**Chapitre 1: Le béton**

**1. - INTRODUCTION**

L'idée d'associer le fer à des matériaux n'offrant pas de résistance à la traction est très ancienne, On a retrouvé dans les ruines du colisée des blocs reliés entre eux par des barres scellées au plombs. Les architectes des cathédrales gothiques ont employé également des tirants métalliques pour absorber la poussée des ogives (arc diagonal)

 A la colonnade (palais) du Louvre Claude PERRAULT (médecin et architecte français) en 1667 réalisa des écartements de colonnes plus importants qu'auparavant en associant aux pierres appareillées des fers sous forme d'armatures longitudinales

Ces fers équilibraient l'effort de traction mais inopérants face aux efforts tranchants

Plus tard au Panthéon ( temple de Paris), RONDELET(architecte) qui travailla avec SOUFFLOT (architecte) compléta ce procédé en pratiquant des évidements dans la pierre pour y loger des étriers en fer forgé constituant ainsi un réseau d'armatures très voisin de celui utilisé actuellement en béton armé.

Les premières réalisations en béton armé datent du milieu du XIX ème siècle.

\* En 1849. MONIER, un jardinier de VERSAILLES fit des caisses à fleurs en ciments armé

\* A l'exposition de PARIS de 1855, LAMBOT (ingénieur) présente un bateau de chaux hydraulique armé d'un treillis de fers.

\* En 1861 COIGNET réalise en particulier la terrasse de St-Denis qui est un plancher en béton armé de chaînes et il publie un ouvrage intitulé "les bétons agglomérés appliqués à l'art de construire

 Le premier brevet de LAMBOT pour une "association fer et ciment" date de 1855, donc c’était le premier français inventeur de ciment armé.



De 1867 à 1880 MONIER considéré l’inventeur du béton armé ,prend toute une série de brevets pour l'utilisation du  nouveau matériau dans les constructions diverses : bassins, tuyaux, réservoirs; poutres. Ces brevets sont achetés en 1884 par une firme allemande

En fait il faut attendre les travaux de Françoit HENNEBIQUE à la fin du siècle pour que le béton prenne vraiment son essor avec l'élaboration des premières méthodes de calcul et les premières théories et dont l'une des principales réalisations en 1899 le pont de CHATELLERAULT (une commune au centre ouest de la France) avec les travées 40 - 50 - 40 m.

 A partir de 1900 la construction en béton armé prend un essor considérable.



Le XX ème siècle va voir le développement considérable du béton et, parallèlement de ses techniques ;

* usage croissant des adjuvants,
* béton prêt à l'emploi,
* matériel de mise en  oeuvre,
* mise au point du béton précontraint par FREYSSINET

Plus récemment, les progrès réalisés dans les bétons de hautes performances lui donnent ses lettres de noblesse dans le bâtiment, avec une réalisation comme l'Arche de la Défense (France), ou dans les travaux publics; pont de l'ile de Ré (France) et les viaducs de Coatzacoalcos (Méxique) ou Tampa Bay (port de Tampa) en Floride

Face à cet engouement et aux developpements parfois dangereux qu'il entraîne il est necessaile de reglementer la conception, le calcul et la construction des ouvrages

A la meme époque étaient publiés les premiers reglements. Les écoles allemandes, américaine, autrichiennes, scandinaves et françaises poursuivent leurs recherches jusqu'à la seconde guerre mondiale sans se rendre compte cependant que les résultats enregistrés sur les édifices touchés , se traduisent par des moditications profondes des principes de calcul

Seule l'école soviétique introduisent dès 1937 le calcul à la rupture.

1. **LES REGLEMENTS ALGERIENS DU BETON ARME**

Un seul règlement de calcul couvre actuellement tous les domaines de la construction.

C'est le CBA 93

1. **- QU'EST-CE QUE LE BETON ?**

Le béton est mélange de plusieurs composants ; ciment, eau, granulats et, le plus souvent, adjuvants, qui doivent constituer un ensemble homogène. Les composants sont très differents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m3, les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0,5 mm (grains les plus fins du ciment)à 25 mm (gravillons).

