

**République Algérienne démocratique et populaire**



**Université de m'HAMMED BOUGUERRA**  
**Faculté des sciences de l'ingénieur**  
**Département de génie des matériaux**



## Mémoire de fin d'étude

En Vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie des matériaux

Spécialité: Structure et Comportement Mécanique des Matériaux

### *Thème*

*Etude de l'influence de deux types d'adjuvants à trois différents pourcentages sur le comportement mécanique d'un béton de haute résistance*

Réalisé Par :  
**BERROUTI MOUSSA**  
**DJEBBAR YUCEF**

Sujet Proposé et suivi par :  
**Dr. DILMI .H**  
**Pr. BEZZAZI .B**

*BOUMERDES 2016/2017*

# Remerciement...

*Je tiens en premier lieu, à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur le professeur Mr BEZZAZI .B qui a bien voulu m'encadrer pour l'élaboration de mon projet de fin d'étude.*

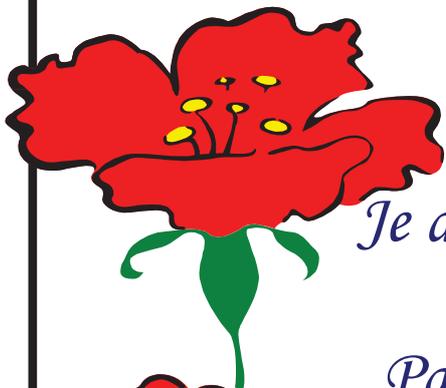
*Je tiens à remercier sincèrement l'encadreur Mme BAKIRI Lynda .le responsable de laboratoire du béton de m'avoir accepté d'effectuer le stage pratique au sein de L, C, T, P qui n'a épargné aucun effort pour que mon stage se déroule dans de meilleures conditions. De même cœur je remercie chaleureusement Mr OKSSILI.T le responsable de laboratoire béton pour son suivi pratique et ses conseils instructifs et précieux,*

*Et bien sûr l'inoubliable équipe de laboratoire Béton qui ont été toujours professionnels en commençant par Mr Halim, Rafik, Djamel, Farid, Sofiane, Lynda, Safia, Abd-El-kader, Houcine.*

*Je tiens à exprimer ma vive reconnaissance au chef de département Mr DILMI. H pour ses conseils et ses orientations pendant le Master.*

*Je profite l'occasion à remercier tous mes enseignants dès la première année primaire jusqu'à la cinquième année universitaire.*

*Enfin, que toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin m'ont généreusement offert leurs concours à l'élaboration de ce travail, trouvant ici l'expression de ma profonde sympathie.*



*Je dédie ce travail en premier  
lieu à mes chères  
Parents, frères et Sœurs , à  
toute la famille Benouarets et  
birrou et à tout (es) mes ami(e)s  
sans exception.*

*farid Amine Hamid Rachid Youcef Walid  
Ahmed Anis Sif eddin Boussad Abed ellah Youcef Mahfoud Abed  
ennour Krimo Imad Soufian Adel Sabrina Toufik Salim Mouhamed  
Et tous le groupe de MSCM ..*

*'Je ne suis riche que de mes amis'*

# *Dédicace*

*Benouarets Adel*

With love

# Sommaire

INTRODUCTION GENERALE .....	1
-----------------------------	---

## *Chapitre I : Généralité sur le béton*

I.1. Définition du béton. ....	3
I.2. Les constituants de béton. ....	3
I.2.1 Ciment. ....	3
I.2.1.1. Les différents ciments.....	4
I.2.1.2. Les constituants des ciments :.....	4
I.2.1.3. Les propriétés des ciments. [7] .....	5
I.2.1.4 Les caractéristiques physiques. ....	5
I. 2.2. Les granulats. [13] XP P 18-540.....	9
I.2.2.1. Définition. ....	9
I.2.2.2. Caractéristiques des granulats.....	9
I.2.3. L'eau de gâchage. [15] NF EN 1008 .....	13
I.3. Méthodes de composition des bétons .....	14
I.3.1. GENERALITES : .....	14
I.3.2. DIFFERANTES METHODES DE CALCUL : .....	15
I.3.2.1. METHODE DE BOLOMEY :.....	15
I.3.2.2. METHODE D'ABRAMS :.....	15
I.3.2.3. METHODE DE FAURY :.....	16
I.3.2.4. METHODE DE VALETTE :.....	16
I.3.2.5. METHODE DE JOISELE :.....	17
I.3.2.6. METHODE DE DREUX GORISSE :.....	18

## *Chapitre II : Les adjuvants*

II.1. Les adjuvants : .....	20
II.2. Définition .....	20
II.3. Classe des adjuvants .....	20
3.1. Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton .....	20
II.3.1. Adjuvants plastifiants.....	21
II.3.1.1. Définition.....	21
II.3.1.2. Description des adjuvants plastifiants .....	21
II.3.1.3. Mécanismes d'action des adjuvants plastifiants .....	22
II.3.1.4. Domaines d'utilisation les adjuvants plastifiants.....	23
II.3.2. Adjuvants super plastifiants .....	24
II.3.2.1. Définition.....	24
II.3.2.2. Description des adjuvants superplastifiants.....	24
II.3.2.3. Mécanismes d'action des adjuvants superplastifiants .....	24
II.3.2.4. Domaines d'utilisation les adjuvants superplastifiants .....	25
II.3.3. Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement .....	25
II.3.3.1. Les adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement .....	26
II.3.3.1.1. Définition.....	26
II.3.3.1.2. Description des adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement .....	26
II.3.3.1.3. Mécanismes d'action des adjuvants accélérateurs de prise et de Durcissement .....	26
II.3.3.1.4. Domaine d'utilisation les adjuvants accélérateurs de prise et de Durcissement.....	27
II.3.3.2. Les adjuvants retardateurs de prise .....	27
II.3.3.2.1. Définition.....	27
II.3.3.2.2. Description des adjuvants retardateurs de prise.....	28
II.3.3.2.3. Mécanismes d'action des adjuvants retardateurs de prise .....	28
II.3.3.2.4. Domaine d'utilisation les adjuvants retardateurs de prise [23] .....	29
II.3.4. Les adjuvants entraîneurs d'air .....	30
II.3.4.1. Définition [24] .....	30
II.3.4.2. Description des adjuvants entraîneurs d'air .....	30
II.3.4.3. Mécanismes d'action des adjuvants entraîneurs d'air .....	30

## *Chapitre III : Caractérisation des matières premières*

III.1. METHODOLOGIE DE TRAVAIL .....	33
III.2. MATERIELS UTILISE.....	33
III.3. CARACTERISATION DES MATERIAUX .....	34
III.3.1. CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS .....	34
III.3.1.1. Ciment.....	34
III.3.1.2. EAU DE GACHAGE : .....	35
III.1. METHODOLOGIE DE TRAVAIL.....	33
III.2. MATERIELS UTILISE.....	33
III.3. CARACTERISATION DES MATERIAUX .....	34
III.3.1. CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS .....	34
III.3.1.1. Ciment.....	34
III.3.1.2. EAU DE GACHAGE : .....	35
III.3.1.3. LES GRANULATS .....	35
III.3.1.3.1 SABLE : .....	35
III.3.1.3.2.LES GRAVIERS .....	38
III.3.1.3.3. LES ADJUVANTS : .....	41
III.3.1.3.3.1ADVA <sub>R</sub> Cast 260 : .....	41
III.3.1.3.3. 2.CHRYSO FLUID 220:.....	43
III.3.2. Préparation de mortier : .....	44
III.3.3. METHODE BOLOMY .....	45
III.3.3.1. METHODE DE BOLOMEY : .....	45
III.3.3.2.DOSAGE EN POURCENTAGE DES GRANULATS.....	46
III.3.3.3. LES DONNES DE BASE : .....	46
III.3.3.4. OPTIMISATION DE LA COMPOSITION DU BETON .....	46
III.3.4. Les formulations.....	48
III.4. Conclusion: .....	50

