

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Des Matériaux



Mémoire

En Vue de l'obtention du diplôme Master

Spécialité : Génie des Matériaux

Option : structure et comportement mécanique des matériaux

THEME

**INFLUENCE DES DIFFERENTES
GRANULOMETRIES DES AGREGATS SUR LE
COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON
ORDINAIRE.**

Réalisé Par :

RACHI LEILA

DENDANI MOHAMED AMINE

Sujet Proposé et suivi par :

Dr.KHERIBET R.

Pr.BEZAZI B.

Boumerdes 2016/2017

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى معرفة كيفية تأثير أبعاد الحصى على خصائص الخرسانة العادية و ملاحظة تأثيرها على المقاومة الميكانيكية للخرسانة.

لقد أثبتت هذه الدراسة ان الحصى من الحجم الكبير (15/25) له تأثير ايجابي في تحسين المقاومة و رفع قيمتها و أيضا يجب إن تكون استمرارية بين أقسام الحصى لكي نحصل على خليط متجانس خال من الكريات الهوائية و بالتالي انعدام الفراغات في تركيبة الحصى فينتج لدينا خرسانة ذات مقاومة عالية

Résumé

L'objectif de ce travail vise à étudier l'influence des classes granulaires des agrégats sur les propriétés mécanique du béton ordinaire.

Cette étude à montré que les gros agrégats (15/25) augmentaient la résistance mécanique qui est aussi favorisée par la continuité des classes granulaires. Celles-ci assurent une bonne homogénéité du béton, donc diminuent les vides dans celui-ci, et le rendent plus compact.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur les bétons.....	3
I.1. Introduction	4
I.2. Définition de béton	4
I.3. Les différents types de béton	4
I.4. Formulations du béton	6
I.4.1. Méthodes semi-empiriques	6
I.4.2. Méthode graphiques	8
I.5. Les principes de formulation du béton :	9
I.6. Principaux avantages et inconvénients du béton	9
I.6.1. Les Avantages :	9
I.6.2. Les Inconvénients.....	9
I.7. Caractéristiques mécaniques des bétons a l'état durci.....	10
I.7.1. Mesure de la masse volumique apparente.....	10
I.7.2. Contrôle non destructif par ultrason.....	10
I.7.3. Essai de résistance à la compression	10
I.7.4. Essai de résistance à la traction	10
Chapitre II : Les constituants du béton	12
II.1. Introduction	13
II.2. Le ciment	13
II.2.1. Fabrication du ciment.....	13
II.2.2. Constituants principaux des ciments	13
II.2.3. Classification et domaine d'application des ciments	16
II.2.4. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale	17
II.2.5. Propriétés des ciments	18
II.3. L'eau de gâchage	22
II.4. Les adjuvants	22
II.4.1. Définition	22
II.4.2. Les accélérateurs (NF EN 934-2).....	23
II.4.3. L'accélérateur de prise	23
II.4.4. L'Accélérateur de durcissement.....	24
II.4.5. Les super plastifiants (NF EN 934-2)	24

II.4.6.	Les hydrofuges (NF EN 934-2).....	24
II.4.7.	Les produits de cure	25
II.4.8.	Les entraîneurs d'air (NF EN 934-2) :	25
II.5.	Granulats.....	25
II.5.1.	Classification des granulats selon la provenance	26
II.5.2.	Classification des granulats selon la grosseur	27
II.5.3.	Origine minéralogique.....	27
II.5.4.	Caractéristiques des granulats	28
Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés		36
III.1.	Introduction.....	37
III.2.	Le Ciment.....	37
III.2.1.	Caractéristiques mécaniques :	38
III.3.	Les granulats	38
III.3.1.	Le sable	38
III.3.2.	Le Gravier	41
III.3.3.	L'eau de gâchage.....	44
III.3.4.	Les adjuvants :.....	44
III.4.	Formulation des bétons	45
III.4.1.	La courbe de référence	45
III.4.2.	Dosage eau	46
III.4.3.	Dosage du ciment	46
III.4.4.	Pourcentage des grains dans le graphe.....	47
Chapitre IV : Résultats et interprétations		50
IV.1.	Propriétés de béton à l'état frais.....	51
IV.1.1.	L'affaissement :	51
IV.2.	Propriétés de béton à l'état durci	51
IV.2.1.	Masses volumiques apparentes des bétons.....	51
IV.2.2.	Résistances mécaniques des bétons.....	52
IV.2.3.	Les éprouvettes pour les essais des bétons.....	52
IV.3.	Représentation graphique des résultats	54
IV.3.1.	Béton témoin I.....	55
IV.3.2.	Béton II.....	56
IV.3.3.	Béton III	57
V.	Conclusions générale.....	61

VI. Recommendation..... 62
Bibliographies 63

Liste des figures

Figure 1 : constituant d'un béton.....	4
Figure 2 : les essais mécaniques sur les bétons à l'état durci	11
Figure 3 : les minéraux principaux du clinker	14
Figure 4 : détermination du temps de début de prise.....	18
Figure 5 : détermination du temps de fin de prise	18
Figure 6 : chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment	20
Figure 7 : Résistance mécanique du mortier normale	21
Figure 8 : forme d'un granulat.....	29
Figure 9 : Foisonnement des différents sables en fonction de l'humidité.....	32
Figure 10 : Essais équivalant de sable.....	33
Figure 11 : Appareil Micro Deval	35
Figure 12 : Essais Los Angeles	35
Figure 13 : Courbe De Mélange	49
Figure 14 : Essai d'affaissement du béton.....	51
Figure 15 : l'évolution de la masse volumique des bétons élaborés à l'état durci en fonction de types de béton	52
Figure 16 : essais de compression	53
Figure 17 : essais de flexion.....	53
Figure 18 :conservation des éprouvettes dans la chambre humide	54
Figure 19 : Résistance à la compression et à la flexion du béton (BI témoin).	55
Figure 20 : Résistance à la compression et à la flexion du béton BII.....	56
Figure 21 : Résistance à la compression et à la flexion du béton BIII.	57
Figure 22 : comparaison entre les bétons élaborés.....	58
Figure 23 : l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge de durcissement	59
Figure 24 : Evolution de la vitesse de propagation des ondes ultrasons dans les bétons testés.....	60

Liste des tableaux

Tableau 1 : valeur de coefficient du A	7
Tableau 2 : composition minéralogique de clinker	14
Tableau 3 : désignation des différents types des ciments en fonction de leur composition....	16
Tableau 4 : classification des ciments en fonction de leur résistance normale [14]	17
Tableau 5 : Classification des granulats selon la grosseur	27
Tableau 6 : valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX	33
Tableau 7 : composition chimiques et caractéristiques physiques du ciment.....	37
Tableau 8 : caractéristiques mécaniques du ciment	38
Tableau 9 : caractéristiques physiques	38
Tableau 10 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.....	39
Tableau 11 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.....	40
Tableau 12 : Caractéristiques physiques	40
Tableau 13 : caractéristiques physiques.....	41
Tableau 14 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.....	42
Tableau 15 : caractéristiques physiques.....	42
Tableau 16 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.....	43
Tableau 17 : caractéristiques physiques.....	43
Tableau 18 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.....	44
Tableau 19 : Composition d'un mètre cube de béton	47
Tableau 20 : Composition des bétons testés pour 1 m ³	48
Tableau 21 : Variation de la masse volumique à l'état durci, des différents bétons.....	51
Tableau 22 : résultats des essais mécaniques de BI.....	55
Tableau 23 : résultats des essais mécaniques de BII.....	56
Tableau 24 : résultats des essais mécaniques de béton BIII	57
Tableau 25 : Résistance à la compression des différents types de béton	58
Tableau 26 : Vitesse de propagation des ondes ultrasons et le module d'élasticité dynamique dans les bétons élaboré.....	59

1- Introduction

Le laboratoire central des travaux publics (LCTP) est une entreprise publique économique (EPE) issue de la restructuration du LNTPB avec une expérience qui dépasse les 35 années d'activités dans le domaine de l'étude et du contrôle géotechnique de l'investigation et de la reconnaissance des sols ainsi que de l'osculation et des l'instrumentation des ouvrages.

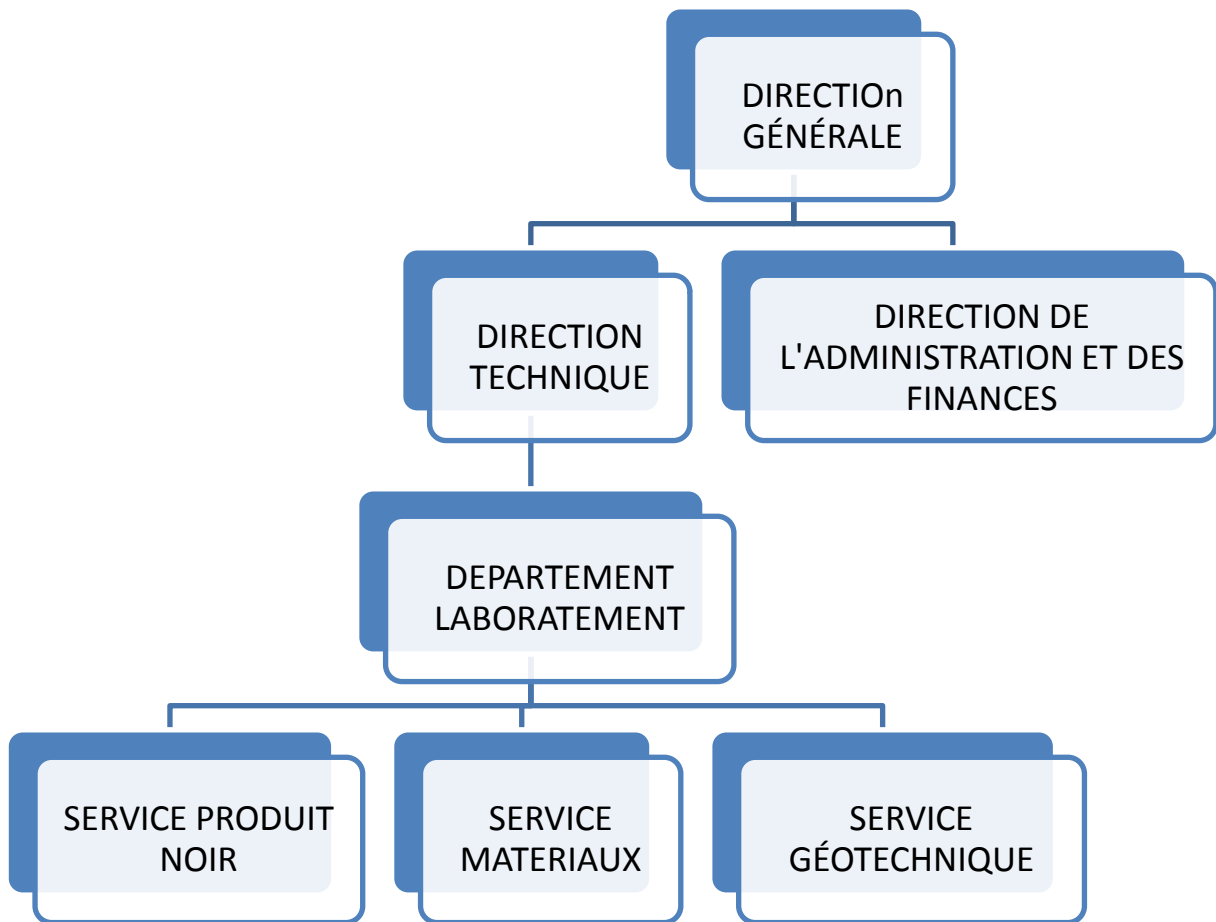
En plus de cela il a pour tache de faire une recherche et des essais relatifs aux matériaux utilisés dans les travaux publics et le bâtiment.

