du matériau.

L'effet de l'ajout de fillers calcaires au ciment utilisé dans la confection de mortier et béton, à l'état frais et à l'état durci, a été le sujet de plusieurs recherches durant des années ; mais des travaux moindres, ont été fait pour étudier l'effet de l'ajout fillers calcaires au sable, sur les propriétés du béton.

Les granulats concassés issus de roche massive conviennent à la confection des bétons hydrauliques et à l'exécution des travaux de viabilité courants [28].

Les bétons confectionnés à partir de granulats concassés de roche massive ont une moins bonne maniabilité que les bétons de granulats alluvionnaires. Ceci est dû à la nature anguleuse,

écaillée et allongée de grains de granulats concassés [32]. Pour atteindre une maniabilité comparable à celle des bétons de granulats alluvionnaire, il est nécessaire d'apporter une quantité d'eau supérieure au mélange et d'augmenter le dosage en ciment dans des proportions variant de 10 à 30 kg/m³ [33].

Toutefois, la demande en eau des bétons de granulats concassés peut être réduite en utilisant du sable alluvionnaire comme granulat fin. L'addition d'un plastifiant est également recommandée toujours dans le but d'améliorer la maniabilité des bétons frais [34].

Concernant la résistance mécanique, les bétons fabriqués avec des granulats concassés de type basalte ont généralement des résistances à la compression supérieures à celles des bétons de gravillons alluvionnaires [35, 36].

Par ailleurs, à résistance à la compression égale, les résistances à la flexion des bétons de gravillons concassés peuvent être entre 10 à 20 % supérieures à celles des bétons de gravillons alluvionnaires [36].

D'après **Coquillat et Lesage** [37], en France, Les teneurs en fines déterminées expérimentalement comme optimales sont très voisines de celles résultant de la production industrielle des sables, résultat économiquement très intéressant. Pour 9 ou 10 sables sur 12, les résistances mécaniques des mortiers sont égales ou supérieures à celles du mortier normal. Pour les sables de basalte, de gneiss, d'andésite, de microdiorite, la résistance du mortier à fort dosage en ciment est supérieure de 20 à 25 % à celle du mortier normal.

Ahmed E.Ahmed et Ahmed A.El-Kourid [38] ont étudié l'influence des particules fines (fillers) de deux sables sur la performance du béton frais et durci. Ces sables utilisés dans le béton à Riyadh, la capitale de l'Arabie-Saoudite, sont soit du sable naturel d'oued ou fabriqué issu des pierres concassées. En général, les deux sables sont dérivés des roches calcaires. Les résultats indiquent que le besoin en eau croit rapidement quand le remplacement des fines dépasse plus de 5 % pour le béton de sable naturel et plus de 15 % pour le béton de sable concassé. Cependant, la résistance à la compression pour les bétons de même consistance décroît linéairement en augmentant le pourcentage des particules fines en substitution (**figures 1.9 et 1.10**). La résistance à la flexion et d'adhérence en ont la même allure. Pour les bétons ayant le même rapport E/C, l'incorporation des particules fines provoque des réductions significatives du slump. En revanche, la résistance à la compression du béton au sable naturel n'était pas affectée d'une façon significative par l'incorporation des particules fines, le béton au sable concassé a indiqué une augmentation dans la résistance. Les résultats de cette étude indiquent aussi que les taux limites de fillers inférieures à 75 µm sont de 5 à 10 %, respectivement, pour les bétons à sable naturel et à

sable concassé de la région de Riyadh. Quand l'ouvrabilité de ces bétons est améliorée par des réducteurs d'eau, l'augmentation de ces limites de 7 à 15 %, respectivement, n'aura pas d'effets significatifs sur l'air occlus, la résistance à la compression et la contrainte d'adhérence du béton ; et par conséquent, ça sera acceptable.

Le retrait de dessiccation de bétons à sable naturel et à sable concassé de même slump (100 mm) croit avec l'augmentation de substitution de fillers. Aucune différence n'a été observée entre les valeurs du retrait pour les deux bétons ayant la même substitution.