## *Chapitre IV : Résultats et interprétations*

IV.PROPRIETES DES BETONS .....	52
IV.1. LE BETON FRAIS .....	52
IV.1.1. Masse volumique du béton frais .....	54
IV.2. LE BETON DURCI.....	55
IV.2.1. LA POROSITE .....	55
IV.2.2. LES RESISTANCES MECANIQUES .....	56
IV.2.2.1. PREPARATION ET POSITIONNEMENT DES EPROUVETTES .....	58
IV.3. Résultats et interprétations .....	60
IV.3.1. Caractérisation du béton à l'état frais.....	60
IV.3.1.1 Affaissement au cône d'Abrams .....	60
IV.3.1.2. Masses volumiques.....	62
IV.3.2. Caractérisation de béton à l'état durci.....	63
IV.2.2.2. Evolution de la résistance à la compression.....	65
IV.2.2.3. En traction par fendage .....	65

## *Les Tableaux*

### *Chapitre I : Généralité sur le béton*

<b>Tableau I.1:</b> les caractéristiques chimiques de ciment.....	5
<b>Tableau I.2:</b> les caractéristiques mécaniques de ciment.....	8

### *Chapitre III : Caractérisation des matières premières*

<b>Tableau III.1:</b> Analyses chimiques (NA 5042).....	34
<b>Tableau III.2:</b> Composition minéralogique du ciment (CLINKER).....	34
<b>Tableau III.3:</b> Caractéristiques physiques du ciment MATINE.....	35
<b>Tableau III.4:</b> Résistance à la compression (NA 234).....	35

<b>Tableau III.5:</b> Caractéristiques de sable de <b>KEDDRA</b> .....	36
<b>Tableau III.6:</b> Analyse granulométrique du sable de <b>KEDDARA</b> .....	36
<b>Tableau III.7:</b> Caractéristiques de sable de <b>OUED SOUF</b> .....	37
<b>Tableau III.8:</b> Analyse granulométrique du sable de <b>OUED SOUF</b> .....	37
<b>Tableau III.9:</b> Caractéristiques du $G_{3/8}$ de <b>KEDDARA</b> .....	38
<b>Tableau III.10:</b> Analyse granulométrique du $G_{3/8}$ .....	39
<b>Tableau III.11:</b> Caractéristiques du $G_{8/15}$ de <b>KEDDARA</b> .....	39
<b>Tableau III.12:</b> Analyse granulométrique du $G_{8/15}$ .....	40

## *Chapitre IV : Résultats et interprétations*

<b>Tableau IV .1 :</b> appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cone.....	53
<b>Tableau IV-2 :</b> Rapport d'E/C –affaissement.....	61
<b>Tableau IV-3:</b> variation de la masse volumique à l'état frais de différents bétons.....	63
<b>Tableau IV.4 :</b> la masse volumique de béton durci.....	65
<b>Tableau IV.5 :</b> résultats d'essai de compression.....	68
<b>Tableau IV.6:</b> résultats d'essai de fendage.....	69

## *Les Figures*

### *Chapitre I : Généralité sur le béton*

<b>Figure I.1:</b> Mur de barrage.....	3
<b>Figure I.2:</b> Pont de l'autoroute.....	3

### *Chapitre II : Les adjuvants*

<b>Figure II.1:</b> Mode d'action des adjuvants plastifiant.....	23
<b>Figure II.2:</b> Mécanismes d'action des adjuvants superplastifiants.....	25
<b>Figure II.3 :</b> Mécanismes d'action des adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement.....	27
<b>Figure II.4:</b> Mécanismes d'action des adjuvants retardateurs de prise.....	29
<b>Figure II.5:</b> Mécanismes d'action des adjuvants entraîneurs d'air.....	31

## *Chapitre IV : Résultats et interprétations*

<b>Figure IV1 :</b> Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	54
<b>Figure IV 2 :</b> mesure de la masse volumique.....	55
<b>Figure IV3:</b> la machine de surfacage.....	58
<b>Figure IV4:</b> éprouvette à surfacais.....	58
<b>Figure IV5:</b> éprouvette ou cure d'écrasement .....	59
<b>Figure IV6:</b> éprouvette après l'écrasement.....	59
<b>Figure IV7:</b> Evolution de l'affaissement au cône d'Abrams des bétons en fonction des différents adjuvants superplastifiants et différents pourcentage.....	61
<b>Figure IV 8 :</b> l'évolution de la masse volumique en fonction de dosage des adjuvants.....	63
<b>Figure IV 9 :</b> variation de masse volumique de béton durci.....	64
<b>Figure IV10:</b> appareil de compression.....	65
<b>Figure IV11:</b> essai de traction par fendage.....	66
<b>Figure IV12:</b> une éprouvette soumise à l'essai de fendage.....	66
<b>Figure IV13:</b> Evolution de la résistance mécanique à la compression en fonction d'Age.....	67
<b>Figure IV14:</b> Evolution de la résistance mécanique à la compression en fonction de l'Age.....	69

Le béton est l'un des matériaux le plus utilisé dans le domaine de la construction, Ces performances ne cessent de s'améliorer, en l'occurrence sa résistance mécanique et sa durabilité.

Toute fois la course aux performances dans le domaine du béton n'a pas été suivie par un approfondissement équivalent des connaissances sur le rôle des adjuvants dans les mélanges cimentaires.

Les formulations des bétons à hautes performances résultent d'une approche empirique basée sur des tâtonnements en laboratoire, de ce fait, plusieurs échecs ont été essuyés lors de la mise en œuvre de ces bétons sur chantier. Par ailleurs, l'absence d'une méthode de formulation rationnelle empêche une optimisation des quantités relatives aux différents constituants, entraînant le plus souvent des surcoûts préjudiciables.

Dans ce contexte, l'utilisation pratique des bétons à hautes performances n'a pu obtenir qu'une part relativement faible dans le marché global du béton. De plus, les transferts technologiques vers les bétons courants ont été sensiblement limités.

En proposant d'étudier l'utilisation d'adjuvants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons, nous souhaitons contribuer à dégager des règles pour la maîtrise de cette utilisation sur des bases rationnelles. Car, outre la réponse aux besoins technologiques, l'utilisation des adjuvants dans les mélanges cimentaires constitue aussi un enjeu économique et un intérêt scientifique pertinent.

Cette recherche s'intéresse à l'étude bibliographique des caractéristiques du béton et des adjuvants super plastifiants influençant sur le béton.

La deuxième partie est consacrée à la caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude (ciment, gravier, sable, eau, adjuvant) selon les normes en vigueur. Nous présentons aussi les compositions des bétons qui doivent être étudiés, et les différents essais utilisés.

La dernière partie du mémoire présente aussi les résultats obtenus et leurs interprétations.

## I.1. Définition du béton.

Le béton est un matériau de construction reconstituant artificiellement la roche, composé propriétés. C'est le matériau de construction le plus utilisé au monde, que ce soit en bâtiment ou en travaux publics.



Figure I-1 : mur de barrage



figure I-2 : pont de l'autoroute

## I.2. Les constituants de béton.

Les principaux constituants sont :

### I.2.1 Ciment.

Le ciment est une matière pulvérulente formant avec l'eau une pâte plastique faisant prise et durcissant progressivement dans le temps.