La pâte (ciment + eau), élément actif dans le béton, enrobe les granulats (éléments en principes inertes) L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains. La pâte joue le rôle de lubrifiant et de colle.

Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant :

**Constituants Eau Air Ciment Granulats**

Volume (%) 14-22 1-6 7-14 60-78

Poids (%) 5-9 9-18 63-85

Les qualités du béton sont bien connues. Cest un matériau facile à mouler quelles que soient les formes, à l'épreuve du temps, économique, résistant au feu et nécessitant peu d'entretien

Matériau composite, mis en oeuvre de multiples manières, il peut répondre à un grand nombre de spécifications :

* résistance mécanique, notamment à la compression,
* isolation thermique et phonique,
* étanchéité, aspect, durabilité.

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés :

 \*d'une part à l'état frais, alors qu'il est plastique et qu’on peut le travailler;

 \*d'autre part, à l'état durci, alors que sa forme ne peut être modifier mais que ses caractéristiques continuent à évoluer durant de nombreux mois, voire des années.

**4.1. Le béton frais:**

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend apte à remplir n’importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudier en conséquence et que les moyens de mise en oeuvre soient appropriés,

L'ouvabilité caractérise l'aptitude d'un béton a remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures

De nombreux facteurs influent sur l'ouvlabilité tels:

* nature et dosage en cilnent,
* forme des granulats, granulométrie,
* emploi des adjuvants et,
* bien entendu, dosage en eau

Il ne faut cependant pas considérer que le dosage en eau peut être augmenter au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'améliorer l'ouvrabilité.Un excès d'eau se traduit, entre autres inconvenient, par un phénomène de "ressuage", qui est la création à la surface d'une pièce de béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation. Les autres conséquences sont:

* la dirninution de la compacité et, corrélativement, des résistances,
* une porosité accrue,
* un risque de ségrégation des constituants du béton,
* un retrait augtmenté,
* un état de surface défectueux se traduisant notamment par le bullage.

La teneur en eau doit être strictement limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité et d’hydratation du ciment.

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance, sa mesure peut être effectuér facilement sur le chantier avec **la méthode du cône d'Abrams ou "slump test",** qui est un essai d’affaissement d'un volume de béton de forme tronconique, mesuré conformément à la norme NF P 18451

Selon la valeur d’affaissement obtenue, le béton est classé de la façon suivante

|  |  |
| --- | --- |
| Consistance du béton | Affaissement au cône (cm) |
| Ferme F) | 0 - 4 |
| Plasti ue (P) | 5 - 9 |
| Très lasti ue TP | 10- 15 |
| Fluide (FI) | > 16 |

**4.2. Le béton durci:**

**4.2. 1. la porosité:**

La caractéristique essentielle du béton durci est la porosité - rapport du volume des vides au volutne total.

Les etudes de FERET avaient déjà établi le lien entre la porosité du béton et sa résistance. On a pu voir depuis l'importance de cette caractéristique sur la résistance du béton aux agents agressifs, sur la carbonatation en matière de protection des armatures, et sur la tenue au gel, c’est donc le facteur essentiel de la durabilité du béton

La rechetche d'une porosité minimale doit nécessairement passer par:

* l'augmentation de la compacité du béton, grâce à une bonne composition du béton et à des moyens de mise en oeuvre adaptés; les compacités réellement atteintes sur chantier ne dépassent guère 0,850 dans 1 m3 de béton très bien préparé et vibré par des moyens puissants.
* il existe encore 150 litres d'air ou d'eau, constitués notamment par des canaux extrèrmement fins, répartis dans la pâte de ciment durcie (capiliaires),
* l'augmentation du dosage en ciment a une influence favorable sur la diminution de la porosité

- les hydrates formés par l'hydratation du ciment ont un rôle essentiel de colmatage des capillaires

On ameliore la compacité du béton en jouant sur la granulométrie des granulats dans la fraction des éléments fins, et sur la réduction d'eau. On fait appel à des fillers, type fumée de silice, qui nécessitent l'emploi de superplastifiants pour obtenir une bonne ouvrabilité avec un faible dosage en eau

La faible porosité d'un béton présente de nombreux avantages déterminants pour sa durabilité

* Un béton en contact avec un milieu agressif (eau pure, eaux séléniteuses, eau contenant des acides organiques) subira une attaque beaucoup plus lente si les capillaires du béton sont moins nombreux et plus fins.