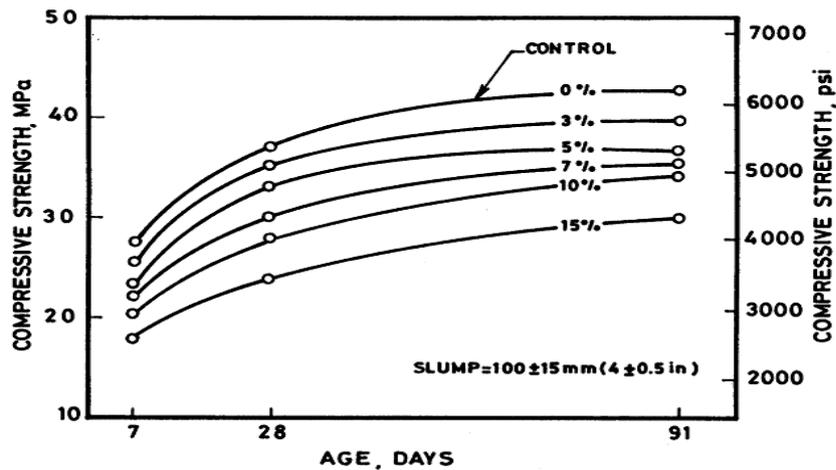


Figure 1.9 : variation de la résistance à la compression en fonction d'âge du béton à sable naturel avec un slump de 10 mm [38]

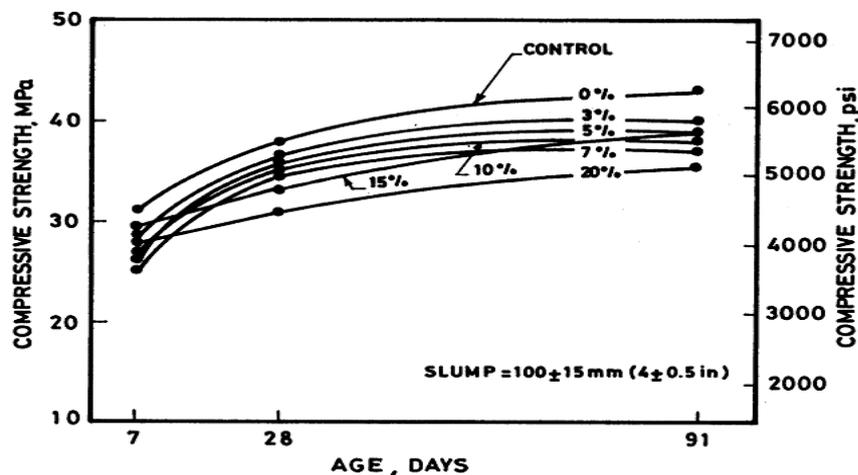


Figure 1.10 : variation de la résistance à la compression en fonction d'âge du béton à sable concassé avec un slump de 10 mm [38]

Sadhouari et al [39], de l'université d'Oran, ont conclu que la présence des fines en proportion modérée (entre 5 et 15 %) dans un sable est une nécessité (figure 1.11), les résultats obtenus avec différents pourcentages de fines, ont mis en évidence l'intérêt de l'ajout des fillers calcaires pour l'amélioration des performances mécaniques des mortiers et bétons. Donc, le sable

de concassage constitue une solution idéale au problème d'approvisionnement à condition qu'il soit corrigé en fines ou combiné avec un sable de mer.

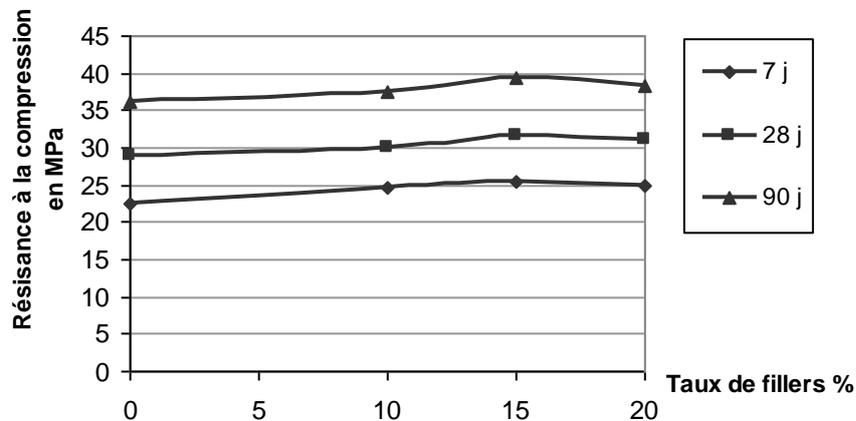


Figure 1.11 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers (Kristel). [39]

Hachaichi et Behim [40], de l'université d'Annaba ont montré que la substitution du sable naturel par les déchets de concassage ne répond pas uniquement à un souci environnemental mais contribue à l'amélioration de certaines propriétés mécaniques notamment la résistance en compression et physiques. La substitution du sable roulé par le sable concassé donne des résultats intéressants, notamment en compression. La présence des fines calcaires améliore la compacité du mélange par effet de remplissage et accélère l'hydratation du ciment à court terme par effet physique.