Le mot « ciment » peut désigner différents matériaux comme par exemple :

- Le plâtre
- La Chaux commune
- La pouzzolane naturelle
- Le ciment prompt,

- Le ciment Portland ou ciment artificiel [1]

### I.2.1.1. Les différents ciments.

Les ciments peuvent être classés en cinq grandes familles et 27 variantes principales (voir la norme EN-197-1-2000) [2] pour plus de détails :

- Ciment Portland (noté CEM I)
- Ciment Portland composé (noté CEM II)
- Ciments de hauts fourneaux (noté CEM III)
- Ciments pouzzolaniques (noté CEM IV)
- Ciments au laitier et aux cendres ou ciment composé (noté CEM V)
- 

### I.2.1.2. Les constituants des ciments :

Généralement tous les ciments courants sont composés de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise

#### ➤ *Le clinker :*

Le clinker est un matériau qui est obtenu à partir de la cuisson de matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et de matières de correction. Le clinker se présente sous la forme de petit module composé essentiellement de quatre phases cristallines suivantes :

- Silicates tricalciques ou « alite »  $C_3S$  de la formule  $3CaOSiO_2$
- Silicates bicalcique ou « bélite »  $C_2S$  de la formule  $2CaOSiO_2$
- Aluminates tétra calciques  $C_3A$  de la formule  $3CaOAl_2O_3$

Pour modifier les propriétés des ciments, on ajoute les autres constituants associés au **clinker** grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques qui sont :

- **Les Calcaires** [3]
- **Le Laitier granulé de haut fourneau**
- **Les Cendres volantes (V ou W)** [4]
- **Les Schistes calcinés**
- **Les Fumées de silice** [5]
- **La Pouzzolane**
- **Les Fillers** [6]

### I.2.1.3. Les propriétés des ciments. [7]

#### ❖ Les caractéristiques chimiques.

Elles sont déterminées sur le tableau ci-dessous

Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale en % de la masse
Perte au feu	CPA -CEMI CHF-CEM III CLK- CEM III	Touteclasse	≤ 5
Oxyde de magnésium MgO	CPA- CEM I	Touteclasse	≤ 5
Résidu insoluble	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Touteclasse	≤ 5
Sulfates SO <sub>3</sub> limite supérieure	CPA-CEM I CPJ-CEM II	32.5 32.5 R 42.5	≤ 3.5
	CPZ-CEM IV CLC-CEM V CHF-CEM III	42.5 52.5 52.5 R Touteclasse	≤ 4 ≤ 4
Chlorures	Tous types de ciment	52.5 R	≤ 0.05
		Toutes les autres classes	≤ 0.10

### I.2.1.4. Les caractéristiques physiques.

#### ✓ Comportement physico-chimique de la pâte.

Le ciment est constitué principalement de :

- C<sub>3</sub>S : Silicate tricalcique.
- C<sub>2</sub>S : Silicate bi calcique.
- C<sub>3</sub>A : Aluminium tricalcique .
- C<sub>4</sub>AF : Alumino ferrite tétra calcique.

En gâchant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire. Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau pour produire des composés hydratés. Dans le cas des silicates de calcium  $C_3S$  et  $C_2S$ , la **chaux** hydratée se dissout, et il se dépose des cristaux de  $Ca(OH)_2$  en plaquettes hexagones alors que les silicates de calcium hydratés forment un gel composé de fines aiguilles à la surface du ciment. Ces aiguilles se développent en dimension et en nombre tout en réduisant les interstices capillaires entre les grains. Quand les aiguilles entre les grains de ciment se rapprochent, la pâte devient plus raide. Cette rigidité est au début faible et peut encore être facilement détruite mécaniquement. C'est le début de la **prise**.

Après quelques heures, les interstices capillaires sont partiellement comblés par le gel. La pâte de ciment acquiert une certaine résistance, c'est le durcissement qui commence. La résistance continue à croître à mesure que le gel devient plus compact, d'une part, parce qu'il y a un accroissement de la cohésion entre les aiguilles et accroissement du feutrage des aiguilles, et d'autre part, parce qu'il se formerait des joints de soudure entre les aiguilles de tobermolite des divers grains de ciment.

L'hydratation des grains de ciment continue non seulement des mois, mais des années durant, pour autant que le gel soit entouré d'eau, car le gel de tobermolite ne peut se former qu'en présence d'eau.

#### ❖ **Indice d'hydraulicité.**

Nommé aussi indice de Vicat, c'est le rapport de la fraction acide de ciment sur la fraction basique :

$$I = \frac{\text{fraction acide}}{\text{fraction basique}} = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO}$$

#### ❖ **La prise.**

C'est la propriété que possède les liants hydrauliques de passer d'une consistance fluide à une consistance solide quand ils sont associés à de l'eau.

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

- La nature du ciment

- la finesse de mouture du ciment.
- la température.
- l'excès d'eau de gâchage.

❖ **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 de laquelle les résistances mécaniques continuent à augmenter

❖ **La finesse de mouture (finesse de Blaine).**

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (**cm<sup>2</sup>/g**). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de **3000 à 3500 cm<sup>2</sup>/g**.

❖ **Le retrait.**

C'est la contraction de béton ou de mortier, dû à des phénomènes hydrauliques (évaporation ou absorption de l'eau de gâchage avant et au cours de la prise) et /ou thermiques du fait de refroidissement postérieur à l'élévation de température qui accompagne l'hydratation de ciment, ou des variations climatiques.

❖ **Chaleur d'hydratation.** [8]

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.
- La nature des constituants.
- La nature minéralogique du clinker.
- La température extérieure.

❖ **Expansion.**

Cette dernière peut provenir de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium qui peut contenir certains ciments sous forme de chaux libre.

❖ **Gonflement.**

Le ciment augmente de volume lorsque il est émergé dans l'eau, ces variations dimensionnelles étant environ le **1/10<sup>ème</sup>** de celle constaté dans l'air.

### ❖ La fausse prise.

En général les ciments contiennent peu de gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ), si les clinkers sont trop chaud, ou l'échauffement est grand au cour du broyage, il se forme alors un peu de plâtre ( $\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) au contact de l'eau il fait prise rapidement donne l'impression d'un début de prise ce qui signifie la fausse prise. Pour éviter ce phénomène on augmente la durée de malaxage.

### C- Les caractéristiques mécaniques.

Il y a **trois** différentes classes en fonction de la résistance normalisée à **28J** ; et sous – classe **< R >** associées à ces trois classes principales, pour designer des ciments.

On cite la **classe 32,5** - **classe 42,5** - **classe 52,5**.

Classe	Résistance a la compression (MP) EN 196_1 [9]				Retrait De prise P 15-433 [10] ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	Début De prise EN196-3 [11] (min)	stabilité EN196- 3 [12] (mm)
	au jeune age		a 28 jours				
	2 jours	7 jours	Mini	Maxi			
<b>32.5</b>	.	<b>(17.5)</b>	$\geq 32.5$ (30)	$\leq 52.5$	$\leq 800$	$\geq 90$	$\leq 10$
<b>32.5R</b>	$\geq 13.5$ (12)	.	$\geq 32.5$ (30)	$\leq 52.5$	$\leq 1000$	$\geq 90$	$\leq 10$
<b>42.5</b>	$\geq 12.5$ (10)	.	$\geq 42.5$ (40)	$\leq 62.5$	$\leq 1000$	$\geq 60$	$\leq 10$
<b>42.5R</b>	$\geq 20$ (18)	.	$\geq 42.5$ (40)	$\leq 62.5$	$\leq 1000$	$\geq 60$	$\leq 10$
<b>52.5</b>	$\geq 20$ (18)	.	$\geq 52.5$ (50)	.	.	$\geq 60$	$\leq 10$
<b>52.5R</b>	$\geq 30$ (28)	.	$\geq 52.5$ (50)	.	.	$\geq 60$	$\leq 10$

## I. 2.2. Les granulats. [13] XP P 18-540

### I.2.2.1. Définition.

On donnera le nom de granulats à un ensemble de grains inertes destinés à être agglomérés par un liant et à former un agrégat.

#### ❖ Agrégats :

Le terme agrégats, utilisé pour désigner les granulats, est donc impropre. En effet, un agrégat est un assemblage hétérogène de substances ou éléments qui s'adhèrent solidement entre eux (Le mortier ou le béton par exemple).