2- Activité du LCTP

Les activités ou les missions du LCTP sont importantes et nécessaires parmi ces activités on note notamment les actions suivantes :

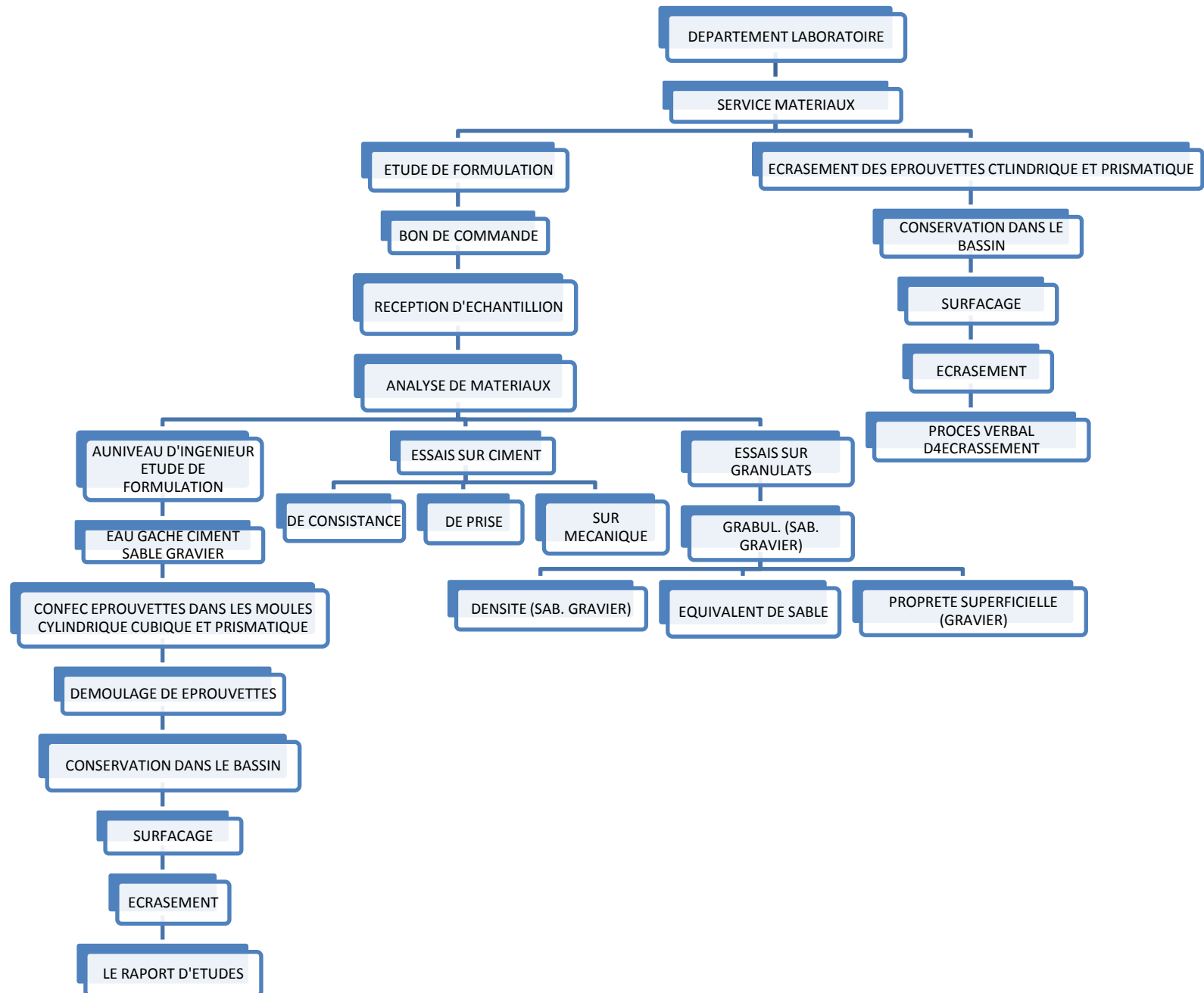
- Assurer le contrôle technique des travaux publics et de normalisation
- Réaliser à la demande toutes les études géologiques et géotechniques des infrastructures routières, aéroportuaires, maritimes, ferroviaire et des constructions de Génie civil.
- Réalisera la demande tous les essais de laboratoire sur les matériaux utilisés en techniques routières et en construction en Génie civil.
- Effectuer les présentations de contrôle qualitatif et d'expertise de la signalisation et des équipements routiers
- Proposer des techniques d'intervention qui corrigent les défauts structuraux de surface qui empêchent la détérioration et prolongent la durée de vie des infrastructures.
- Elaborer et mettre au point des techniques des procédures et modes opératoires nécessaires à la promotion du secteur des travaux publics et contribuer à la normalisation des essais de laboratoire in situ et au développement de la métrologie dans le domaine
- Mener des actions de recherche appliquée dans le domaine des travaux publics et contribuer à toutes études de recherche propre au secteur.

3- La Situation du service matériaux par rapport à l'organisme du lctp



4- Les différentes tâches du laboratoire Matériaux

Les différentes tâches dudit laboratoire se présentent comme suit à travers le schéma suivant :



Introduction générale

Le béton est composé d'un mélange de deux constituants essentiels : les granulats et la pâte. Les granulats se composent de sable et de gravier ou de pierres concassées. La pâte se compose de liants (ciment portland avec ou sans ajouts cimentaires), d'eau et d'air. La pâte, agissant comme une colle, durcit et forme une masse qui, du fait de la réaction chimique du ciment avec l'eau (hydratation), prend la consistance d'une roche, pour former ce qu'on appelle le béton.

Les granulats sont généralement divisés en deux catégories : les fines et les grosses. Les granulats fins sont des sables naturels ou manufacturés dont la taille peut atteindre 5 mm. Les gros granulats sont constitués de particules retenues sur le tamis de 5 mm et pouvant aller jusqu'à 150 mm. La taille maximum du gros granulat la plus couramment utilisée est de 25 mm.

La pâte se compose habituellement de liants, d'eau et d'air emprisonné ou entraîné intentionnellement. Elle constitue environ 25 % à 40 % du volume total du béton.

Comme les granulats représentent à peu près 60 % à 75 % du volume total, leur sélection joue un rôle important. Composés de particules suffisamment fortes et résistantes vis à vis des conditions auxquelles elles seront exposées, elles ne doivent pas contenir de matières susceptibles de causer la détérioration du béton. Une granulométrie continue est souhaitable pour l'utilisation efficace de la pâte.

Étant donnée que la qualité du béton dépend des granulats et de la pâte qui les unit, nous nous proposons dans ce travail d'étudier l'influence des grosses, des moyennes et des fines sur la résistance mécanique du béton ordinaire. Pour cela, nous avons divisé notre travail en quatre chapitres :

1. Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à l'étude bibliographique, au rappel des définitions des différents types de bétons, aux principales formulations, aux inconvénients et aux avantages des bétons, ainsi qu'aux méthodes de caractérisation du béton.

2. Le deuxième chapitre de ce mémoire s'intéresse à la caractérisation des constituants du béton (ciment, agrégats, sable, eau et adjuvants).

3. Le troisième chapitre caractérise les matériaux utilisés.

4. Le quatrième chapitre traite des résultats obtenus et de leur interprétation.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale et des recommandations.

Chapitre I :

Généralité sur les bétons

I.1. Introduction

Le béton ordinaire est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite constitué d'un mélange de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Le liant peut être «hydraulique» car il fait prise par hydratation ; il est appelé ciment.

I.2. Définition de béton

Le béton est un composite hétérogène multiphasique constitué d'un mélange intime de granulats, sable et pâte (ciment, eau). La pâte de ciment représente 25 à 40 % du volume totale du béton. Chaque constituant joue un rôle bien défini : liant hydraulique pour la pâte de ciment, remplissage atténuateur de variations volumique (retrait) et source de résistance pour les granulats.

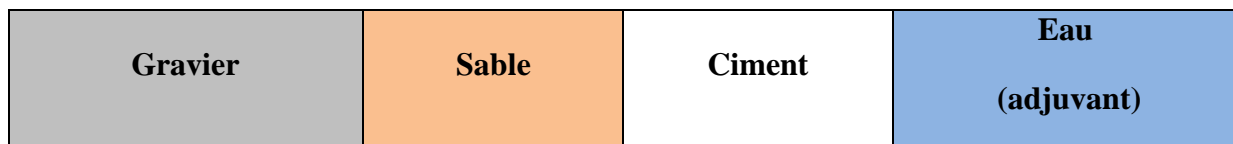


Figure 1 : constituant d'un béton

Un béton hydraulique est constitué :

- D'une pâte (ciment+eau)
- D'un mélange granulaire.
- De produits additionnels (adjuvants, additions minérales)

On désigne habituellement sous le nom :

- De matrice ou de mortier : le mélange (liant+sable+eau)
- De squelette solide ou de squelette granulaire : mélange de granulats.[1]

I.3. Les différents types de béton

➤ Béton ordinaire

Mélange homogène composé exclusivement des constituants de base : ciment, granulats, eau, avec un rapport E/C qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée.

Le béton ordinaire est caractérisé par sa résistance à la compression qui se situe entre

20 MPa = f_{c28} = 50 MPa. [2]

➤ **Béton autoplaçant (BAP)**

Développé dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo, au Japon, le béton auto plaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration.

Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes ; il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Il se caractérise en général par une formulation contenant au moins un adjuvant chimique et un ajout minéral en proportions bien précises pour satisfaire les exigences en matière de maniabilité et de stabilité.

➤ **Béton de haute performance (BHP)**

C'est un béton aux résistances mécaniques élevées au jeune âge et à 28 jours (supérieure à 50 MPA), et un rapport pondéral E/C inférieur à 0,40. Sa propriété essentielle est la grande résistance en compression qui dépasse largement celle des bétons ordinaires. Ceci est obtenu grâce à sa faible porosité qui est diminuée en réduisant la quantité d'eau de gâchage par l'emploi d'adjuvants plastifiants et super plastifiants [3]

➤ **Béton de fibre**

C'est un béton dans lequel sont incorporées des fibres synthétiques ou naturelles, ce qui permet suivant l'ouvrage, de supprimer le treillis soudés traditionnel. Parmi les caractéristiques du béton fibré, on peut citer : sa résistance à la traction, à la fissuration et au choc. [4]

➤ **Béton à durcissement rapide**

C'est un béton dont le développement des résistances mécaniques est accéléré ; ce béton permet la réalisation de petits ouvrages de réparation ou des travaux sur des éléments d'ouvrages demandant une remise en service rapide, ainsi que le décoffrage. Ou la mise en précontrainte le plus rapidement en préfabrication. [5]

➤ **Béton léger**

La norme NF EN 206-1 définit le béton légers comme ayant une masse volumique après séchage entre 800 et 2100 kg/m³. Parmi ces bétons, on peut citer les bétons de granulats légers. Ils sont utilisés dans le domaine du confort thermique d'une habitation (isolation

thermique) et même comme éléments porteurs de charges qui permettent d'alléger la construction.

➤ **Béton lourd**

C'est un béton dont la masse volumique apparente est supérieure à 2600 kg/m^3 ; les résistances mécaniques du béton lourd sont comparables à celles des bétons classiques et même plus élevées, compte tenu des faibles dosages en eau. [6]

➤ **Béton réfractaire**

C'est un béton qui résiste à des températures élevées pouvant atteindre 1300°C , il est obtenu par le mélange de ciment Alumineux et de granulats réfractaires (chamottes, corindon), ou granulats isolants (Pouzzolane, vermiculite, argile expansée); le béton réfractaire sert à la construction de cheminées et de sols d'usines sidérurgiques.

I.4. Formulations du béton

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants (granulat, eau, ciment) afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (résistance, consistance). De nos jours, il existe deux méthodes pour déterminer une formulation du béton :

- **Les méthodes semi-empiriques** [7]
- **Les méthodes graphiques** [8]

I.4.1. Méthodes semi-empiriques

I.4.1.1. Méthode de BOLOMEY

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser avec des granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris), dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la suivante :

$$P = A + (100 - A) \sqrt{d/D}$$

Où :

P : le pourcentage des grains passant à travers la passoire de diamètre d .

D : diamètre du plus gros grain

A : varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus faible.

Cette méthode aboutit théoriquement, tout au moins, à une granularité continue.

Tableau 1 : valeur de coefficient du A

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton damé	6-8	8-10
Béton armé	10	12-14
Béton coulé	12	14-16

I.4.1.2. Méthode de FAURY

En 1942, J. FAURY proposa, comme suite à une étude générale du béton une nouvelle loi de granularité de type « continu ».

Il s'inspirait pour cela de la théorie de Caquot, relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découle est une loi fonction $\sqrt[5]{d}$; c'est pourquoi FAURY adopta une échelle des abscisses graduées en $\sqrt[5]{d}$. La courbe granulométrique idéal conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite ; cependant FAURY a distingué les grains fins et moyens ($<D/2$) des gros grains ($>D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

On trace donc pour l'ensemble du mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse $\sqrt[5]{d}$. L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et comportant certains paramètres dont la valeur est à choisir dans des tableaux en fonction de la qualité des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance de serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins intense).

Cette valeur se calcule par la formule suivante :[19]

$$Y = A + 17 \sqrt[3]{d} + B / (R/D - 0.75) \text{mm}$$

Où :

A : coefficient de nature des granulats (roulé ou concassé) il dépend de niveau de consistance de béton.

B : 1 à 2 selon que le béton ferme ou mou.

R : rayon moyen du moule.

A partir de cette formule, on trace une courbe de référence

I.4.1.3. Méthode de VALETTE

Valette [9] a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum des sables » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ».

On calcule d'abord le dosage de sable et du ciment devant donner en principe le mortier plein avec un minimum de ciment. On ajoute ensuite. Le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment.

I.4.2. Méthode graphiques

I.4.2.1. Méthode de Dreux-Gorisse

C'est une méthode pratique qui simplifie la formulation du béton. Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telle que la dimension des granulats.

Les quantités optimales de matériaux (eau, ciment, sable, gravillon et gravier) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton sont déterminées conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires pour l'obtention de la formulation théorique de béton.

I.5. Les principes de formulation du béton :

La formulation de la majorité des bétons est généralement établie pour atteindre les objectifs suivants :

- la stabilité et la résistance mécanique.
- la résistance aux contraintes externes.
- l'hygiène, la santé et l'environnement.
- la sécurité en cas d'incendie.
- la protection contre le bruit (isolation acoustique).
- l'économie d'énergie et l'isolation thermique.[10]

I.6. Principaux avantages et inconvénients du béton

I.6.1. Les Avantages :

- C'est une construction solide et stable qui résiste très bien dans temps (bien durabilité).
- Il permet une construction rapide. Après sept semaines à peine, l'habitation est étanche à l'air et à l'eau.
- Le niveau d'isolation et l'étanchéité sont excellents grâce au fait que le revêtement complet est fabriqué par une entreprise. En outre, on utilise de grands éléments qui s'assemblent parfaitement.
- Il procure un confort agréable à l'intérieur, grâce à une grande inertie thermique.
- Le logement est sobre et élégant sans poutres, barres et linteaux visibles.
- Le souterrain est habitable grâce aux parois parfaitement étanches et isolées.
- Les équipements techniques sont dépourvus de rainures : les coupe-circuit et les canalisations sont intégrés au coffrage des murs préfabriqués.