- Dans le cas du béton armé, une faible porosité est indispensable, pour protéger les armatures contre l'oxydation, le ciment Portland dégageant de la chaux au cours de son durcissement.l'acier est protégé contre l'oxydation tant qu'il est baigné par cette chaux ( pH basique ) mais si elle se carbonate au contact de l'air pour revenir à l'état de carbonate de calcium (pH acide ) l'acier redevient vulnérable. En retardant cette carbonatation une faible porosité assure la protection des armatures.

Pour les bétons devant présenter une forte étanchéité (réservoirs, piscines), une faible porosité évitera pratiquement toute migration d'eau au travers des capillaires.

**4.2.2. - Les résistances mécaniques :**

Une bonne résistance à la compression est la qualité bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette résistance est généralement caractérisé par la valeur mesurée à vingt-huit jours.

On a pu voir précédemment que la résistance dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier la classe et le dosage du ciment, la porosité du béton et le facteur E/C, rapport du dosage en eau au dosage en ciment

Parmi les formule qui permettent de prévoir les résistances, celle de FERET est la plus connue

# R = k (C / C + E + V ) 2

R: résistance

k :coefficient dépendant de la classe du ciment, du type de granulats et du mode de mise en oeuvre,

C: dosage en ciment,

E :dosage en eau,

V: volume d'air subsistant.

Cette formule montre l'intérêt que présente la diminution de la quantité d'eau de gâchage et de l'air, ce qui réduit la porosité et par conséquent augmente la résistance.

Les résistances mécaniques du béton sont contrôlées par des essais destructifs ou non destructifs.

** Les essais destructifs**

La résistance à la compression peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes géneralement cylindriques (diamètre 16 cm, hauteur 32 cm), confectionnées avec le béton destiné à Itouvrage à contrôler.

** Les essais non destructifs**

Ils peuvent utiliser le scléromètre appareil basé sur le rebondissement d'une bille d'acier sur la surface à tester, ou des instruments de mesure de la vitesse du son au travers du béton (4 000 m/s pour un béton courant)

**4.2.3 - Variations volumiques**

Au cours de son évolution, le béton est l'objet de modifications physico-chimique qui entrainent des variations dimensionnelles

**\*Le retrait hydraulique avant prise et en cours de prise:**

Il est dû à un départ rapide d'une partie de l'eau de gâchage, soit par évaporation (rapport surface/volume des pièces élevé, atmosphère sèche, temps chaud, vent violent), soit par absorption (coffrage, granulats poreux).

 Une surface de béton frais peut évaporer plus d'un litre d'eau par m2 et par heure.

Le retrait sera limité par une bonne compacité du béton ou par un traitement de cure film freinant l'évaporation).

**\*Le retrait hydraulique à long terme:**

Il est dû à un départ lent de l'eau en atmosphère sèche. Il varie suivant les ciments (nature,finesse) et il est proportionnel au dosage en volume absolu de la pâte pure

**\*Le retrait thermique:**

est dû à des baisses rapides de températures provenant :

 soit du ciment lui-meme de son hydratation aux premiers âges, qui

provoque une élevation de température, suivi de son refroidissement, soit des variations climatiques du

Ces deux causes additionnent parfòis leurs effets Les effets de la première peuvent etre réduit en utilisant des ciments à faible chaleur d'hydratation

 L’ordre de grandeur du retrait total est de 200 à 300 mic.m/m pour un béton usuel

**-Les déformation sous charges instantanée:**

Comme tous les autres matériaux, le béton a un comportement élastique linéaire pour des charges modérées de courte durées c'est à dire que ses déformations sont proportionnelles aux charges appliquées.

Le module d'elasticité instantané Ei au jour j d'un béton courant est lié à sa résistance en compression au meme âge par une relation empirique telle que

Ei=11000$\sqrt[3]{Rcj}$ (MPa) selon (règles BAFL 83)

 Rcj : résistance à la compression au jour j.