### I.2.2.2. Caractéristiques des granulats.

#### ❖ Caractéristiques géométriques.

#### ❖ Classe granulaire.

La granularité est la distribution par dimensions des grains d'un granulat .l'analyse granulométrique est la méthode d'essai pour déterminer la granularité, cette opération consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis, normalisé sont de granulométrie : **0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 - 10 - 20 - 40 - 80 mm.**

On trace la courbe granulométrique sur un graphe de référence, sur l'**abscisse** on porte l'ouverture **des tamis** normalisés et sur l'**ordonné** nous portons le % soit de **passant** soit de **refus**, on **exclut** de l'essai des **gros grains  $\geq 80\text{mm}$**  et les **fins  $\leq 80$**

Types		Dimension (mm)
Fillers	0 /D	$D \leq 2$
Sable	0/D	$1 < D < 6,3$
Gravillons	d /D	$d > 1, D \leq 31,05$
Cailloux	d/D	$d > 20, D \leq 80$
Graviers		$6,3 \leq D \leq 80$

A l'aide informations obtenues, on déterminé :

- La limite des différentes fractions **d** et **D**
- Le % de fines particules
- La continuité ou la discontinuité de la granularité.

-Selon la norme **NF P18-101**, [14], on a la classe granulaire suivante :

❖ **Le module de finesse.**

Le module de finesse d'un granulat est égal à la somme d'un refus exprimé en pourcentage des différents tamis présentant les ouvertures suivantes :

**Le sable : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5mm**

**Le gravier : 10 – 20 – 40 - 80mm**

Selon la norme les catégories de sables sont classées :

- **Sable A : Mf : 1,8 - 2,2**
- **Sable B : Mf : 2,2 - 2,8**
- **Sable C : Mf : 2,8 - 3,8**

Le module est une caractéristique importante surtout pour le sable, ou le module moyen varie entre 2,2 et 2,8.

❖ **Forme et coefficient d'aplatissement.**

La forme des grains a une incidence directe sur la malléabilité du béton, la forme souhaité est la sphère alors que la forme plate est mauvaise (besoin d'eau), ce qui entraîne des défauts de structure.

Le coefficient d'aplatissement A qui caractérise la forme des granulats, la grande dimension (G) et leur épaisseur (E), est donné par le rapport de G/E celui-ci doit être supérieur à 1,58, d'où :

G : ouverture des mailles de tamis carré à travers laquelle passe l'élément A. ce dernier est déterminé par un double tamisage.

Le coefficient d'aplatissement **A** est remplacé par le terme **VSS** :

<b>Sable</b>	<b>VSS%</b>
Sable A	20
Sable B	30
Sable C	35

❖ **Caractéristiques physico-chimiques.**

On les classe en deux groupes :

- a-** Celles qui concernent le granulat lui même

**b-** celles qui concernent les substances organiques étrangères et nocives, telles que les sulfates, les chlorures etc....

❖ **masse volumique absolue à la masse spécifique.**

La masse spécifique de granulats est la masse d'un granulat par unité de volume plein sans aucun vide entre les grains (volume absolue).

❖ **La masse volumique apparente.**

La masse volumique apparente de granulats est la masse d'un granulats par unité de volume y compris les vides entre les grains (volume apparent).

❖ **Compacité et porosité.**

La porosité d'un granulat est exprimé en %. Elle représente le rapport entre le volume de vide qu'il y a entre les grains déversés et le volume absolu entre Les grains.

❖ **Le coefficient d'absorption.**

C'est le rapport d'augmentation de la masse de granulat provoquée en 24h par imbibition partiel de granulat sec.

❖ **Le foisonnement de sable.**

Le volume occupé par le sable sec augmente au même temps que son humidité, on appelle coefficient de foisonnement de sable  $f$  exprimé en %, l'augmentation de volume correspondant à une humidité donné par le volume occupé par la même quantité de sable à l'état sec.

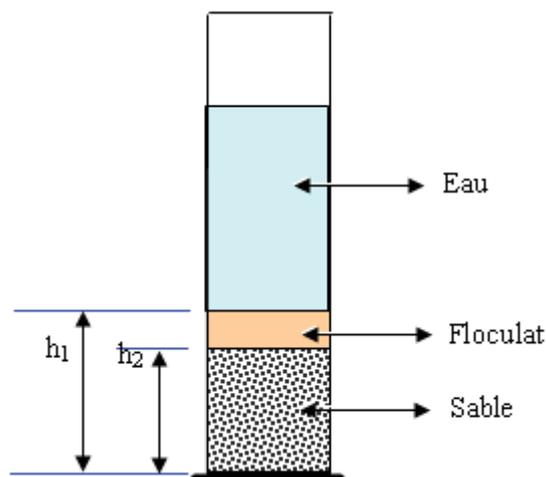
$$f = \frac{V_{humide} - V_{sec}}{V_{sec}}$$

❖ **La propreté.**

Le granulat doit être propre, la loi interdit tout déchet nuisible à la résistance de béton, la loi autorise un taux <1%, et le granulat ne doit pas contenir des huiles et des matières organiques.

La propreté de sable est mesurée par la détermination de l'équivalent de sable. Le principe de la méthode : On agite une quantité de sable dans une solution lavante dans un récipient, on laisse reposer et on mesure la hauteur de dépôt de sable visible égale à  $h_1$  et la hauteur totale avec le flocculant est  $h_2$ . l'équivalent de sable est calculé selon la formule :

$$ES = \frac{h_1}{h_2} 100$$



On rencontre l'équivalent de sable à vue et à piston « E.S.V et E.S.P »

E.S.V	E.S.P	Types de sable	Influence
<65	<60	Argileux	Risque de retrait ou de gonflement
>65	<75	Très argileux	Retrait assez fort
75-85	70-80	Bon sable	Bon béton : haute qualité
>85	>80	Manque de fine d'argile	Manque de plasticité

❖ **Les caractéristiques mécaniques.**

Les qualités de granulats sont déterminées par les essais d'écrasement ou de l'usure :

❖ **Essai de Los Angeles.**

Il consiste à introduire dans un cylindre horizontal une quantité de granulat à étudier en présence de boules d'aciers et à vérifier la quantité des fines particules obtenues pendant un certain temps de rotation, la norme permet la classification suivante par rapport au type de granulat :

Types	Vss
A	30
B	40
C	40
D	50

❖ **Essai de Micro deval.**

C'est un contrôle identique au précédent, cependant le but n'est pas de déterminer le % des fines particules, mais d'apprécier l'usure de granulat

❖ **Sensibilité au gel (G).**

Les granulats doivent être insensibles au gel et dégel, la norme précise que les granulats sont considérés comme non gélifs lorsqu'ils respectent au moins l'une de ces valeurs spécifiées suivantes :

**Absorption < 1 %.**

**LA < 25.**

### **I.2.3. L'eau de gâchage. [15] NF EN 1008**

L'eau de gâchage est un facteur très important, elle joue deux rôles dans la technologie du béton, d'une part, elle permet l'hydratation du ciment et, d'autre part, elle est indispensable pour assurer l'ouvrabilité et au bon compactage du béton.

Cette dernière peut être utilisée si elle ne contient pas une quantité trop importante de substances nuisibles et susceptibles d'engendrer les phénomènes suivants :

- ❖ Ralentissement ou suppression du processus de prise et de durcissement  
(P.ex. : sucre, acides humiques)
- ❖ Entraînement excessif d'air impliquant une baisse de résistance du béton  
(p. ex : micro-organismes, huiles, graisses, suspensions, certains sels minéraux)
- ❖ Corrosion des armatures.

### I.3. Méthodes de composition des bétons

#### I.3.1. GENERALITES :

Les graduations granulométriques ont été laissés en diamètres -passoires (et non en mailles -tamis) selon l'usage à l'époque.

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage en cause.

Les méthodes proposées sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes : elles aboutissent à des dosages « volumiques » ou de préférence « pondéraux », le passage de l'un à l'autre pouvant toujours se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac.

Ces méthodes sont dites à « granularité continue » lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne, sur le graphique granulométrique une courbe s'élevant d'une façon continue ; autrement dit du plus petit grain de ciment ( $d \approx 6,3$  microns) aux plus gros grains (D).

On dit par contre que l'on a une « granularité discontinue » lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier équivalent à un manque d'éléments intermédiaires.