L'achèvement intérieur est lisse et élégant, sans plâtrage.

I.6.2. Les Inconvénients

Le système de construction se prête beaucoup moins à une architecture plus classique et traditionnelle.

- Le placement d'un revêtement de façade lourd (brique, pierre naturelle...) entraîne des coûts considérables, notamment pour les fondations plus épaisses et les linteaux de fenêtre.

- L'intégration d'un grand nombre d'équipements techniques dans les panneaux préfabriqués vous force à prendre des décisions dans la phase de création. Les modifications au cours des travaux sont pratiquement impossibles sans payer très cher.
- Les adeptes d'architecture écologique apprécient moins, même si le béton est entièrement recyclable.

I.7. Caractéristiques mécaniques des bétons a l'état durci

I.7.1. Mesure de la masse volumique apparente

Après avoir essuyé les éprouvettes, nous les avons pesées pour pouvoir calculer leurs masses volumiques apparentes.

I.7.2. Contrôle non destructif par ultrason

Ces essais permettent de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton.

I.7.3. Essai de résistance à la compression

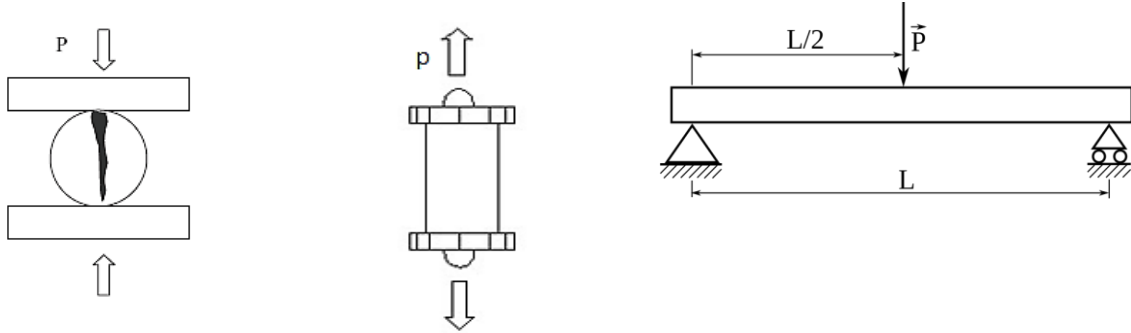
La caractéristique essentielle d'un béton à l'état durci est la résistance mécanique en compression à l'âge de 28 jours. Le béton est un matériau qui travaille bien en compression. La connaissance de ses propriétés mécaniques est donc indispensable pour le dimensionnement et le calcul des ouvrages.

La résistance mécanique en compression du béton est mesurée par compression axiale sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32cm.

Les éprouvettes doivent rester dans le moule et être protégées contre les chocs et les vibrations pendant un minimum de 16 heures et un maximum de 3 jours [NF EN 12390-2]. Après démoulage, les éprouvettes doivent généralement être entreposées dans l'eau jusqu'au moment de l'essai à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

I.7.4. Essai de résistance à la traction

La résistance à la traction est également mesurée sur des éprouvettes 16x32 cm par l'essai de fendage conformément à la norme NF P 18-408. La résistance à la traction peut être déterminée par différents essais :



A. essai de traction par fendage

B. essai de traction direct

C. essai de traction par flexion

Figure 2 : les essais mécaniques sur les bétons à l'état durci

Chapitre II : Les constituants du béton

II.1. Introduction

Le béton est un mélange de plusieurs composants (ciment, sable, gravier, eau et les adjuvant) très différents dont les uns sont actifs et les autres inertes [Georges Dreux, Jean Festa, 1998]. Ce matériau présente des caractéristiques qui sont fonction de celles de ces composants :

II.2. Le ciment

Le ciment est une poudre minérale finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise, qui durcit progressivement et qui conserve, après durcissement, sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

II.2.1. Fabrication du ciment

Le ciment est fabriqué à partir de calcaire et d'argile : 80 % + 20 % respectivement. Le ciment est fabriqué (par voie sèche) selon le processus suivant:

- Extraction de matière première de la carrière ;
- Concassage primaire de la matière première ;
- Concassage secondaire de la matière première en taille plus petite ;
- Broyage de la matière concassée.
- Dosage et homogénéisation de la farine crue (matière broyée) ;
- Phase de préchauffage de la farine crue (et précalcination) à 850° C, puis la cuisson dans un four rotatif incliné à une température généralement de 1450° C. le produit sortant du four s'appelle le clinker;
- Broyage du mélange : clinker + gypse ($\approx 5\%$) + ajouts éventuels.
- Le produit fini (ciment) est alors prêt pour être expédié en sacs, en vrac. [11]

II.2.2. Constituants principaux des ciments

II.2.2.1. Le clinker (C)

Le clinker est un constituant qui résulte de la cuisson, à 1450 °C, d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire (qui apporte le calcium) et de 20 % de matériaux aluminosilicates (notamment les argiles qui apportent le silicium, l'aluminium et le fer)

Tous les ciments ont pour constituant de base le clinker qui assure la fonction liante grâce à laquelle on passe d'un état initial de fluide modulable à un état final de solide mécaniquement résistant; « la norme NF P 18-301 » spécifie que le clinker doit être constitué d'au moins deux tiers en masse de silicates de calcium.

Le clinker est accompagné de sulfate de calcium (le gypse) nécessaire pour régulariser la prise (le ciment reste coulable pendant une période suffisamment longue afin de permettre sa mise en place). [12]

Tableau 2 : composition minéralogique de clinker

Constituants	Composition et abréviation	Taux (%)	Appellation abrégée
Silicate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	45-65	C3S
Silicate bicalcique	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	15-25	C2S
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	0-15	C3A
Alumino-ferrite tétracalcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	0-10	C4AF

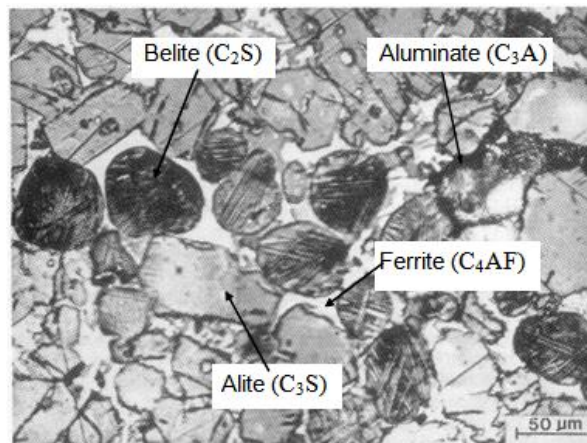


Figure 3 : les minéraux principaux du clinker

II.2.2.2. Autres constituants des ciments :

Associés au clinker, les autres constituants modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques ; dans la mesure où ils sont des sous-produits d'autres industries, ils contribuent aussi à en amoindrir le prix de revient. On appelle « constituant principal », un constituant entrant dans la composition du ciment dans une proportion excédant 5% en masse.

a) Laitiers granulés de haut fourneau :

Matériaux issu de l'industrie de la fonte dans les hauts fourneaux. Il est composé principalement de chaux (45-50%), de silice (30-35%), d'alumine (10-15%) et de magnésie (7-10%).

b) Pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes naturelles sont des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires. Elles sont composées de silice réactive (dans des proportions supérieure à 25%), d'alumine et de fer.

c) Cendres volantes siliceuses ou calciques :

Ce sont des produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue:

- Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques.
- Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

d) Schistes calcinés :

Ce sont des schistes que l'on porte à une température d'environ 800 °C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques

e) Calcaires (CAL) :

Les calcaires sont considérés comme des constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75% en masse.

f) Fumées de silice (SF) :

Particules sphériques très fines ayant une très haute teneur en silice ($\geq 85\%$), elles sont issues de l'industrie de fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium.

g) Filler calcaire [NF P18-508] :

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, provenant de gisement de roches calcaires pouvant être dolomitiques, massives ou meubles.

Les fillers calcaires conformes à la norme NFP18-508 sont du type inerte selon la norme **EN 206-1** et sont substituables au ciment au sens et sous les conditions de cette norme [13].

h) Fillers

Ce sont des constituants secondaires des ciments, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent jamais excéder 5% en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielle qui agissent par leur granulométrie, sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

II.2.3. Classification et domaine d'application des ciments

II.2.3.1. Classification des ciments en fonction de leur composition

Tableau 3 : désignation des différents types des ciments en fonction de leur composition

<i>Désignation</i>	<i>Types de ciment</i>	<i>Clinker %</i>	<i>Ajouts et Teneurs en %</i>	<i>Matière secondaire</i>
CEM I	Ciment portland	95 à 100 %	-----	
CEM II /A	Ciment portland composé	80 à 94 %	- 6 à 20 % L'un des Ajouts	
CEM II /B		65 à 79 %	-21 à 35 %	
CEM III/A	Ciment de haut fourneau	35 à 64 %	- 35 à 65 %	0 à 5%
CEM III/B		20 à 34 %	Laitier - 66 à 80 %	
CEM III/C		5 à 19 %	- 81 à 95 %	
CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	Pouzzolane, - 10 à 35 % cendre	
CEM IV/B		45 à 64 %	ou fumée silice - 36 à 55 %	
CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	-18 à 30 % Laitier et cendre	
CEM V/B		20 à 39 %	-31 à 50 %	

Types du ciment :

La norme européenne NF 197-1 donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq principaux types à savoir :

- **CEM I:** ciment portland.
- **CEM II:** ciment portland composé
- **CEM III :** ciment de haut fourneau
- **CEM IV :** ciment pouzzolanique
- **CEM V :** ciment aux laitiers et aux cendres).

II.2.4. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours.

Chacune d'entre elles se divise en deux sous-classes <N> et <R>. La sous classe <R> désigne des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau .les valeurs en italiques sont les valeurs garanties lorsqu'elles sont inférieures aux valeurs spécifiées. Les valeurs entre parenthèses sont celles indiquées par la norme NF P15-301 lorsqu'elles sont plus exigeantes que les valeurs indiquées par la norme européenne.

Tableau 4 : classification des ciments en fonction de leur résistance normale [14]

Classe de résistance	Résistance à la compression [N/mm ²]				Début de prise [min]	Stabilité volumique (dilatation) [mm]	Retrait à 28 jours (μm/m)
	Au jeune âge		Résistance courante à 28 jours				
	2 jours	7 jours	Mini	Maxi			
32.5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10	≤ 800
32.5 R	≥ 10,0	-	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10	≤ 1000
42.5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	≤ 10	≤ 1000
42.5 R	≥ 20,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	≤ 10	≤ 1000
52.5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	≤ 10	-
52.5 R	≥ 30,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	≤ 10	-

II.2.5. Propriétés des ciments

II.2.5.1. Temps de prise

La détermination des temps de prise qui sont mesurés à l'aide de différents accessoires montrés sur l'appareil de Vicat, est effectuée à l'aide de 1.13 ± 0.05 mm de diamètre. Cette aiguille, sous l'effet d'un poids prédéterminé est utilisée é pour pénétrer une pâte de consistance normalisée placée dans un moule spécial.

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment.

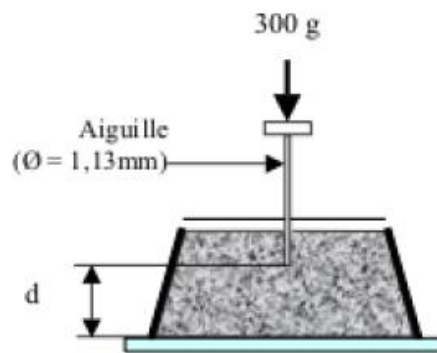


Figure 4 : détermination du temps de début de prise

Le temps de fin de prise est déterminé à l'aide d'une aiguille semblable, à laquelle est fixé un accessoire circulaire creux de 5 mm de diamètre, placé à 0.5 mm du bout de l'aiguille. La fin de prise a lieu lorsque l'aiguille, lentement déposée sur la surface de la pâte ne pénètre que de 0.5 mm dans la pâte sans que le sarcle ne laisse de trace sur sa surface. Le temps de fin de prise est enregistré à partir du moment où l'eau est ajoutée au ciment.

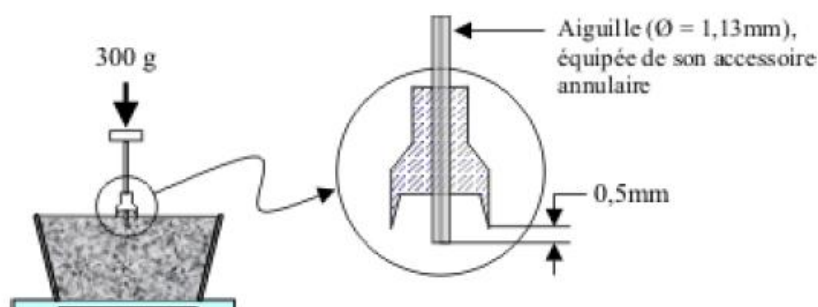


Figure 5 : détermination du temps de fin de prise

Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels:

- La nature du ciment,
- La finesse de mouture du ciment : plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court.
- La température : alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide, pour un ciment donné, le début de prise sera de 18heures à 2°C, de 5 heures à 10°C, de 3h 30 à 20°C et de 30 min à 35°C .
- La présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton ralenti la prise.
- L'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres, un inconvénient, a une action retardatrice sur la prise.