Makhloufi et al [41], de l'université de Laghouat, ont fait une étude aboutissant à la conclusion suivante: Les bétons fabriqués à partir des granulats calcaires concassés du Turonien de l'Atlas Saharien Central, ont un comportement mécanique qui se rapproche de celui des bétons fabriqués par des granulats alluvionnaires siliceux et silico-calcaires, puisque pour des maniabilités plastiques du béton frais, et après 28 jours de conservation dans un environnement ambiant, la résistance à la compression peut atteindre 25 MPA.

Alshahwany [42], après une recherche expérimentale sur, l'influence des fillers calcaires comme substitution partielle au sable sur les propriétés du béton à base agrégats de rivière, a conclu que l'affaissement décroît avec l'augmentation du taux de filler calcaire, alors que le besoin en eau croît légèrement avec l'augmentation de ce dernier, tandis que la résistance à la compression du béton croît avec l'augmentation du taux de substitution de filler dans le sable ; ainsi le béton constitué avec 20 % de substitution a donné la valeur élevée de résistance de compression. De plus, le remplacement partiel du sable par le filler calcaire à un taux de 20 % fait augmenter la résistance à la traction par fendage.

Kherbache et al [43], en étudiant les granulats produits par deux carrières de la wilaya de Bejaia, sont arrivés aux conclusions suivantes :

Les sables de carrières peuvent être utilisés dans les bétons de structure si la qualité et le taux de fines sont conformes aux spécifications en vigueur et que la composition optimale est à 10 % de fines pour les résistances à la compression. Par contre pour le retrait c'est l'inverse (retrait maximal à 10 % de fines) ; Afin de concilier résistance à la compression importante et retrait faible, on peut admettre que le taux de fines de 15 % est acceptable à condition d'utiliser des adjuvants et un meilleur contrôle des fines argileuses (essai au bleu de méthylène).

Ćurčić et al [44], en utilisant différents types d'agrégats (de rivière, calcaire, andésite, diabase et basalte, ont tenté d'étudier l'influence de ces agrégats sur la consistance du béton, ont trouvé que les fines des agrégats concassés ont une importante influence sur la consistance puisqu'ils font diminuer l'ouvrabilité du béton .En revanche, la substitution avec les agrégats de rivière améliore l'ouvrabilité. D'autre part, le type d'agrégat a aussi une influence sur la consistance. On peut citer leurs conclusions dans les points suivants :

- ✓ Les consistance obtenues des deux méthodes slump test ou Vébé ont une excellente concordance.
- ✓ Quand le rapport E/C croît de 0.45 à 0.65, la consistance du béton change de ferme à liquide sans se soucier du type d'agrégat.
- ✓ Dans les mélanges aux agrégats concassés, les fines de pierres concassées ont une influence défavorable sur la consistance du béton à l'état frais.
- ✓ Les imperfections des fines des agrégats concassés disparaissent après sa substitution avec celles d'agrégat de rivière.
- ✓ Au rapport E/C de 0.55, il y a une importante influence du type d'agrégat sur la consistance du béton, tandis que au rapport E/C de 0.65, cette influence se minimise.
- ✓ Pour le béton confectionné d'agrégats concassé avec des fines de rivière, l'influence du type d'agrégat croît avec l'augmentation du rapport E/C.
- ✓ Pour le béton moderne, l'usage des superplastifiants paraît nécessaire.

Ltifi et al [45], ont mené une étude sur l'effet de la substitution totale ou partielle de sable alluvionnaire par le sable de concassage sur le comportement de béton hydraulique et notamment sur la résistance à la compression. La conclusion de cette étude est que les résistances à la compression des différents bétons étudiés sont dans la même fourchettes de résistance (± 10 MPa), ce qui conduit à penser que le béton calcaire ne se distingue pas particulièrement, sur cet aspect, des bétons classiques. Ainsi, on peut conclure que ces matériaux locaux (sables de concassage)

peuvent remplacer avantageusement le sable siliceux. Mais à l'influence importante de pourcentage des fines, on peut bien améliorer la qualité du béton calcaire en essayant d'enlever les fines, une voie possible mais délicate.