Ces deux types de bétons « continu » ou « discontinu », ont chacun leurs chauds partisans ou détracteurs. En faits, il n'y a pas entre ces deux types de granularité, et malgré les apparences de profondes différences justifiant la querelle encore persistante à leur égard. D'ailleurs dans la plupart des cas la continuité ou la discontinuité de la granularité dépend des granulats dont on dispose selon qu'ils présentent ou non entre eux des discontinuités.

Par contre, la granularité discontinue conduit à des bétons à maximum de gros éléments et au minimum de sable présentant en général des résistances en compression un peu supérieure mais parfois au détriment de l'ouvrabilité. Cependant, on peut estimer que pratiquement la plupart des bétons actuellement utilisés sont à granularité continue.

### I.3.2. DIFFERANTES METHODES DE CALCUL :

#### I.3.2.1. METHODE 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 soit 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 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.

#### I.3.2.2. METHODE D'ABRAMS :

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse globale pour le mélange de granulats à employer.

Le module de finesse du mélange est choisi de manière que les vides dans ce mélange soient en principe réduits au minimum.

Nous rappelons ici la règle du mélange d'Abrams : elle permet de calculer les pourcentages relatifs de granulats de modules de finesse  $Mf_1$  et  $Mf_2$  pour obtenir un module MF choisi pour le mélange.

Tout réside donc, dans cette méthode, sur le choix judicieux du module de finesse du mélange à réaliser (avec les granulats seuls), ce module dépend évidemment de nombreux paramètres tels que : forme, nature et dimension des granulats, dosage en ciment, résistance et plasticité désirée.

Nous nous inspirerons de cette méthode mais plus particulièrement pour l'étude de la granularité des sable ( $D \leq 5\text{mm}$  en principe) .

### I.3.2.3. METHODE 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 :

$$Y = A + 17 \sqrt[5]{d} + B / (R/D - 0.75)$$

Où :

**A** : est choisi dans un tableau.

**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.3.2.4. METHODE DE VALETTE :

R. VALETTE a mis de point une méthode essentiellement expérimentale, mais qui nécessite cependant un certain nombre de calculs. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum de sable » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ».

La méthode VALETTE proprement dite est quelque fois utilisée avec certaines variantes ; voici sommairement le principe de cette méthode.

Dans les cas les plus courants, on part en général de deux granulats (bétons binaires), un sable 0/5 mm et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité avec le sable, un 16/25 mm par exemple.

On calcul d'abord le dosage de sable et ciment devant donner en principe le mortier plein à maximum de ciment ; ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égale de pâte pure de ciment.

On ajoute en suite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. C'est la partie essentiellement expérimentale de la méthode et elle repose sur l'appréciation de l'opérateur sur la « convenance » du béton ; et on obtient alors un béton plein a minimum de sable et moins dosé en ciment.

Les dosages en ciment qu'on obtient sont nettement au-dessous de ceux nécessaire pour avoir les résistances souhaitées ; de même pour la plasticité, l'étanchéité ou autres qualités, pour déterminer la composition du béton de dosage en ciment suffisant pour la résistance à obtenir, on fixe à priori dans certains cas, ou on évalue par un calcul approprié, le volume de pâte pure compensatrice à substituer à un égal volume plein mouillé de sable.

Cette méthode s'appuient essentiellement sur l'expérimentation d'où la nécessité de tester par essais d'études et de convenances.

### **I.3.2.5. METHODE DE JOISELE :**

Elle s'inspire de la théorie de Caquot, en la généralisant, Joisel à considérer que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de  $\sqrt[m]{d}$ , m dépend de la compacité de serrage d'un granulat de dimension uniforme selon les moyens de serrage, m varie de 3 à 10.

Afin d'obtenir une courbe granulométrique de référence qui se réduit à une simple droite, l'échelle des abscisses est proportionnelle à  $\sqrt[m]{d}$  contrairement à FAURY, selon des matériaux m varie.

On aboutit par suite à une courbe granulométrique (droite) qui représente une granulométrie continue, sauf si les granulats dont on dispose en pratique présentent une discontinuité, tout fois, pour éviter la cassure da la droite de référence au point d'abscisse D/2.

En suite par la méthode graphique on détermine les pourcentages de divers granulats. Le dosage en ciment est en générale inférieur à (150 à 200 Kg/m<sup>3</sup>) au dosage nécessaire ou exigé (250 à 400 Kg/m<sup>3</sup>) et, dans la plus part des cas une correction doit être apporter dans ce sens.

Un point à souligner, c'est que ces différentes méthodes ne conduisent pas à des résultats identiques pour un même ouvrage ce qui fait l'objet des recherches concernant la composition des bétons.

#### **I.3.2.6. METHODE 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) nécessaire sa la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges .Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique Du béton.

## **II.1. Les adjuvants :**

Dès les origines de la fabrication du béton de ciment portland, on a commencé les recherches sur l'incorporation de produit d'améliorer certaines propriétés.

À partir de 1930 [16], les entraîneurs d'air sont fréquemment utilisés, Ils seront suivis par les antigels et les produits de cure.

En 1960 [17], on assiste au le développement du béton manufacturé et au béton prêt à l'emploi. Puis au développement des normes d'adjuvants, à partir 1984 [18] et la mise en place d'une Certification par la marque **NF** adjuvants, véritable label de qualité. Il faut enfin préciser que les adjuvants ont permis des progrès considérables dans le domaine des bétons.

## **II.2. Définition :**

Ce sont des Produits chimique des ou naturels (liquides) susceptibles d'améliorer certaines propriétés des bétons, mortiers, coulis. Les adjuvants sont incorporés au béton a de faible dose (inférieure à 5% de la masse du ciment), avant ou pendant le malaxage .Le but est d'améliorer certaines propriétés du béton, qu'il soit à l'état frais pendant la prise et le durcissement, ou à l'état durci

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale caractérisée par la modification majeure qu'il apporte aux propriétés des bétons .Un adjuvant présente une fonction secondaire qui est le plus souvent indépendante de la fonction principale L'emploi d'un adjuvant peut aussi entraîner des effets secondaires non recherchés (non souhaités). L'efficacité de la fonction principale de chaque adjuvant peut varier selon son dosage et sa compatibilité avec le matériau utilisé. Dans leur ensemble, les adjuvants ne doivent pas contenir de chlore.

## **II.3. Classe des adjuvants :**

### **II.3.1. Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton :**

Ces adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons à l'état frais, avant le début de prise. Ils abaissent le seuil de cisaillement de la pâte en modifiant sa viscosité.

Ce sont en général des produits de synthèse, Ils sont à base de lignosulfonates, de sels d'acides organiques, de mélamine sulfonates, de naphthalène sulfonates et de dérivés de mélamine ou naphthalène.

Ces adjuvants ont des effets sur la valeur d'affaissement au cône d'Abrams. Plus le dosage en adjuvant est important, plus l'affaissement est grand .L'affaissement cesse lorsque l'on atteint le dosage de saturation ou l'adjuvant n'a plus d'effet. La viscosité peut être caractérisée par le temps d'écoulement dans un entonnoir : le temps d'écoulement baisse avec l'augmentation de l'adjuvant cela se traduit par une viscosité faible.

### **II.3.1. Adjuvants plastifiants :**

#### **II.3.1.1. Définition :**

Ces adjuvants ont pour fonction principale d'augmenter l'ouvrabilité du béton, du mortier ou du coulis, sans en diminuer les résistances mécaniques. Les plastifiants jouent sur la viscosité de la pâte de ciment en défloculant les grains, diminuant les frottements inter granulaires, et modifient les charges électriques de surface. L'amélioration de la plastification des bétons et de leur stabilité (diminution du risque de ségrégation), facilite la mise en place, tout en n'alternant pas les résistances.

#### **II.3.1.2. Description des adjuvants plastifiants :**

Les plastifiants réducteurs d'eau sont des produits qui viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment et provoquent une défloculation des grains de ce dernier. Ce processus permet, soit une amélioration de la maniabilité sans augmenter le dosage en eau, soit une réduction du rapport eau/ciment conduisant à une augmentation des résistances mécaniques.