 Ei: est le plus souvent compris entre 30 000 et 35000 MPa

**-Les deformations sous charge de longue durée : Le Fluage**

-Au-delà d’une certaine charge (approximativement la moitié de la résistance ultime à la compression): le béton se comporte comme un corps plastique. Après suppression de la charge, il subsiste une déformation résiduelle permanente, ce qu'on appelle le phénomène de fluage.

On admet que cette déformation due au fluage, qui se poursuit durant de nombreux mois( voire des années), est de l'ordre de trois fois la déformation instantanée

**4. - DOMAINES D'EMPLOI**

Le béton qu’il soit armé ou non, est presentou l’on construit, et il doit cette presence à ses nombreuses qualités.

-Sa durabilité: le béton résiste très longtemps aux sollicitations physico-chimiques liées aux conditions d’emploi, aussi bien qu'à l'environnement.

-Ses caractéristiques lui permettent de répondre aux multiples exigences imposées au batiment: sécurité, stabilité statique et dynamique, tenue au feu, étanchéité, thermique, acoustique et bren entendu esthétique.

-Le béton est un matériau très divers qui sait adapter ses performances selon son emploi.

-Le béton cst aussi ce matériau moulable susceptible d'épouser toutes les formes, des plus massives aux plus délicates.

**4.1 Le bâtiment:**

Le béton tient une place essentielle dans l'urbanisme moderne. Cela semble normal lorsqu'on considere sa participation dans la construction de logements . pour les murs, 70 % des techniques en individuel, plus de 80 % en collectif pour les structures; pour les planchers le béton est pratiquement le matériau exclusif. Le béton s’est également largement imposé dans les autres secteurs de la construction bureaux. hôpitaux, locaux scolaires, ainsi que dans les grands édifices publics et les bâtiments industriels.

**4.2 Les travaux publics:**

**4.2. l.- Les ponts**

Les progrès techniques, et en paniculier l'évolution des caractéristiques du béton, permet tent de réaliser des portées atteignant 500 m pour les ponts haubanées.

**4.2.2.- Les tunnels**

Pour les grands tunnels, le béton est soit coulé en place, soit utilisé dans des voussoirs préfabriqués.

**4.2.3.- Les barrages**

Les grands ban ages sont le plus souvent en béton permettant des implantations dans les sites les plus difficiles

**4.2.4.- Les routes**

La chaussée béton prend une part de plus en plus importante dans les grandes voiries routières et auto-routiéres, grâce au développement de techniques moderne. béton armé continu- dalle épaisse, traitement de surface.



**4.2.5. - Autres ouvrages**

Il faut également citer les ouvrages hors du commun . structures offshore ou certaines cejurales nucléaires, dont les exigences requièrent des bétons aux caractéristiques mécaniques et la durabilité élevées

1. **- DES BETONS ADAPTES AUX BESOINS**

les progrès accomplis depuis quelques décennies permettent une très bonne adaptation du béton aux diverses exigences des utilisateurs. Tous les ouvrages réalisés aujourd'hui en béton, arrné ou non, bénéficient de bétons formulés pour répondre aux contraintes du chantier, et mis en oeuvre grâce à des techniques en évolution constante : vibration, traitement thermique, traitements de surface.

Parmi les bétons très utilisés, on peut citer

**5.1. - Les bétons apparents**

Les propriétés architecturales du béton permettent de jouer sur les trois facteurs de l’apparence.

-la teinte est apponée par le choix des composants (ciments, sables, gravillons et éventuellement pigments)

-l'aspect résulte de la variété des matériaux et de leur traitement, qui donne à la surface du béton une texture plus ou moins lisse, des reliefs qui font jouer la lumière;

-la forme a pu se développer dans toute sa variété grâce à la plasticité du béton et à l'emploi de coffrages ou de matrices qui permettent de mouler le béton au gré de l'imagination du concepteur

**5.2. - Les bétons légers**

L’interet des bétons légers réside dans le gain important qu'on peut réaliser sur le poids propre de l'ouvrage .Les bétons leger présentent des masses volumiques qui vont de 300 à 1 800 kg/m3. contre 2300 kg/m3 pour un béton classique.