D'après **Sven-Henrik** [46], le contenu en fines du sable concassé est encore important. Il est souvent très élevé dans le sable concassé que le sable naturel (alluvionnaire) parce que les fines de ce dernier ont été lavées au cours de sa production naturelle. Les normes industrielles, comme ASTM C33 et les spécifications d'agrégats des producteurs du béton, permettent des taux limités de fines dans le sable. Malgré que des recherches récentes et des exemples commerciaux davantage indiquent les avantages d'utiliser des taux élevés des fines, le taux optimal des fines varie en fonction du type du béton à fabriquer de ces sables. Désormais, il y a un besoin de séparer les fines du sable puis les ajouter, sans se soucier du taux désiré. Une recherche du Chili (CDT - Corporación de Desarrollo Tecnológico) a été faite pour établir le taux optimal des fines pour différents types de propriétés du béton (**figure 1.12**).

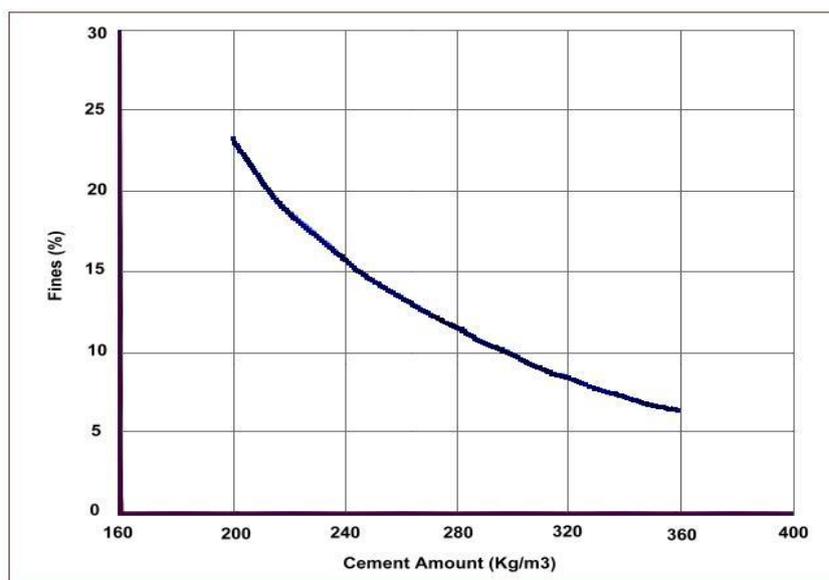


Figure 1.12 : le taux optimal des fines pour différents types de propriétés du béton - [46] tiré de CDT

A titre d'exemple, on présente ci-dessous, une méthode révolutionnaire pour la solution du problème d'excès des fines dans le sable concassé, créée par la compagnie Metso minerals. [46]

Les équipements de Metso minerals pour le sable ont été basés rationnellement sur l'efficacité des systèmes de concassage et filtrage pour réduire les pertes de production et offrir un produit de qualité stable. Cela permettra aux producteurs de minimiser les frais de production tout en préservant un rendement élevé de produits.

Pour assurer une bonne qualité de sable concassé, tout le matériau doit passer au moins une fois par le concasseur. Typiquement, le sable concassé contient en excès de matériau de 0 à 0.25 mm en comparant avec les spécifications de la courbe enveloppe de granulométrie largement utilisée dans l'industrie. Cette solution est tout à fait loin des pratiques opérations de classification pour la plupart des tamis vibrants, avec la méthode traditionnelle d'enlever ces fines à travers les équipements de processus de mouillage comme les roues de sable ou les hydrocyclones. Les séries de Nordberg AC de classification par classificateur d'air emploient l'air au lieu de l'eau pour enlever les fines du sable concassé. Les avantages sont à la fois :

1. pas besoin d'eau ou traitement d'eau qui coûte cher.
2. un produit sec veut dire une économie en production car il n'y a pas besoin de séchage du produit.

1.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a tenté de faire une synthèse bibliographique sur les constituants du béton hydraulique, notamment le sable de concassage, en présentant certains résultats de recherches faites en Algérie et à l'étranger, relatifs à la valorisation de ce sable comme substitution au sable alluvionnaire dans la fabrication du béton.

Nous nous sommes rendus compte qu'il y a une bonne possibilité de remplacement du sable alluvionnaire par le sable concassé, ainsi d'autres effets positifs sur le béton. Par conséquent, le sable concassé constitue une bonne alternative en matière de manque d'approvisionnement en sable alluvionnaire. Les résultats obtenus par plusieurs chercheurs sur le béton à base de sable de carrière apparaissent prometteurs, mais des études approfondies sur les propriétés de ce béton s'imposent davantage en vue d'une meilleure utilisation du sable de concassage dans les bétons et les mortiers.