À même dosage, leur effet dépend de la réactivité du ciment, des ions en solution dans l'eau interstitielle du béton, de la durée de malaxage et du moment plus ou moins tardif de leur introduction [19]

Les plastifiants réducteurs d'eau peuvent être classés d'après leur nature chimique et on trouve les réducteurs d'eau à base de lignosulfonates (**LS**).

### II.3.1.3. Mécanismes d'action des adjuvants plastifiants :

Les grains de ciment en contact avec l'eau ont tendance à s'agglomérer sous forme d'amas ayant une structure en château de cartes, c'est la floculation. Ce phénomène est lié à la présence de charges électriques sur la surface des grains qui tend à piéger un certain volume d'eau à l'intérieur des floes et empêcher l'eau d'hydrater certaines parties des surfaces des grains de ciment.

Les adjuvants réducteurs d'eau augmentent la surface des grains de ciment qui engendre l'hydratation initiale, ainsi que la quantité d'eau disponible pour l'hydratation.

De plus, les charges électrostatiques sont à l'origine du développement autour de chaque grain, d'une gaine formée de molécules d'eau orientées qui empêchent le rapprochement des grains les uns vers les autres et qui ont alors une plus grande mobilité et l'eau libérée du système floculé devient disponible pour lubrifier le béton et faire croître sa maniabilité.

Plusieurs mécanismes d'adsorption régissent le mode d'action des dispersants sont possibles :

1- les super plastifiants s'adsorbent sur la surface des particules et changent ainsi leurs propriétés superficielles dans les suspensions : la charge des particules devient plus négative et les particules n'ont plus tendance à s'agglomérer.

2- les polymères adsorbés à la surface peuvent empêcher le rapprochement des particules entre elles par encombrement stérique, surtout si les chaînes polymériques sont suffisamment longues.

3- l'adsorption d'une couche de polymère peut agir comme lubrifiant en permettant un meilleur glissement des particules les unes par rapport aux autres. Les suspensions peuvent ainsi s'écouler plus aisément et elles deviennent plus maniables.

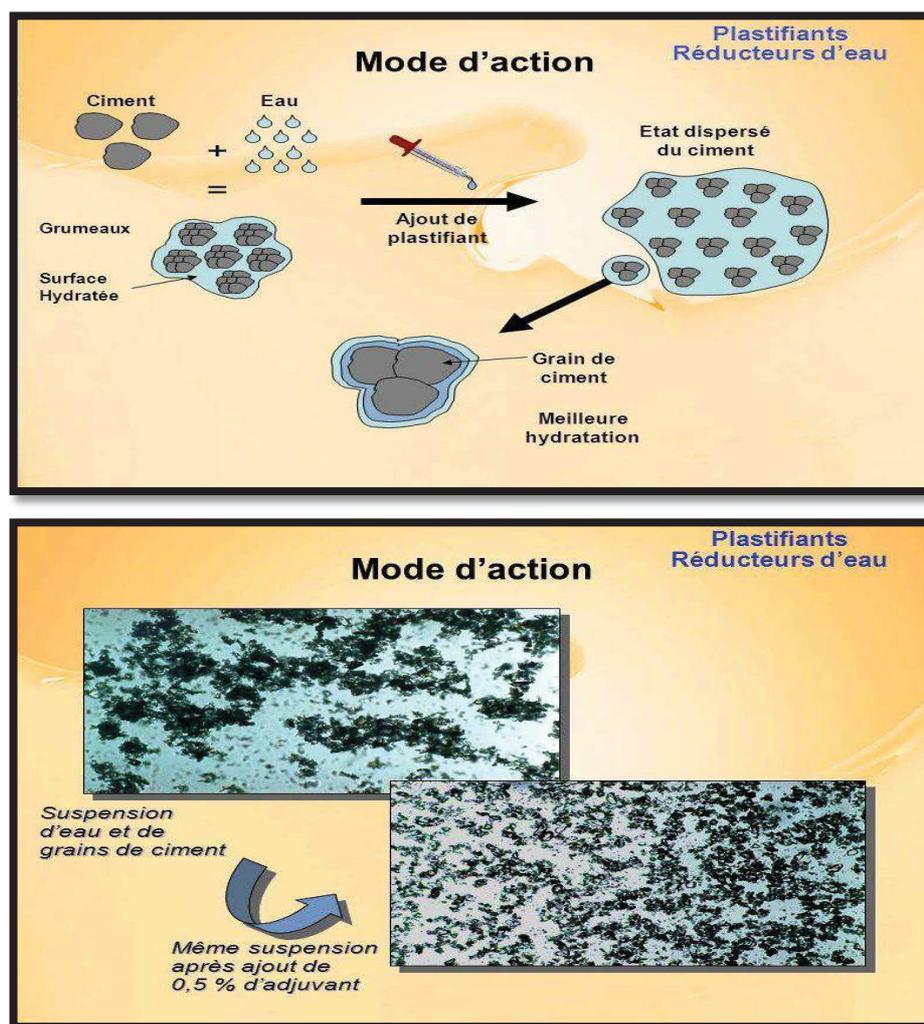


Figure II-1 : Mode d'action des adjuvants plastifiant.

#### II.3.1.4. Domaines d'utilisation les adjuvants plastifiants :

Les plastifiants sont utilisés dans les cas suivants :

- Béton pour dallages (béton pompé).
- Béton maigre (blocs manufacturés)
- Béton très ferrailé.

## II.3.2. Adjuvants super plastifiants :

### II.3.2.1. Définition :

Un adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau est un adjuvant qui, sans modifier la consistance, permet de réduire fortement la teneur en eau d'un béton donné, en augmentant considérablement l'affaissement (l'étalement).

### II.3.2.2. Description des adjuvants superplastifiants :

Les superplastifiants hauts réducteurs d'eau sont des polymères de synthèse fabriqués spécialement pour l'industrie du béton. Ils sont à base de sels de sodium ou de calcium de poly-naphtalène sulfoné (PNS), polymère avec des fonctions polycarboxylate polyoxéthylène (PCP), de sel de sodium de poly-mélatamine sulfoné(PMS).

✓ **Polynaphtalène sulfonâtes(PNS).**

Le PNS est un polymère composé d'un aldéhyde et de naphtalène sulfoné, sont d'une efficacité dispersante très liée à la nature du ciment [20]

✓ **Poly mélatamine sulfonâtes(PMS).**

Le PMS est une poly mélatamine sulfonâtes synthétisée à partir de la mélatamine, de forma aldéhyde

✓ **Poly carboxylate polyoxéthylène (PCP).**

Le PCP est un polymère dont le mécanisme de dispersion se fait par une répulsion combinée d'effets électrostatiques. Le groupement fonctionnel est formé d'acides métacryliques ou acryliques [21]

### II.3.2.3. Mécanismes d'action des adjuvants superplastifiants :

Lorsque les molécules organiques des superplastifiants sont introduites dans une suspension d'un matériau cimentaire, une grande partie d'entre elles vient se fixer à la surface des particules de ciment (adsorption).

Ces dernières réduisent les forces attractives d'interactions inter particulaires, qui existent entre les atomes des différentes particules.

Les adjuvants superplastifiants, par leur effet physique modifiant les forces interparticulaires, peuvent intervenir dans les processus chimiques de l'hydratation et notamment dans la nucléation et la croissance cristalline.