Les bétons légers sont obtenus en jouant sur la composition (bétons caverneux) ou sur l'emploi de granulats allégés (argile expansé, polystyrène expansé, liège) On peut également créer des vides par une réaction provoquant un dégagement gazeux; c'est le cas du béton cellulaite.

**5.3. - Les bétons lourds**

A l'inverse, l’emploi de granulats très denses (barytine, magnétite) permet la réalisation de bétons de masse volumique dépassant 3 000kg/m3. Ces bétons sont utilisés dans la protection contre les radiations ou pour réaliser des culées, des contrepoids, etc.

**5.4. - Les bétons Hautes Performances (BHP)**

Ces nouveaux bétons atteignent des résistances de plus de 100MPa, grâce à l'emploi de fines (fumée de silice) et de superplastifiants. Leur très forte compacité leur confère une très grande durabilite qui, jointe aux résistances élevées, les privilégie pour les ouvrages très sollicités

**5.6. - Les bétons de fibres**

Les diverses fibres sont utilisées soit pour améliorer les résistances en traction du béton (fibres de verre ou de métal), soit pour s'opposer à la fissuration de surface (fibres de polypropylène) Leurs applications sont nombreuses : élérnents rapportés en réhabilitation, dallages industriels, pièces minces architectoniques, éléments décoratifs, bardages, tuyaux.

 **6. - COMPOSITION DES BETONS COURANTS**

Le béton est le mélange dont la composition a une profonde influence sur ses caractéristiques, mais si les caractéristiques attendues sont la plupart du temps bien définies, la mise au point du béton approprié peut s'avérer plus délicate.

Les paramètres sont en effet nombreux

-Les données du projet caractéristiques mécaniques, dimensions de l'ouvrage, ferraillage.

 -Les données du chantier : matériel de mise en oeuvre, conditions climatiques.

-les données liées aux propriétés du béton : maniabilité, compacité, durabilité, aspect.

On mesure donc l'importance de l'étude de la composition du béton, d’autant plus nécessaire que les caractéristiques requises sont élevées.

Caractéristiques recherchées pour un béton :

 **6.1. - A l'état frais :**

**La maniabilité,** propriété du béton caractérisé par des mesures de consistance, est indispensable pour permettre la mise en oeuvre du béton dans les moules ou les coffrages, dont les formes sont parfois complexes.

 Elle doit également permettre d’assurer la compacité du béton dans l’ouvrage, et le bon enrobage des armatures du béton armé, il ne faut pas perdre de vue que la maniabilité doit être adaptée aux moyens de mise en oeuvre du chantier • un béton de consistance très ferme necéssite des moyens de vibration appropriés.

**6.2. - Pour le béton durci :**

**La porosité** (pourcentage des vides rapporté au volume total) est essentielle, car elle conditionne les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton.

\***La résistance mécanique** est un critère souvent déterminant, surtout la résistance à la compression

\***La durabilité** est liée à la résistance aux agressions physico-chimiques du milieu environnement (effet du gel, pollution atmosphérique...) et aux sollicitations mécaniques de l'ouvrage.

**6-3. - Comment déterminer la composition du béton ?**

L'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par la mise au point de compositions qui sont aussi nombreuses que le sont les cas d'emploi du béton.

Cette multicité consiste toute la difficulté de la détermination de la composition optimale.

C'est la raison pour laquelle la démarche retenue comporte le plus souvent deux phases:

**1.Approche d'une composition:**

\*Soit de façon graphique à partir des méthodes telles que celle de FAURY ou de DREUX.

\*Soit de façon expérimentale (par exemple à partir de la méthode LCPC de BARON et LESAGE).

 Il faut préciser que ces différentes méthodes sont basées sur la recherche d'une compacité maximale conformément aux théories de CAQUOT sur la composition granulaire des mélanges.

**2.La deuxième phase:** consiste à ajuster expérimentalement cette composition en fonction des resultats obtenus par des essais effectués en laboratoire (essais d'étude) ou dans les conditions du chantier (essais de convenance).