En fonction de leur classe de résistance, les normes spécifient un temps de prise minimum qui est, à la température de 20°C :

1 h 30 pour les ciments de classes 35 et 45.

1 h pour les ciments des classes 55 et HP.

Il est à noter que pratiquement, tous les ciments ont des temps de prises largement supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2h30 à 3h pour la majorité des ciments [15].

II.2.5.2. Le durcissement

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

II.2.5.3. Fausse prise

Dans la composition des ciments, on a en général un peu de gypse (sulfate de calcium hydraté à deux molécules d'eau $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Si les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la « fausse prise ». Dans ce cas, il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage. [16]

II.2.5.4. Chaleur d'hydratation

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

- La finesse de mouture: plus le ciment est broyé finement, plus la chaleur d'hydratation est élevée ;
- La nature des constituants: les ciments CPA comportent presque exclusivement du clinker et dégagent plus de chaleur que les ciments avec constituants secondaires ;
- La nature minéralogique du clinker : plus les teneurs en aluminat tricalcique (C₃A) et silicate tricalcique (C₃S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte ;
- La température extérieure.

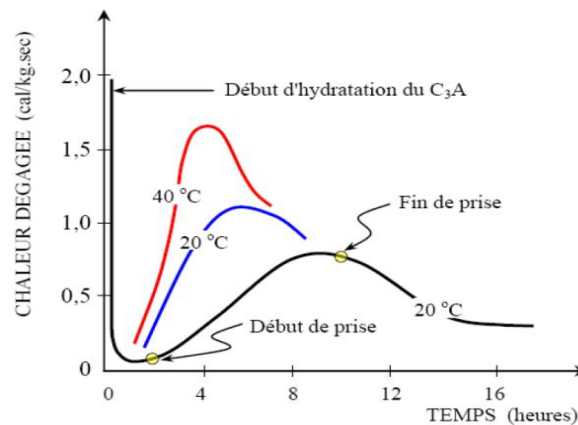


Figure 6 : chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment

II.2.5.5. Retrait

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4x4 cm², conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%.

II.2.5.6. Gonflement

Bien que non normalisé, il est utile de rappeler que bien qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est immergé dans l'eau, ses variations dimensionnelles étant environ le 1/10e de celle constatées dans l'air.

II.2.5.7. Expansion

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésium libre.[17]

Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

La finesse de mouture : (surface spécifique de Blaine)

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm² /g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm² /g. Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible et plus le retrait est important.

II.2.5.8. La résistance mécanique

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm (figure). La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa.

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme EN 196-1. Le sable utilisé est un sable appelé: "sable normalisé".

Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales.[15]

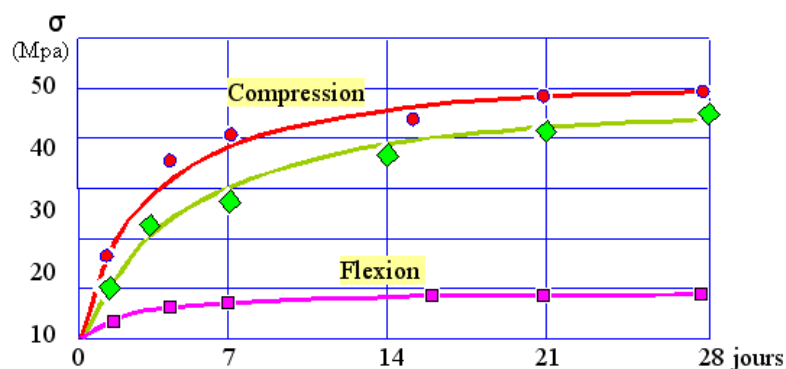


Figure 7 : Résistance mécanique du mortier normale

II.3. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est essentielle pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite l'application du béton. Élément indispensable pour obtenir du béton, l'eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, notre béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées.

II.4. Les adjuvants

II.4.1. Définition

Il y a déjà longtemps on a remarquées et étudiées l'action sur les bétons de ciment de certains produits employés en faibles quantités. Cependant, ce n'est que depuis une trentaine d'années que sont apparus, de plus en plus nombreux sur le marché, des produits d'addition couramment désignés maintenant sous le nom. « D'adjuvants ». On peut admettre qu'en France la proportion de béton « adjuvantes » dépasse 10 %. [12]

On appelle adjuvant, tout ingrédient autre que le ciment, les granulats et l'eau, que l'on ajoute au mélange.

Classification des adjuvants :

On peut classer les adjuvants selon leur fonction, dans les catégories suivantes :

- les superplastifiants
- les retardateurs
- les accélérateurs
- les agents de mouture
- les hydrofuges

On peut également citer d'autres adjuvants tels que :

- les produits de cure
- les entraîneurs d'air

Les retardateurs (NF EN 934-2) :

Les adjuvants retardateurs sont souvent des mélanges de :

- **Lignosulfonates** : Ce sont des sous produits de la cellulose obtenus par un procédé au bisulfite dans le traitement du bois. Leur taux élevé en sucre (xylose) est la raison de l'effet retardateur.
- **Gluconate de sodium** : retardateur très actif $\text{CH}_2\text{OH}(\text{CHOH})_4\text{COO Na}$
- **Gluconate de Calcium**
- **Acide citrique**
- **Le borax**
- **Les sucres** (glucose, saccharose...)

Les retardateurs permettent :

- d'augmenter le temps de début de prise,
- de réguler le dégagement de chaleur due à l'hydratation du ciment.

Les domaines d'application sont les suivants :

- Béton prêt à l'emploi BPE
- Bétons pompés
- Bétons pour ouvrages de masse
- Coulage du béton en continu
- Coulage de béton par temps chauds
- Transports sur longues distances

Leur dosage moyen est de 0,2 à 0,5 % du poids du ciment.

II.4.2. Les accélérateurs (NF EN 934-2)

On distingue deux sortes d'accélérateurs :

- les accélérateurs de prise
- les accélérateurs de durcissement

II.4.3. L'accélérateur de prise

Les accélérateurs de prise permettent de diminuer le temps de début de prise du béton

Ils permettent :

- de réduire les temps de prise
- de mettre le béton hors gel

- d'augmenter la rotation des coffrages
- Leur dosage moyen est de 1 à 3 % du poids du ciment.

II.4.4. L'Accélérateur de durcissement

Les accélérateurs de durcissement augmentent la vitesse de développement des résistances initiales du béton, avec ou sans modification du temps de prise.

Les accélérateurs de durcissement :

- permettent d'accroître la vitesse de montée en résistance du béton.
- Leur dosage moyen est de 0,8 à 2 % du poids du ciment

II.4.5. Les super plastifiants (NF EN 934-2)

Les super plastifiants permettent de réduire fortement la teneur en eau du béton donné (haut réducteur d'eau), ou, sans modifier la teneur en eau, d'augmenter considérablement l'affaissement/l'étalement ou de produire les deux effets à la fois.

Ils permettent :

- de réduire très fortement la quantité d'eau de gâchage tout en maintenant la maniabilité,
- d'augmenter la maniabilité tout en conservant les performances
- de réaliser des bétons à compacité élevée, permettant des gains de performance très importants en terme de : résistances mécaniques initiales et finales élevées; - diminution de la porosité et - accroissement de la durabilité.

Leur dosage moyen est de 0,8 à 3 % du poids du ciment.

II.4.6. Les hydrofuges (NF EN 934-2)

II.4.6.1. Hydrofuge de masse

Les hydrofuges de masse permettent de limiter la pénétration de l'eau dans les pores et les capillaires du béton, sans altérer ses qualités plastiques et esthétiques

Les hydrofuges de masse permettent :

- de réduire la perméabilité et l'absorption capillaire du béton,
- de réduire l'apparition des efflorescences.

Leur dosage moyen est de 0,5 à 2 % du poids du ciment

II.4.6.2. Hydrofuge de surface

Ces hydrofuges s'appliquent sur le béton durci directement : à la brosse, pinceau ou aussi pulvérisés.

Ils sont à base de résine acrylique, vinylique ou silicone. Certains produits sont aussi à base de bitume.

II.4.7. Les produits de cure

La cure d'un béton a pour but de maintenir convenablement la teneur d'humidité et une température satisfaisante du béton durant une période définie.

Une cure commence juste après la mise en place et la finition du béton afin que les propriétés souhaitées puissent se développer.

Les principaux rôles d'un «curing» sont :

- Empêcher ou compenser toute perte d'humidité
- Contrôler la température du béton

II.4.8. Les entraîneurs d'air (NF EN 934-2) :

Leur rôle est de créer dans le béton des bulles d'air microscopiques.

Le diamètre de ces bulles varie entre 10 et 200 μ .

Ils permettent :

- d'entraîner, à l'intérieur du béton, des micro-bulles d'air parfaitement réparties qui serviront de vase d'expansion dans le béton durci.
- d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel et des sels de déverglaçage
- de faciliter la mise en œuvre du béton.

Leur dosage moyen est de 0,05 à 0,2 % du poids du ciment.

II.5. Granulats

Les granulats sont définis comme l'ensemble des grains inertes compris entre 0 mm et 40 mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturel ou artificiel [NF P 15-010].

Les dimensions de ces granulats varient d'un dixième à plusieurs dizaines de millimètres. La norme française XP P 18-540 donne une définition des principales divisions granulométriques des granulats :

- Sable avec $1 \text{ mm} < D \leq 6,3 \text{ mm}$
- Gravillon avec $d \geq 1 \text{ mm}$ et $D \leq 125 \text{ mm}$
- Gravier avec $D > 6,3 \text{ mm}$.

Ils proviennent dans la plupart des cas des roches naturelles. Leur utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible coût volumique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau. La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent d'une manière considérable sur le comportement du béton à l'état frais et à l'état durci.

II.5.1. Classification des granulats selon la provenance

II.5.1.1. Granulats naturels

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton. Ils proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les graines, les porphyres.

a) Granulats roulés

Ils sont les résultats de la désagrégation des roches par l'eau ou le gel. Ainsi, ils se sont formés des dépôts sédimentaires de grains de grosseur allant du sable fin aux gros blocs, de natures minéralogiques différentes. Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature

- Les granulats de rivière (d'oued).
- Les granulats de mer
- Les granulats de dunes.

Les granulats roulés se caractérisent par leur aspect de grains arrondis et polis.

b) Granulats concassés (de carrières) :

Ils proviennent du concassage de roches dures (granits, porphyres, basaltes...etc.). Ils sont caractérisés par un aspect anguleux avec arrêtes.

II.5.1.2. Granulats artificiels

Ils proviennent de la transformation thermique des roches (exemple : laitier du haut Fourneau) ou de démolition d'ouvrages.

II.5.2. Classification des granulats selon la grosseur

Selon leurs dimensions, on distingue : les sables, les graviers, les cailloux, les galets et les moellons. La classification la plus courante est donnée ci-dessous.

Tableau 5 : Classification des granulats selon la grosseur

Sable	0.08 mm à 3 mm
Graviers	3 mm à 25 mm
Cailloux	25mm à 80 mm
galets et moellons	>80mm

Galets : pierre roulées

moellon : pierre concassées

II.5.3. Origine minéralogique

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

II.5.3.1. Granulats roulés et granulats de carrières

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories :

a) **Les granulats de roches meubles :**

Ils sont roulés, et ont une forme acquise par l'érosion, ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses. Nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires. Ils sont exploités à proximité des cours d'eau, dans la nappe ou au-dessus de la nappe ou sur des fonds marins peu profonds. L'extraction est donc réalisée en fonction du gisement à sec ou dans l'eau.

b) **Les granulats de roches massives :**

Sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres: origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage.

II.5.3.2. Granulats artificiels

Des granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usages spécifiques.

II.5.4. Caractéristiques des granulats

II.5.4.1. Caractéristiques géométriques

1) Désignation des granulats

Les granulats sont souvent désignés en fonction de leur plus petite et de leur plus grande dimension comme suit :

Granulats d/D d'où :

Granulat : sable ou gravier

d: dimension minimale des grains

D: dimension maximale des grains

2) Analyse granulométrique d'un granulat

Elle consiste à séparer les grains composant un granulat en classes selon leurs dimensions à l'aide d'une série de tamis, puis déterminer les pourcentages en poids des différentes Classes dans le granulat. Le choix des tamis à utiliser dépend des dimensions du granulat.

- Série principale européenne (NF EN 933-1) : 0.063 -0.125 -0.25 -0.5 -1 -2 -4 -8 16 - 31.5...
- Série française principale (P 18 -560): 0.08 -0.16 -0.315 -0.63 -1.25 -2 -5 -10 -20...