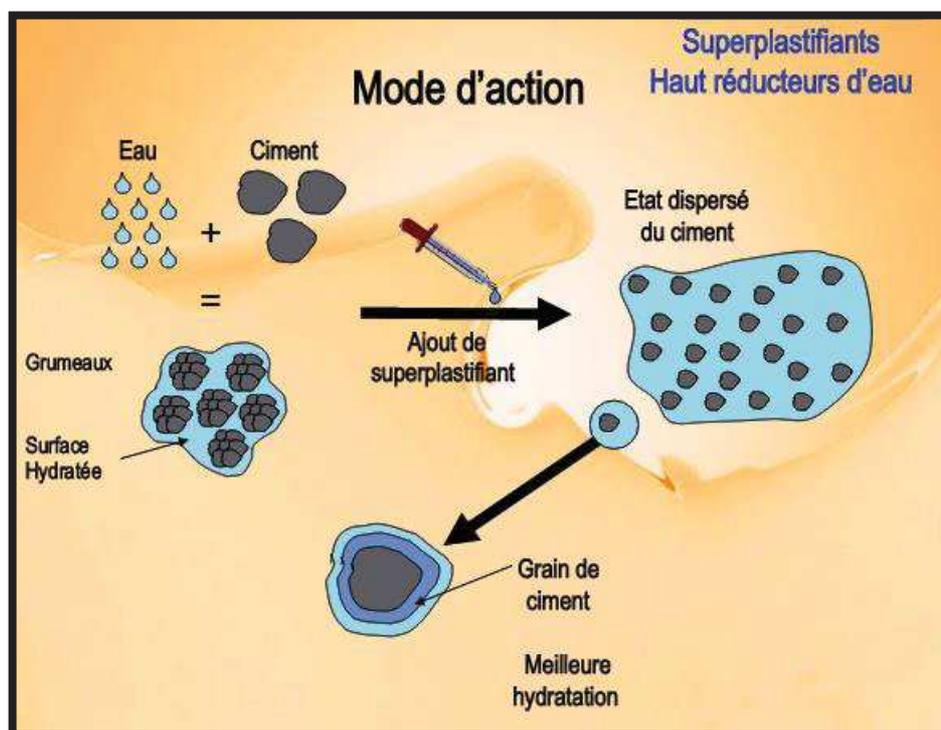


Figure II-2 : Mécanismes d'action des adjuvants superplastifiants.

#### II.3.2.4. Domaines d'utilisation les adjuvants superplastifiants :

Les superplastifiants sont utilisés dans les cas suivants :

- Bétons à compacité, et donc durabilité.
- Bétons à haute performance.
- Bétons autoplaçants

#### II.3.3. Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement :

Ce sont des produits chimiques qui modifient la solubilité des constituants du ciment et leur vitesse de dissolution. Physiquement, cette action se traduit par l'évolution de la résistance au jeune âge, en fonction de l'adjuvant utilisé (le graphe suivant illustre le phénomène)

### **II.3.3.1. Les adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement :**

#### **II.3.3.1.1. Définition :**

Ce produit accélère le développement des résistances initiales des bétons. La durée de prise est fréquemment raccourcie à un délai compatible avec la mise en œuvre.

#### **II.3.3.1.2. Description des adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement :**

Le chlorure de calcium (**CaCl<sub>2</sub>**) demeure sans contestation, l'accélérateur de prise et de durcissement le plus efficace et le plus économique [22]

Cependant, en matière d'accélération de durcissement du béton, on oublie trop souvent que l'on peut obtenir des gains de résistance substantiels à très brève échéance, dix-huit à vingt – quatre heures, en diminuant le rapport (E/C) du béton .En effet, il est tout à fait possible d'obtenir des résistances supérieures à 20 MPa en moins de dix-huit heures sans chauffer le béton.

#### **II.3.3.1.3. Mécanismes d'action des adjuvants accélérateurs de prise et de Durcissement :**

Les accélérateurs de prise et de durcissement sont, en général, des sels minéraux, de chlorure de calcium. On n'admet généralement que le chlorure de calcium favorise la croissance du silicate de calcium hydraté.

Les ions sont susceptibles d'avoir un effet sur la vitesse de prise du ciment par précipitation d'une nouvelle phase ; ce sont des hydroxydes ou des sels basiques de magnésium, de zinc, de plomb ou des sels de calcium, sulfate et carbonate peu solubles.

Les sels de magnésium ont un effet accélérateur semblable à celui des sels de calcium. Les carbonates peuvent provoquer une prise très rapide ou bien la retarder suivant la concentration à laquelle ils sont ajoutés. Ces produits ne sont pas utilisés en pratique car leur action est difficile à maîtriser.

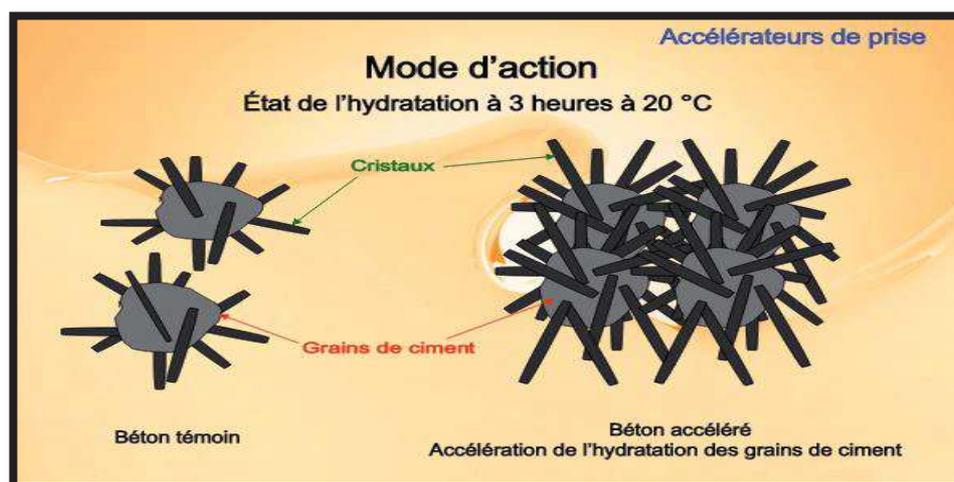


Figure II-3 : Mécanismes d'action des adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement.

#### II.3.3.1.4. Domaine d'utilisation les adjuvants accélérateurs de prise et de Durcissement :

Les accélérateurs de prise trouvent leur utilisation dans :

- Décoffrage rapide (réduction du temps de prise).
- Bétonnage par temps froid.
- Mise du béton hors-gel.
- En préfabrication : augmentation de la rotation des coffrages.
- Travaux d'étanchéité, travaux en mer (entre deux marées).
- Réparations rapides, réfection rapide des routes.

#### II.3.3.2. Les adjuvants retardateurs de prise :

##### II.3.3.2.1. Définition :

Ce produit accroît le temps de passage entre l'état plastique et l'état solide, sans influencer notablement le développement ultérieur des résistances, souvent supérieures aux résistances du béton témoin, au-delà de 28 jours, et même dans un délai plus court.

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une brusque augmentation de la viscosité de la pâte puis son échauffement. La fin de prise correspond au moment où la pâte devient totalement rigide.

### II.3.3.2.2. Description des adjuvants retardateurs de prise :

Même si l'on sait qu'un certain nombre de sels minéraux comme le méta borate ( $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_4$ ) et le tétra borate de sodium ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), le sulfate d'étain ( $\text{SnSO}_4$ ), l'acétate de plomb  $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$ , le mono phosphate de calcium ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ), retardent la prise et le durcissement du béton, on ne les utilise guère de nos jours dans la formulation des retardateurs. On préfère utiliser des molécules organiques appartenant à la famille des sucres.

Parmi les retardateurs les plus couramment utilisés, le gluconate de sodium. Ces produits entrent aussi couramment dans la formulation des réducteurs d'eau, et des superplastifiants commerciaux de façon à contrecarrer l'effet des réducteurs d'eau sur la consistance des bétons.

### II.3.3.2.3. Mécanismes d'action des adjuvants retardateurs de prise :

Les retardateurs sont généralement des molécules organiques comme les sucres, les sels d'acides hydroxycarboxyliques et les lignosulfonates.

Il semble que leur pouvoir retardateur soit lié à la propriété de complexation des ions  $\text{Ca}^{2+}$ . On suppose que les molécules de l'adjuvant complexent les ions  $\text{Ca}^{2+}$  de la surface des germes d'hydrates (car leur croissance procède par la condensation des ions silicate sur ces ions  $\text{Ca}^{2+}$ ).