**7. - L'APPROCHE DE LA COMPOSITION**

**7. 1 Le Ciment :**

Le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recher chées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs, apparence) et de la nature des autres composants (granulométrie des granulats) Dosage en ciment : les critères bien comprendre le caractère primordial du dosage en ciment, il faut rappeler que celui ci remplit deux fonctions essentielles dans le béton:

-La fonction de liant :

Elle est déterminante dans la résistance du béton, qui dépend de la nature du ciment, de sa propre résistance et de l'évolution de son durcissement.

* La fonction filler :

Le ciment complète la courbe granulomètrique du béton dans les éléments fins.

Il faut noter que le développement dans le temps des hydrates du ciment colmate progressivement les capillaires, contribue à diminuer la porosité d'ensembles du béton

et améliore notablement sa durabilité.

Le dosage en ciment est le choix délicat qui dépend de plusieurs critères tels que le type de béton, la destination de l'ouvrage, la résistance requise, les granulats utilisés.. Dosage en ciment et taille des granulats il existe des formules donnant des dosages minimaux en ciment selon le diamètre maximal des granulats (D).

**-Dosage en ciment et résistance mécanique**



Le dosage en ciment a une influence directe sur les résistances mécaniques du béton. Toutes autres conditions égales par ailleurs, on peut dire que dans une certaine plage (200 à 500 kg/m3 de béton) la résistance est proportionnelle au dosage en ciment C

**-Dosage en ciment et destination de l'ouvrage:**

L’ordre de grandeur retenu pour le dosage en ciment des bétons usuels est indiqué dans le tableau suivant:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Type de béton | Destination | Dosage kg/m3 de béton | Classe de résistance du ciment |
| Non armé | Remplissage | 150 à 200 | 35 ou 45 |
| Non armé | Petite ouvrage en béton sur chantier | 250 à 300 | 45 |
| Armé | Batiments ou routes préfab | 300 à 350 | 45, 55, HP |
| Précontraint | Poutre, voussoirs, tabliers | 350 à 450 | 55 ou HP |

**7.2 dosage en eau:**

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton. On ressent bien l'influence qu'il a sur la porosité du béton par les vides créés, lorsque l'eau s'élimine pour differentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats).

**7.3- Granulats : Le choix et le dosage des granulats :**

Une fois déterminée la dimension maximale des granulats avec les exigences de l'ouvrage (espacement des armatures entre lesquelles doit passer le béton, épaisseur d'enrobage de celles-ci, forme de la pièce à mouler), on doit résoudre les deux problèmes suivants

* + Le choix des classes granulaires:

La plupart du temps, un béton est composé à partir de deux classes • un sable de type 0/5 et un gravillon 5/12,5 ; 5/15 ou 5/20

On peut également utiliser deux classes de gravillons dans des compositions plus élaborées, lorsqu'on cherche à se rapprocher d'une granulométrie continue

**Le dosage des granulats :**

Deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les qualités du béton

La proportion relative gravillon/sable est traduite par le facteur G/S que les études récentes ont fair apparaître comme moins importante qu’on ne le pensait auparavant, lorsque ce facteur reste inférieur à 2

la granulométrie du sable peut être caractérisé par son module de finesse.

**7.4. Choix et dosage des adjuvants :**

Selon la propriété recherchée pour le béton on a recours à l'adjuvant approprié

:accélérateur de prise, plastifiant. entraîneur d'air.

Compte tenu de la diversité des produits, on se conformera aux prescriptions du fabricant pour leur emploi et leur dosage, et on vérifiera leur "convenance" avec le ciment.

**8. - LES PARAMETRES INFLUANCANT LA COMPOSITION DES BETONS:**

Avant de detailier les méthodes de coinposition des bétons, nous allons exarmner les poncipaux facteuts agissant sur la résistance et Itouvrabilité d'un béton-

La compacité :

C'est le volume occupé par le ciment et les granulats (matières solides) dans 1 m3 de béton frais 

C = Vs / V = Volume solide / Volume total occupé par l'agglomérat

la compacité conditionne la plupart des qualités

* résistance elevée
* bonne étanchéité
* améliore la durabilité
* améliore la résistance chimique
* améliore la résistance au gel  - améliore la résistance à l'abrasion