Illustration :

On considère un échantillon de Poids P d'un granulat. L'échantillon est mis dans le tamis supérieur d'une série de tamis classés par ordre décroissant selon la dimension des mailles (du plus grand en haut au plus petit en bas).Après vibration de la série de tamis, les grains de L'échantillon se trouvent séparés selon leurs dimensions et chaque tamis retient une partie dite Refus partiel du tamis. Le refus cumulé (total) d'un tamis est la somme de tous les refus partiels des tamis qui se trouvent au dessus.

La proportion (en %) du refus cumulé d'un tamis rapportée au poids total s'exprime :

$$\% \text{Refus} = (\text{Poids refus cumulé} \div \text{Poids échantillon}) \times 100$$

Le complément à 100% du refus cumulé est le Tamisat du tamis en considération.

$$\% \text{Tamisât} = \%100 - \% \text{Refus}$$

La courbe granulométrique est la représentation graphique du %Tamisât en fonction de la dimension de la maille du tamis. Afin de prendre en compte la grande variation des dimensions des grains dans granulat, la dimension de la maille du tamis est représentée sur une échelle logarithmique.

Ainsi la courbe granulométrique est : $\% \text{Tamisât} = f[\log(d)]$, avec

d : dimension de la maille du tamis.

3) Courbe granulométrique

C'est l'outil de base qui permet le choix de la composition d'un béton performant ayant les caractéristiques citées en haut.

4) Forme des granulats et l'état de surface

La forme d'un granulat est définie par 3 dimensions principales :

- Longueur (L) : le plus grand écartement d'un couple de plans tangents parallèles,
- Epaisseur (E) : le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles,
- Grosseur (G) : dimension de la maille carrée minimale à travers laquelle passe l'élément.

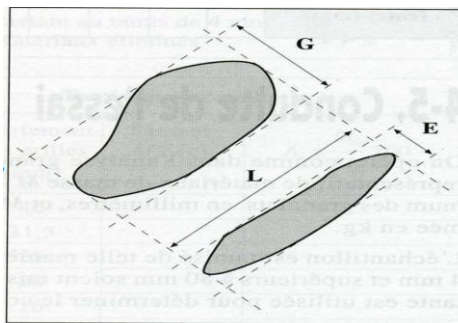


Figure 8 : forme d'un granulat

5) Coefficient d'Aplatissement A

A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la

relation: $\frac{G}{E} > 1.58$

Dans les mêmes conditions $L \leq G \leq E$, on peut déterminer aussi:

- l'indice d'allongement : $\beta = \frac{G}{L}$
- l'indice d'aplatissement : $\alpha = \frac{E}{G}$

6) Module de finesse

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

$$Mf = \frac{\Sigma \text{refus cumulée } 0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5}{100}$$

- B= trop fin Module finesse 1,80 à 2,20 (augmentation de dosage en eau alors la mise en œuvre facile mais la résistance du béton chute).
- A= préférentiel Module finesse 2,20 à 2,80(La mise en œuvre facile et la résistance élevée).
- C = trop grossier Module finesse 2,80 à 3,20 (manque ouvrabilité donc la mise en œuvre est difficile, une bonne résistance mécanique et risque de ségrégation limitent) [18].

II.5.4.2. Caractéristiques physicochimiques

1) Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est la masse du granulat occupant l'unité de volume, tous vides inclus. On la détermine en calculant le quotient.

2) La masse volumique absolue

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides prouvés exister dans ou entre les grains.

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons.

3) La porosité et la compacité

- **La porosité** : En général la porosité est le rapport du volume des vides au volume total.

On peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent.

$$P = \frac{\text{Volume des vide}}{\text{Volume totale}}$$

➤ **La compacité** : La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total.

Ou volume des pleins par unité de volume apparent.

$$C = \frac{\text{Plein}}{\text{vide} + \text{plein}}$$

La porosité et la compacité sont liées par la relation: $p + c = 1$

4) Teneur en eau

La teneur en eau d'un granulat est le rapport du poids d'eau contenu au poids des grains composant le granulat.

$$W = \frac{E}{P_s} = \frac{Ph - P_s}{P_s}$$

E : poids d'eau dans le matériau.

P_s : poids de matériau sec.

Ph : poids matériau humide.

Si W est exprimé en % :

$$W\% = 100 = \frac{Ph - P_s}{P_s}$$

Les granulats utilisés pour la confection du béton contiennent généralement une certaine quantité d'eau variable selon les conditions météorologiques. L'eau de gâchage réellement utilisée est par conséquent égale à la quantité d'eau théorique moins l'eau contenue dans les granulats. Il faut par conséquent disposer de moyens pour mesurer combien il y a d'eau dans les granulats.

5) Foisonnement

Le foisonnement est l'augmentation du volume total du granulat fin à l'état humide par rapport à l'état sec. La tension superficielle de l'humidité éloigne les particules, provoquant un accroissement de volume. Même compacté au préalable, un granulat fin humide (tel le sable) foisonne lorsqu'on le manipule à la pelle où qu'on le déplace lorsqu'il est humide [9].

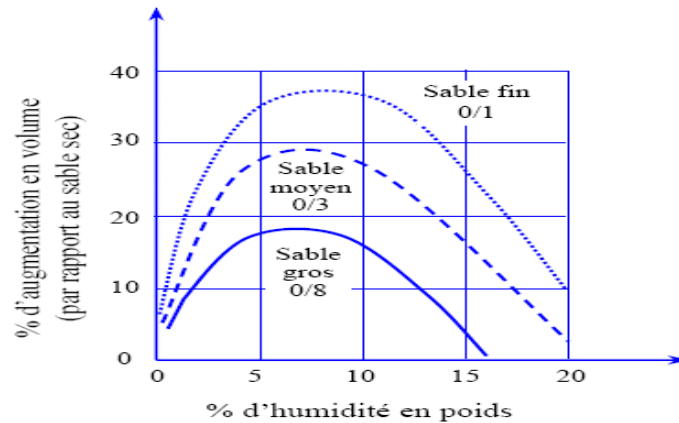


Figure 9 : Foisonnement des différents sables en fonction de l'humidité

6) Propreté des granulats

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les floccules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci

➤ Essai d'équivalent de sable:(NF P 18-598)

Dans le cas des sables cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une solution flocculante. Après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes. Ensuite, on mesure la hauteur, dans l'éprouvette normalisée, du sédiment H1, et du sédiment + flocculat H2. Le résultat:

$$E_{sv} = \left(\frac{H_1}{H_2}\right) 100 \quad , \quad E_s = \left(\frac{H'_1}{H_2}\right) 100$$

Es: équivalent de sable mesuré au piston

Esv : équivalent de sable mesuré visuellement

H₁ : hauteur du sable propre seulement

H'₁ : hauteur du sable propre seulement au piston

H₂ : hauteur du sable propre et élément fins

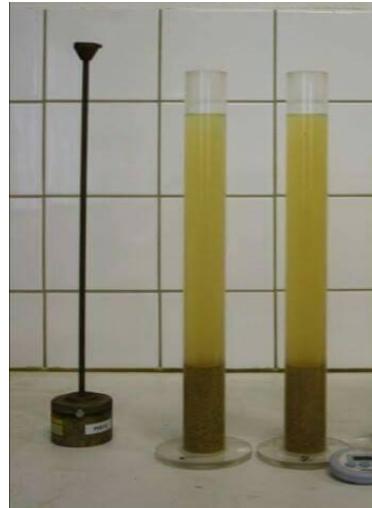


Figure 10 : Essais équivalant de sable

Tableau 6 : valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX

$ES_v < 65$	$E_{Sp} < 60$	Sable argileuse ; à rejeter pour des bétons de qualité
$65 \leq ES_v < 75$	$60 \leq E_{Sp} < 70$	Sable légèrement argileux ; admissible pour des bétons de qualité courante
$75 \leq ES_v < 85$	$70 \leq E_{Sp} < 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuse ; convenant parfaitement pour des bétons de qualité
$AS_v \geq 85$	$E_{Sp} \geq 80$	Sable très propre : risque d'un défaut de plasticité du béton

La limite entre le sable brut et l'argile est maintenant visible. Il est possible de mesurer à l'œil et au réglé, la hauteur de sable total et la hauteur de sable brut pour en déterminer la proportion, l'E.S.

Il est aussi possible de prendre cette mesure à l'aide d'un piston normalisé qui traverse la couche d'argile pour se poser sur le sable brut. La hauteur totale du sable se mesure comme précédemment.

II.5.4.3. Caractéristiques mécaniques :

1) Résistance a l'usure : essai micro-Deval

La présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour la mesure de la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats. L'essai micro-Deval permet de mesurer la résistance à l'usure des roches.

Cette résistance à l'usure pour certaines roches n'est pas la même à sec ou en présence d'eau.

Définition :

L'essai consiste à mesurer, dans des conditions normalisées, l'usure des granulats produite par frottement mutuels, en présence d'eau et d'une charge abrasive, dans un cylindre en rotation.

La masse de la charge abrasive varie suivant les classes granulaires. Si M est la masse de matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par la quantité : $100 = \frac{m}{M}$

Par définition cette quantité sans dimension est appelée, suivant la méthode employée :

- coefficient micro-Deval sec du granulat (MDS).
- coefficient micro-Deval en présence d'eau du granulat (MDE).

Expression des résultats : $\%MD = 100 \frac{M-M'}{M}$

M' : masse après essais de l'échantillon

LA : coefficient Los Angeles



Figure 11 : Appareil Micro Deval

II.5.4.4. Résistance au choc : essai los Angeles :

Principe de l'essai : L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulet normalisés dans la machine Los Angeles.

But de l'essai : L'essai Los Angeles a pour but de déterminer la résistance à la fragmentation par choc et la résistance obtenue par frottement des granulats.



Appareil los Angeles

matière avant l'essai

matière après l'essai

Figure 12 : Essais Los Angeles

Expression des résultats :

$$\%LA = 100 \frac{M - M'}{M}$$

M : la masse de l'échantillon

M' : masse après essais de l'échantillon

LA : coefficient Los Angeles.

Chapitre III :
Caractérisation et
formulation du béton

III.1. Introduction

Dans cette partie nous allons déterminer les caractéristiques essentielles des différents constituants entrant dans la composition du béton. La connaissance de ces caractéristiques est primordiale à toute recherche ou étude, puisque chacune de ces caractéristiques peut influencer sur les résultats de l'étude. C'est pour cette raison que nous allons procéder à la caractérisation de chaque constituant de notre béton.

III.2. Le Ciment

Le ciment utilisé est le ciment portland au calcaire CEM II/B-L 42.5 (GICA), conforme à la norme NA 442, dont les compositions chimique et minéralogique, ainsi que les caractéristiques physico-chimiques sont présentées respectivement, le **tableau 7** montre les résultats que nous avons obtenus par l'observation de l'échantillon du ciment choisi.

Tableau 7: composition chimiques et caractéristiques physiques du ciment

<u>Compositions chimiques</u>	<u>%</u>	<u>Caractéristiques physiques</u>
SiO ₂	22.33	Début de prise : 2h30 min
Al ₂ O ₃	4.35	Fin de prise : 5h05 min
Fe ₂ O ₃	3.30	Masse spécifique : 3.1 g/cm ³
CaO	58.00	SSB : 4127 cm ² /g
MgO	1.93	Chaleur d'hydratation : 370 (j/g)
K ₂ O		Expansion : 1 mm
Na ₂ O		
SO ₃	2.31	
PaF	6.82	

III.2.1. Caractéristiques mécaniques :

La résistance à la flexion et à la compression :

Le **tableau 8** montre les résultats d'écrasement de ciment à l'âge de 2, 7 et 28 jours.

Tableau 8 : caractéristiques mécaniques du ciment

	Résistance à la flexion (MPa)			Résistance à la compression (MPa)		
	2 j	7 j	28 j	2 j	7 j	28 j
Ciment	4.58	6.71	7.13	21.4	37.4	45.9

III.3. Les granulats

III.3.1. Le sable

Les sables utilisés sont, le **sable grossi d'Oued Sly** et le **sable fin de Boussaâda**. Une série d'analyses permet de déterminer les propriétés physiques et granulométriques des fractions de sable, comme l'indique les tableaux **Tableau 9, 10,11 et 12** ci-dessous.

Sable de Boussaâda :

Tableau 9: caractéristiques physiques

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparent	1.34	g/cm ³
Masse volumique absolue	2.65	g/cm ³
Teneur en eau	0.17	%
SE	49	%

Tableau 10 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1

ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE			
Matériau : sable fin			
Masse sèche : 1000 gr			
Masse sèche après lavage : 948 gr			
Diamètre des tamis (mm)	Retenu cumulé R _n (gr)	Retenu cumulé (%) (R _n /1000×100)	Passant(%) 100-(R _n /1000×100)
8	-	-	-
6.3	-	-	-
5	-	-	-
2.5	-	-	-
1.25	0	0	100
0.63	2	0.2	99.8
0.315	66	6.6	93.4
0.16	686	68.6	31.4
0.08	946	94.6	5.4
Fond de tamis	948	94.8	5.2

À partir des résultats de l'analyse granulométrique de **Sable de Boussaâda**, nous obtiendrons le module de finesse par la norme **NF EN 933-1** comme suit :

$$\text{Module de finesse : } M_f = \frac{\sum \text{refus sur tamis } 0.63, 0.315, 0.16, 0.08}{100} = 0.75$$

Sable d'Oued Sly :

Tableau 11 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1

ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE			
Matériau : sable 0/8			
Masse sèche : 1000 gr			
Masse sèche après lavage : 956 gr			
Diamètre des tamis (mm)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant(%)
8	-	-	-
6.3	0	0	100
5	44	4.4	95.6
2.5	339	33.9	66.1
1.25	587	58.7	41.3
0.63	773	77.3	22.7
0.315	909	90.9	9.1
0.16	947	94.7	5.3
0.063	956	95.6	4.4
Fond de tamis	0	0	0

Tableau 12 : Caractéristiques physiques

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparente	1.62	g/cm ³
Masse volumique absolue	2.65	g/cm ³
Teneur en eau	1.72	%
SE	62	%

À partir des résultats de l'analyse granulométrique du **Sable d'Oued Sly**, nous obtiendrons le module de finesse par la norme **NF EN 933-1** comme suit :

$$\text{Module de finesse : } Mf = \frac{\sum \text{refus sur tamis } 5,2.5,1.25,0.63,0.315,0.16}{100} = 3.59$$

On remarque que le sable d'Oued Sly a un module de finesse élevé (3.59), d'où la nécessité d'ajouter un sable de correction de Boussaâda.

Correction :

La correction se fait selon la méthode **d'ABRAMS** dont la formule est la suivante :

Le module de finesse désiré soit fixé à $Mf = 2.80$

$$S1 = \frac{Mfx - Mf2}{Mf1 - Mf2} * 100, \text{ d'ou } S1 = \frac{2.80 - 3.59}{0.75 - 3.59} = 27.82\%$$

$$S2 = \frac{Mfx - Mf2}{Mf1 - Mf2} * 100, \text{ d'ou } S1 = \frac{0.75 - 2.80}{0.75 - 3.59} = 72.18\%$$

D'où S_1 représente le pourcentage de sable **d'Oued Sly** et S_2 représente le pourcentage de sable de **Boussaâda** à utiliser dans notre mélange de sable.

III.3.2. Le Gravier

Dans notre analyse nous avons utilisé trois type de gravier qui sont : le gravier 3/8 de bouzegza, le Gravier 8/15 de Keddara et Gravier 15/25 de Keddara :

1) Gravier 3/8 de bouzegza :

Tableau 13 : caractéristiques physiques

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparente	1.41	g/cm ³
Masse volumique absolue	2.65	g/cm ³
Propreté superficielle	3.87	%
Los Angeles	24.46	%
Micro Deval	15	%

Tableau 14 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1

ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE			
Matériau : gravier 3/8			
Masse sèche : 1600 gr			
Masse sèche après lavage : 1552.12 gr			
Diamètre des tamis (mm)	Retenu cumulé R _n (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)
14	-	-	-
12.5	-	-	-
10	0	0	100
8	6	0.37	99.63
6.3	286	17.87	82.13
5	636	39.75	60.25
2.5	1428	89.25	10.75
1.25	1517	94.81	5.19
0.63	1537	96.06	3.94
0.315	1542	96.37	3.63
Fond tamis	1551	96.93	3.06

2) Gravier 8/15 de Keddara :

Tableau 15 : caractéristiques physiques

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparente	1.47	g/cm ³
Masse volumique absolue	2.6	g/cm ³
Propreté superficielle	0.8	%
Los Angeles	23.2	%
Micro Deval	16.3	%

Tableau 16 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1

ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE			
Matériau : gravier 8/15			
Masse sèche : 3000 gr			
Masse sèche après lavage : 2990 gr			
Diamètre des tamis (mm)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)
25	-	-	-
20	0	0	100
16	31	1.03	98.97
12.5	838	27.93	72.07
10	1734	57.8	42.2
8	2782	92.73	7.27
6.3	2970	99	1
5	2984	99.46	0.47
2.5	2986	99.53	0.07
Fond de tamis	2988	99.86	0.33

3) Gravier 15/25 de Keddara :

Tableau 17 : caractéristiques physiques

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparente	1.41	g/cm ³
Masse volumique absolue	2.6	g/cm ³
Propreté superficielle	0.5	%
Los Angeles	28.94	%

Tableau 18 : analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1

ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE (NF 933-1)			
Matériau : gravier 15/25			
Masse sèche : 7000 gr			
Masse sèche après lavage : 6972 gr			
Diamètre des tamis (mm)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)
25	0	0	100
20	1488	21.26	78.74
16	4911	70.16	29.84
12.5	6797	97.1	2.9
10	6917	98.81	1.19
8	6952	99.31	0.69
Fond de tamis	6970	99.57	0.43

III.3.3. L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage du béton est de l'eau potable de la ville d'Hussein dey.

III.3.4. Les adjuvants :

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau dit TOMPO 12 fabriqué par SIKA; sa plage d'utilisation est fixée par la fiche technique.

Description du TOMPO 12:

Le TOMPO 12 est un super plastifiant haut réducteur d'eau ; il permet à consistance égale, une forte réduction de la teneur en eau d'un béton et à dosage en eau constant, il permet une augmentation de la consistance.

Tompo12 est un super-plastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Longue rhéologie (>2h)
- Robustesse à la ségrégation.
- Qualité de parement

Caractéristiques du TOMPO 12:

Aspect.....liquide brun clair

PH..... 6 ± 1

Teneur en $\text{Na}_2\text{O Eq}$ $\leq 1 \%$

Teneur en Cl^- $\leq 0,1 \%$

Extrait sec..... $30,2 \pm 1,3 \%$

Densité..... $1,06 \pm 0,01$

Dosage :

Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du ciment ou du liant.

III.4. Formulation des bétons

Pour définir un mélange optimal qui puisse assurer la résistance et la maniabilité désirée, nous avons utilisé la méthode de **FAURY** qui est utilisée pour la formulation des bétons par le laboratoire centrale des travaux publics d'Hussein dey. Pour tracer les courbes nous, avons utilisé l'Excel programmé.

III.4.1. La courbe de référence

Pour l'étude du béton, nous devons tracer la courbe de référence ; cette courbe caractérise le mélange optimal du béton ; elle passe par trois (03) points :

- 1) **Point O (0 ; 0)** qui caractérise la réparation maximale du béton :
- 2) **Point M (X ; Y)** qui caractérise la réparation du béton en deux parties égales
 - a. Est celle où on retrouve les gros éléments et les éléments moyens du béton.
 - b. Est celle où on retrouve les éléments moyens et les éléments fins du béton.
- 3) **Point B (Dmax ; 100%)** qui est l'origine de la courbe, avec :

$$d_1 = 25$$

$$d_2 = 20$$

$$X = \frac{D_{max}}{2} = \frac{25}{2} = 12.5 \text{ mm}$$

$$Y = A + 17 \sqrt[5]{D_{max}}$$

$$A = 35 \quad ; \quad \sqrt[5]{D_{max}} = \sqrt[5]{25} = 1.904$$

$$Y = 68.4\%$$

$$M (12.5 ; 68.4)$$

Sachant que : A est le coefficient des granulats (roulé ou concassée) , il dépend du niveau de consistance de béton.

III.4.2. Dosage eau

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{max}}} = \frac{0.305}{1.904} = 0.160,$$

Sachant que :

- K est obtenu du tableau de valeur d'après notre consistance de béton et la qualité des matériaux,
- I : est l'indice des vides.

Le volume d'eau est donc :

$$V_{\text{eau}} = I \times 1000 = 160 \text{ Litre}$$

- Quantité du béton frais 1000 L
- Quantité d'eau : 160 L
- Quantité de matière sèche : 840 L

III.4.3. Dosage du ciment

Dans notre étude, nous avons utilisé la quantité de 400 kg/m³.

Le volume du ciment est donc :

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{400}{3.1} = 129.03 \text{ L}$$

Caractérisation et formulation du béton

Le pourcentage du ciment nécessaire qu'on doit utiliser dans notre béton est :

$$\%C = \frac{V_{\text{ciment}}}{V_{\text{matier sèche}}} \times 100 = \frac{129.03}{840} \times 100 = 15.36\%$$

Le pourcentage de gravier et de sable est donc:

$$\%G+S = 84.64 \%$$

III.4.4. Pourcentage des grains dans le graphe

Le pourcentage nous permet de définir le volume de chaque matériau pour l'obtention d'un mélange optimale du béton (le dosage d'un mètre cube de béton).

Tableau 19 : Composition d'un mètre cube de béton

Pourcentage des composants	Composition de béton (Kg/m ³)	
G15/25.....18%	$\frac{18 \times 840}{100} = 151.2$	$151.2 \times 2.6 = 393 \text{ Kg/m}^3$
G8/15.....21%	$\frac{21 \times 840}{100} = 176$	$176 \times 2.6 = 459 \text{ Kg/m}^3$
G3/8.....13.82%	$\frac{13.82 \times 840}{100} = 109$	$109 \times 2.6 = 308 \text{ Kg/m}^3$
Sable1.....24.81%	$\frac{24.81 \times 840}{100} = 208$	$208 \times 2.65 = 552 \text{ Kg/m}^3$
Sable2.....07%	$\frac{7 \times 840}{100} = 58.8$	$58.8 \times 2.65 = 156 \text{ Kg/m}^3$
Ciment.....15.36%	$\frac{15.36 \times 840}{100} = 129.03$	$129.03 \times 3.1 = 400 \text{ Kg/m}^3$

Le rapport E/C:

$$\frac{E}{C} = \frac{160}{400} = 0.40$$

Le rapport G/S :

$$\frac{G}{S} = \frac{1160}{708} = 1.64$$

Tableau 20 : Composition des bétons testés pour 1 m³

Composant	Ciment	Eau(L)	Sable 1 (kg)	Sable 2 (kg)	G3/8 (kg)	G8/15 (kg)	G15/25 (kg)
Béton I	400	160	552	156	308	459	393
Béton II	400	160	552	156	708	459	0
Béton III	400	160	552	156	775	0	393

Nous représentons les caractéristiques mécaniques des matériaux, l'analyse des composants du béton et la formulation, par une courbe de mélange présenté sur la **figure 13**.

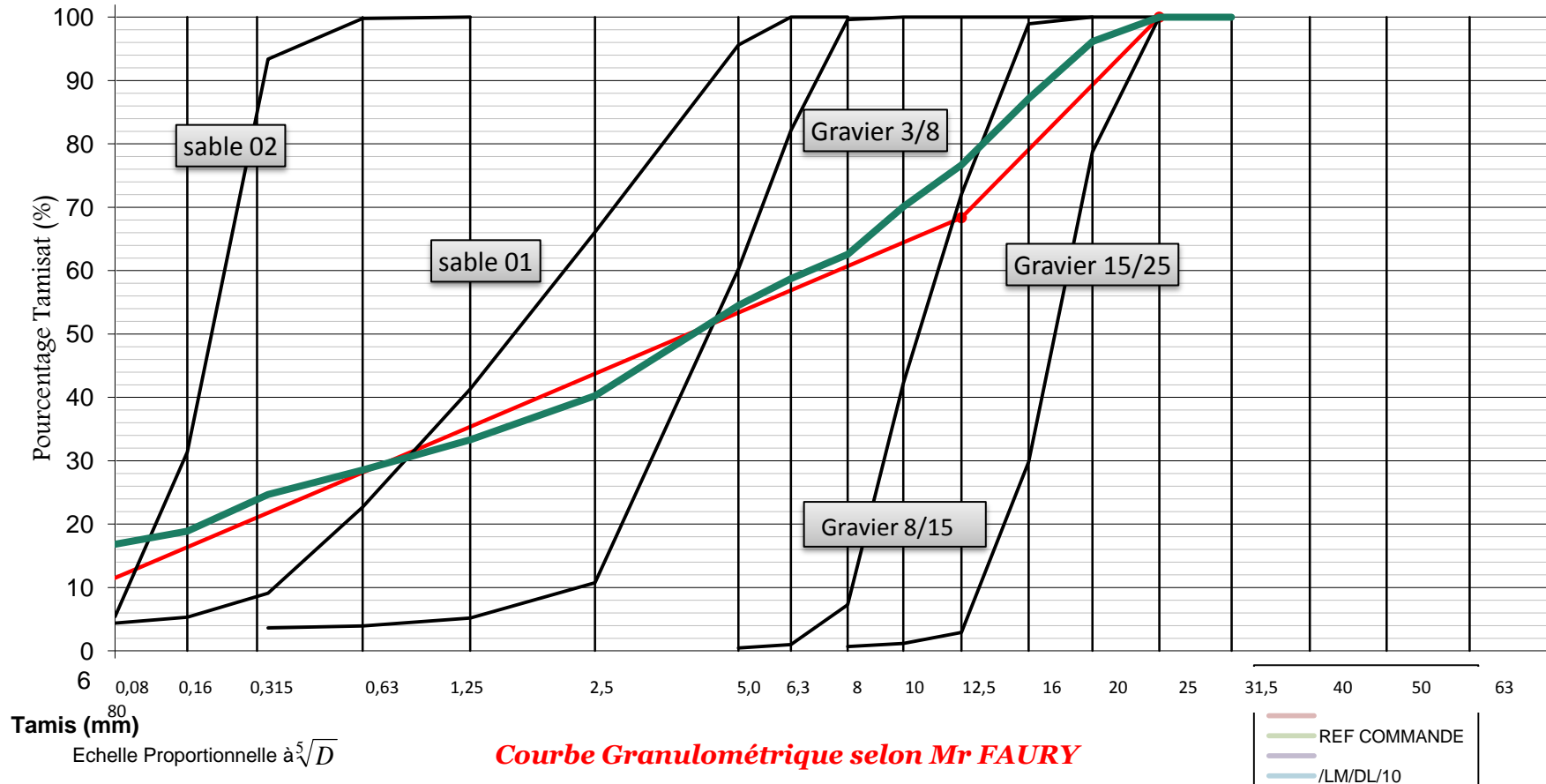
La suite de cette analyse et la formulation sont présentées sur le chapitre suivant qui traite les résultats des différents essais et leur interprétation.

DOSSIER N° :
 CLIENT :
 PROJET : Etude de Formulation
 Chantier :

COURBE DE MELANGE

DIRECTOION LABORATOIRE
 LABORATOIRE MATERIAUX

Dosage en ciment : 400kg/m³



Courbe Granulométrique selon Mr FAURY

Figure 13 : Courbe De Mélange

Chapitre IV :
Résultats et
interprétations

IV.1. Propriétés de béton à l'état frais

IV.1.1. L'affaissement :

La mise en œuvre du béton frais pour l'essai d'affaissement au cône d'Abrams est effectuée d'après la norme NA 431. La **figure 15** présente une photo de cet essai permettant d'obtenir la consistance du béton.



Figure 14 : Essai d'affaissement du béton

IV.2. Propriétés de béton à l'état durci

IV.2.1. Masses volumiques apparentes des bétons

Les éprouvettes étant essuyées, nous les pesons et nous calculons leur masse volumique apparente, en divisant la masse par le volume correspondant, conformément à la norme NA 427.

La masse volumique des bétons a été déterminée par la formule suivante :

$\varphi = \frac{M}{V}$ (M est la masse de l'éprouvette et V son volume), les résultats sont inscrits dans le tableau suivant :

Tableau 21: Variation de la masse volumique à l'état durci, des différents bétons

Type de béton	BI	BII	BIII
Masse volumique du béton (g/cm ³)	2.50	2.45	2.38

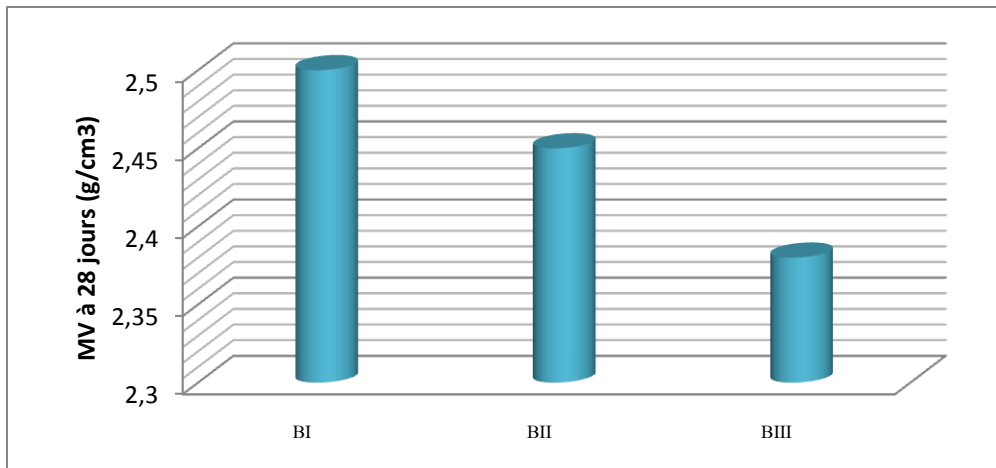


Figure 15 : l'évolution de la masse volumique des bétons élaborés à l'état durci en fonction de types de béton

Ces résultats montrent la variation de la masse volumique à l'état durci des bétons, la masse volumique du béton BI est élevée par rapport au B II et BIII. Ceci s'explique par la continuité diamètres du gravier utilisé dans chaque béton.

IV.2.2. Résistances mécaniques des bétons

Les essais effectués sur les bétons durcis sont les suivants :

- La résistance mécanique à la compression
- La résistance mécanique à la flexion

IV.2.3. Les éprouvettes pour les essais des bétons

IV.2.3.1. Préparation des éprouvettes

- **Essais de compression :**

Pour effectuer ces essais, on a préparé trois éprouvettes cylindriques (16*32) (cm) pour chaque âge (7 et 28 jours) dans le but de prendre une valeur moyenne.



Figure 16 : essais de compression

➤ **Essais de flexion :**

Pour effectuer cet essai, on a préparé trois éprouvettes prismatiques (7*7*28) (cm) pour chaque âge (7 et 28 jours) dans le but de prendre une valeur moyenne.



Figure 17 : essais de flexion

IV.2.3.2. Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes doivent rester dans le moule et protégées contre les chocs ; les vibrations doivent être évitées pendant un minimum de 16h et un maximum de 3jours, a la température de 20 ± 5 C°

Les éprouvettes sont ensuite conservées dans une chambre à $20 \pm 2 \text{ C}^\circ$ et hygrométrie relative $\geq 95\%$



Figure 18 :conservation des éprouvettes dans la chambre humide

Cette opération est effectuée pour éviter l'évaporation d'eau au cours de la phase de prise du ciment et assurer le bon déroulement du durcissement, afin de maintenir la caractéristique réelle du béton.

IV.2.3.3. Réparation et positionnement des éprouvettes

Avant de passer à l'action d'écrasement, il faut tenir compte des recommandations suivantes :

- Essuyer toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai.
- Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés, et les corps étrangers situés à surface de l'éprouvette, doivent être retirés.
- Centrer l'éprouvette sur le plateau avec une précision de $\pm 1\%$ de la dimension du diamètre de l'éprouvette cylindrique

IV.3. Représentation graphique des résultats

Pour effectuer cet essai, nous avons préparé trois éprouvettes pour chaque âge (7 et 28 jours), dans le but d'obtenir une valeur moyenne.

IV.3.1. Béton témoin I

Tableau 22 : résultats des essais mécaniques de BI

Caractéristique	Resistance mécanique (MPa)			
	Resistance à la compression		Résistance à la flexion	
Age	7 j	28 j	7 j	28 j
BI.T	40	46	8	11

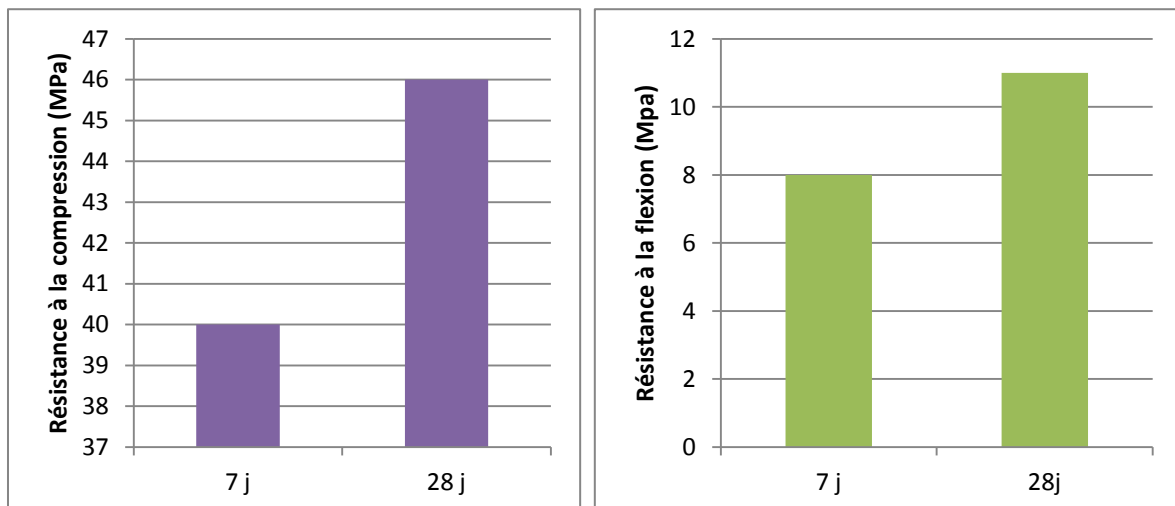


Figure 19 : Résistance à la compression et à la flexion du béton (BI témoin).

Interprétation

La figure 19 représente la résistance à la compression et à la flexion à 7 jours et à 28 jours, du béton témoin BI élaboré. Nous remarquons que la résistance mécanique augmente en fonction de l'âge du durcissement. Cela est dû à l'hydratation des minéraux du clinker, qui donne la formation des hydrosilicates et des hydroluminâtes de calcium(CSH), contribuant à l'amélioration de la résistance du béton. Les valeurs des résistances enregistrées à 7j et 28j sont respectivement 40 MPa et 46MPa pour la résistance à la compression, 8MPa et 11MPa pour la résistance à la flexion.

IV.3.2. Béton II

Tableau 23 : résultats des essais mécaniques de BII

Caractéristique	Resistance mécanique (MPa)			
	Resistance à la compression		Résistance à la flexion	
	7 j	28 j	7 j	28 j
BII	36	41	7	9

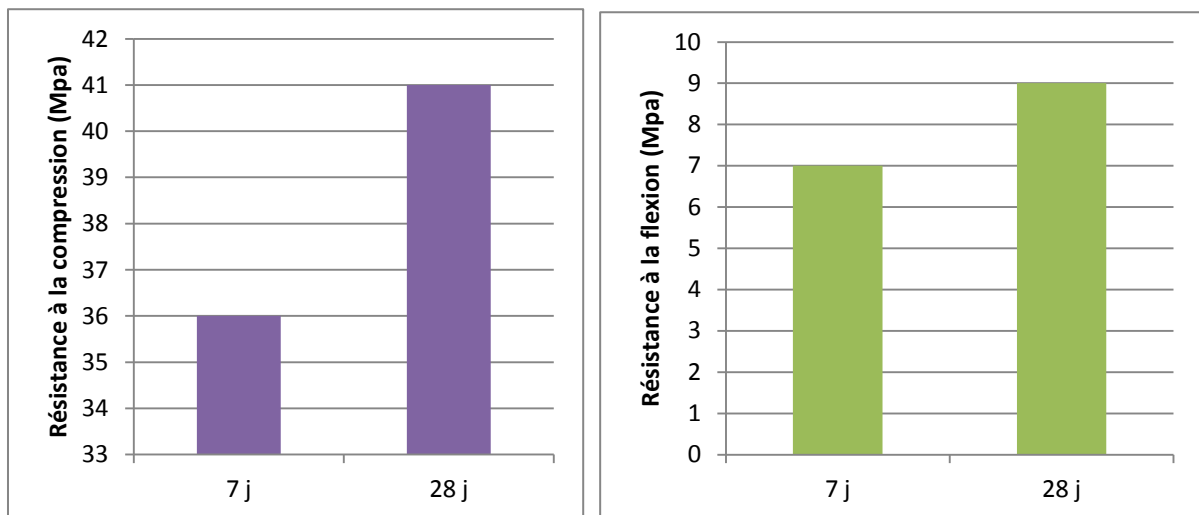


Figure 20 : Résistance à la compression et à la flexion du béton BII.

Interprétation

La figure 20 donne la résistance à la compression et à la flexion, à 7 jours et à 28 jours du béton BII élaboré. Nous remarquons que la résistance mécanique augmente en fonction de l'âge de durcissement. Cela est dû à l'hydratation des minéraux du clinker, qui donne la formation des hydrosilicates et les hydroluminâtes de calcium, contribuant à l'amélioration de la résistance du béton. Les valeurs des résistances enregistrées à 7j et 28j sont respectivement 36MPa et 41MPa pour la résistance à la compression, 7MPa et 9MPa pour la résistance à la flexion.

IV.3.3. Béton III

Tableau 24 : résultats des essais mécaniques de béton BIII

Caractéristique	Resistance mécanique (MPa)			
	Resistance à la compression		Résistance à la flexion	
	7 jr	28 jr	7 jr	28 jr
BIII	29	39	5	9

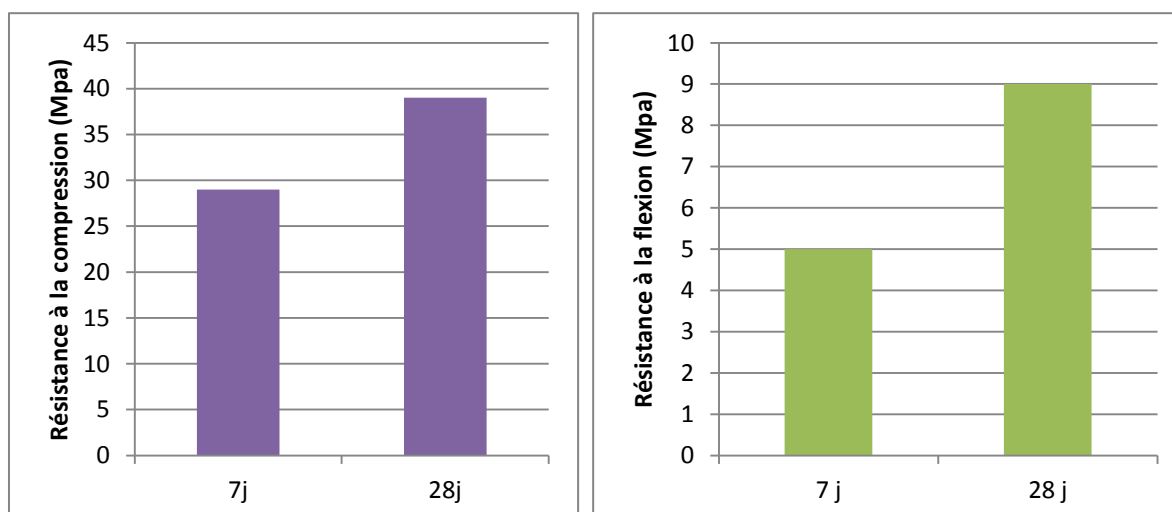


Figure 21 : Résistance à la compression et à la flexion du béton BIII.

Interprétation :

La résistance à la compression et à la flexion du béton BIII élaboré avec deux types de gravier G3/8, 15/25 est représenté dans la figure 21, Nous observations que la résistance mécanique de BIII augmente en fonction de l'âge du durcissement. Ceci est expliqué par l'hydratation du ciment des valeurs de résistance enregistrées à 7j et 28j sont respectivement 29 MPa et 39 MPa pour la résistance à la compression, 5 MPa et 9 MPa pour la résistance à la flexion.

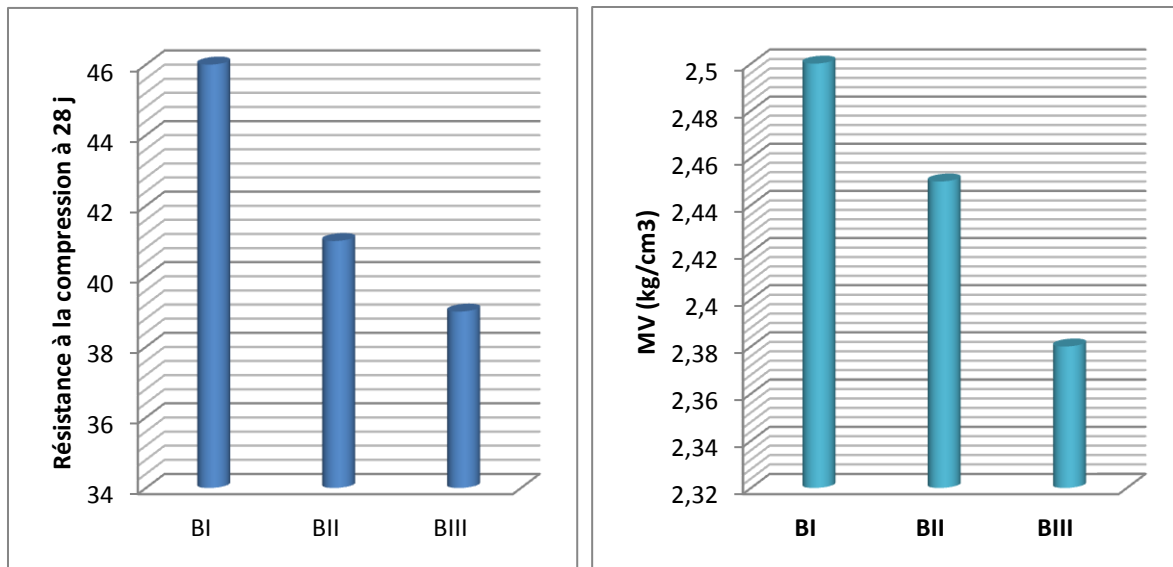


Figure 22 : comparaison entre les bétons élaborés

Interprétation

La figure 22 montre la comparaison entre les trois types de bétons élaborés. Cette figure montre clairement l'effet de la présence des classes granulaires des agrégats sur la masse volumique et la résistance. En effet, le béton BI élaboré à base des trois classes granulaires, présente une résistance nettement élevée que les autres bétons (BII et BIII), avec une masse volumique élevée par rapport aux autres bétons cela est probablement dû à la continuité du mélange granulaire du G3/8, G8/15 et G15/25, qui assure au béton une compacité optimale donnant une masse volumique élevée et une meilleure résistance mécanique. Cette explication peut être renforcée par le fait que le béton BI possède la classe 15/25.

Tableau 25 : Résistance à la compression des différents types de béton

Compression	7 J	28 J
B I	40	46
B II	36	41
B III	29	39

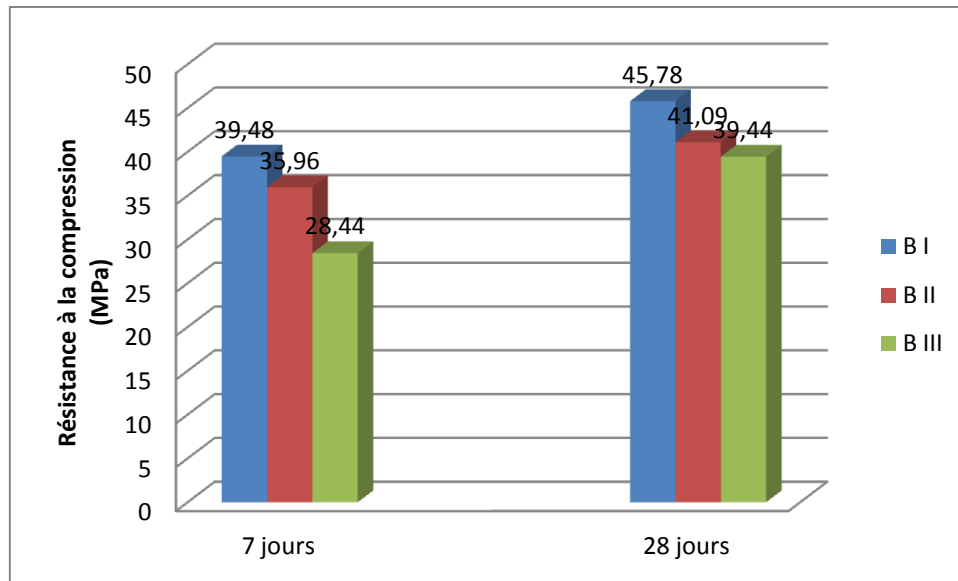


Figure 23 : l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge de durcissement

Interprétation

La figure 23 représente l'évolution de la résistance en fonction de l'âge de durcissement.

En remarque une augmentation de la résistance de 7 jours à 28 jours pour chaque béton. Cela est dû à l'hydratation des minéraux du clinker le béton à base de G3/8, 8/15 et 15/25 présente des résistances élevée qu'aux BII qui a base de G3/8 et G8/15, donc ce qui influe c'est le diamètre des granulats. La résistance à la compression de BIII est plus faible que BI et BII. Ceci explique le manque de continuité des granulats.

Tableau 26 : Vitesse de propagation des ondes ultrasons dans les bétons élaboré.

Vitesse (m/s)	7 j	28 j
B I	4097.2	4217.33
B II	3878.3	4002
B III	3720.52	3886.66

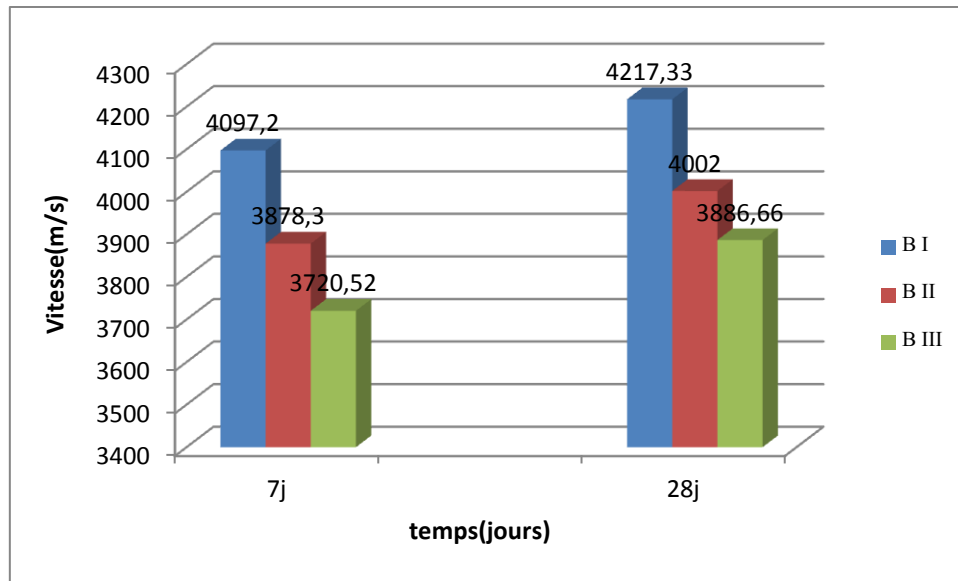


Figure 24 : Evolution de la vitesse de propagation des ondes ultrasons dans les bétons testés.

Interprétation

La figure montre l'évolution de la vitesse de propagation des ondes ultrasons dans les bétons élaborés.

La caractérisation des bétons par l'ultrason donne une idée sur l'homogénéité de la structure interne du béton et montre l'effet de la présence des classes granulaires des agrégats sur la résistance mécanique. En effet, la présence des G3/8, G8/15 et G15/25 dans le B I élaborée, donne une vitesse rapide par rapport au B II et B III. Cela peut s'expliquer par la continuité de la granulométrie des agrégats (3/8, 8/15 et 15/25), car la distribution granulaire donne bon remplissage au squelette granulaire que assure au béton une bonne compacité donnant une meilleure résistance mécanique. Le béton BI est plus compact des trois bétons donc la vitesse de propagation est la plus élevée.

V. Conclusions générale

L'objectif de notre travail permis de comprendre la formulation, la caractérisation des bétons (à l'état frais et durci), l'influence de la granulométrie des agrégats sur le comportement mécanique de béton ordinaire à l'état durci.

D'après les résultats obtenus, On peut conclure que :

- La masse volumique du béton BI est élevée par rapport au B II et BIII ceci s'explique par les différentes granulométries des agrégats.
- La résistance à la compression dépend du diamètre des granulats.
- Une bonne résistance à la compression pour le béton 1 par rapport les autres bétons. Ceci est du à la continuité des agrégats.
- L'évolution de la vitesse de propagation des ondes ultrasons dans les bétons élaborés en fonction du temps. La caractérisation des bétons par l'ultrason donne une idée sur l'homogénéité de la structure interne du béton et montre l'effet de la présence des classes granulaires des agrégats sur la résistance mécanique. En effet, la présence des G3/8, G8/15 et G15/25 dans le BI élaboré, donne une vitesse rapide par rapport au BII et BIII. Cela peut s'expliquer par la continuité de la granulométrie des agrégats (3/8, 8/15 et 15/25), car la distribution granulaire permet un bon remplissage au qui assure au béton une bonne compacité, donc une meilleure résistance mécanique. Le béton BI est le plus compact des trois bétons, donc sa vitesse de propagation est la plus élevée.
- Tous les bétons étudiés, présentent une stabilité des valeurs de la résistance à la traction par flexion.

VI. Recommandation

Nous recommandons, la composition pour 1m^3 de béton :

- Gravier 15/25.....18%
- Gravier 8/15.....21%
- Gravier 3/8.....13.82%
- Sable 1.....24.81%
- Sable 2.....7%
- Ciment.....15.35%
- SP Tompo12.....1%
- L'eau.....160 L

Bibliographies

[1] Benkali Sarah : « caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction » Thèse de magistère université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

[2] Dupain.R et Lanchon.R : granulats, sols, ciment et bétons paris : Ed Educavivres, 276p

[3] Aitcin.P.C et Baron.J : Béton haute performance, Ed.Eyrolles, 1996

[4] CIM béton : le ciment et ses applications, fiches technique 2000.

[5] Bression.J : prévision des résistances, paris, tech batin. Trav .Public, 1980.

[6] Dreux.G et Festa.j : Nouveaux guide du béton et de ces constituants, Ed. Eyrolles, 1998, 278P.

[7] Deux.G et Festa.J : Nouveaux guide du béton et de ces constituants, Ed. Eyrolles, 1998 115p].

[8] Neville.A.M : propriétés des bétons, traduit par le CRIB, Ed.Eyrolle,parie, 1992 130p].

[9] Baron, Jaques et Ramond Sauterey : « le béton hydraulique : Connaissances et pratique», Paris 1995.

[10] Source youtube : principes de formulation du béton par YOUSSEF OUHAMI.

[11]Mr Z.BENGHAZI : cour technologie des géomatériaux par: zeid-benghazi.weebly.com

[12]GEORGES DREUX : «Nouveau guide du béton » Edition Eyrolles, 1981.

[13]ABDELAZIZ BOUDCHICHA «Action des additions et superplastifiants sur les mortiers et bétons (Etude des propriétés rhéologiques et mécanique)» Edition Universitaires européennes.

[14]R. Dupain- R. Lanchon et J. Saint Arroman : Granulats, Sols, Ciments, et Bétons, Ed Educavivres .

[15]Neville.A.M : propriété des bétons traduit par le CRIB, Ed. Eyrolles, 1998

[16] Dreux.G et Festa.J : Nouveaux guide du béton et ces constituants, Ed. Eyrolles 1998

[17] Chanvillard.G et Laplante.P. « Viser une résistance à court terme pour tenir les délais de fabrication : les bétons bases et donnés pour leur formulation ». 1997.

[18]Baron. J et Souterey. R. « Le béton hydraulique connaissance et pratique presses ». 1982.

[19] ADAM M. Neville. « Propriétés de béton ». Eyrolles Paris, 2000.