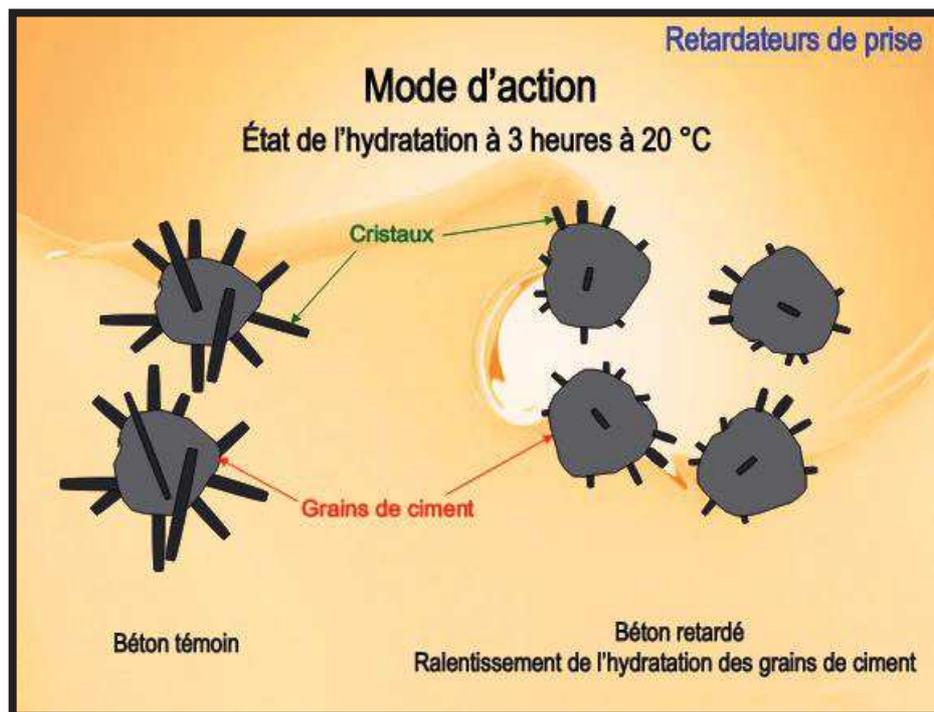


Figure II-4 : Mécanismes d'action des adjuvants retardateurs de prise.

#### II.3.3.2.4. Domaine d'utilisation les adjuvants retardateurs de prise [23] :

Les retardateurs de prise sont utilisés pour :

- Les bétons mis en place sur de fortes épaisseurs (ouvrages d'art, barrages..).
- Tout bétonnage par temps chaud.
- Transports de béton sur de longues distances.
- Bétons injectés en continu.
- Parois moulées dans le sol.
- Reprises de bétonnage (pour coulages effectués par tranches décalée de plusieurs heures).
- Mortiers stabilisés utilisables plusieurs jours sur chantier.

### **II.3.4. Les adjuvants entraîneurs d'air :**

#### **II.3.4.1. Définition [24] :**

Ce produit entraîne et stabilise un nombre élevé de bulles d'air petites et séparées, réparties uniformément dans la masse. Il peut améliorer l'ouvrabilité et la cohésion des mélanges frais.

#### **II.3.4.2. Description des adjuvants entraîneurs d'air :**

De nombreuses molécules de surfactants pourraient être utilisées dans la formule des agents entraîneurs d'air. Dans la pratique, seules quelques molécules sont, en fil utilisées.

- Oléate de Sodium.
- Alkyl-Arylsulfonates de Sodium.
- Podécylsulfate de Sodium.

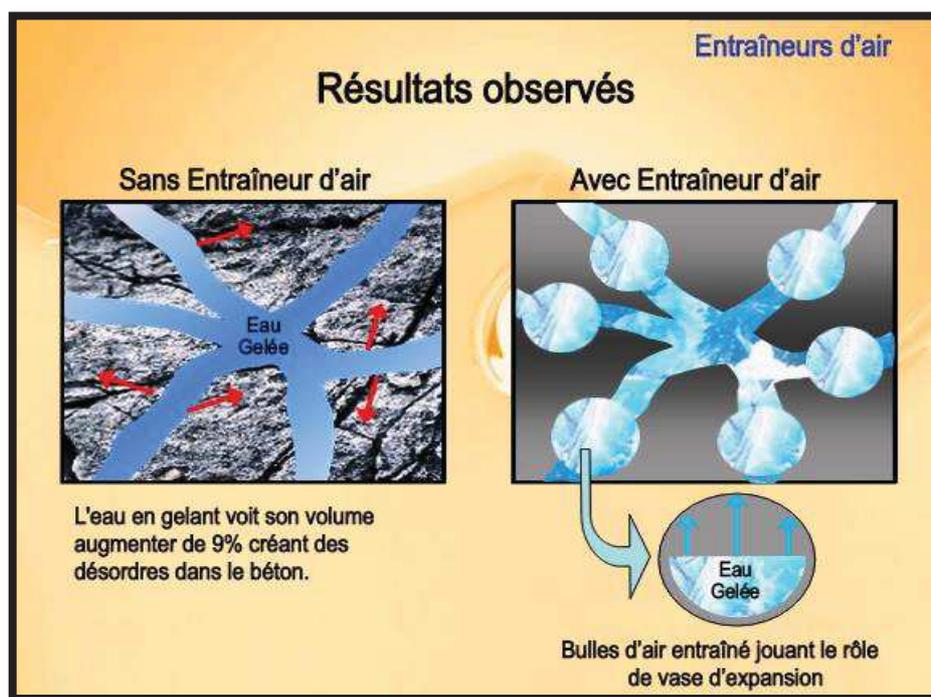
En l'absence d'agents entraîneurs d'air, un béton courant contient toujours un certain nombre de bulles d'air dont le diamètre est presque toujours supérieur à un millimètre.

#### **II.3.4.3. Mécanismes d'action des adjuvants entraîneurs d'air :**

Les bulles d'air sont créées par cisaillement lors du malaxage des bétons mais, en l'absence d'adjuvant. Le rôle des entraîneurs d'air n'est donc pas de créer les bulles mais de les stabiliser.

Les molécules des produits entraîneurs d'air sont tensio-actives, Elles possèdent en général, un radical hydrophile et un radical hydrophobe, de sorte que leur position d'équilibre est à l'interface de l'eau et de l'air

Dans certains cas, les molécules réagissent avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, en formant un précipité insoluble.



**Figure II-5 :** Mécanismes d'action des adjuvants entraîneurs d'air.

Les adjuvants entraîneurs d'air sont utilisés dans les cas suivants :

- Les routes.
- Les barrages.
- Les ponts.
- Les travaux maritimes.
- Les travaux en montagne.
- Les ouvrages exposés au gel et à l'action des eaux agressives.



### III.1. METHODOLOGIE DE TRAVAIL :

Dans cette partie, nous exposons les différentes étapes que nous avons suivies pour réaliser ce travail. Les mélanges des bétons ont été effectués selon les normes et les essais sur béton frais et durci et réalisés selon une méthode décrite ci-dessous. Pour cela, le plan de travail que nous avons dressé est partagé en quatre étapes :

**ETAPE 1** : Analyse physico-chimiques et mécanique des constituants du béton.

**ETAPE 2** : Optimisation de la composition du béton de référence.

Calcul de la composition par la méthode Bolomy.

**ETAPE 3** : résultats d'essais selon la méthode(**Bolomy**).

**ETAPE 4** : interprétation des résultats et conclusion.

### III.2. MATERIELS UTILISE :

Les matériels utilisés sont :

- Tamiseuse manuelle pour l'analyse granulométrique.
- Balance.
- Etuve de séchage.
- Malaxeur à béton.
- Presse de compression.
- Cône d'Abrams.

### III.3. CARACTERISATION DES MATERIAUX :

Dans ce chapitre, nous exposons les différentes caractéristiques des constituants ainsi que les étapes que nous avons suivies pour la détermination de la composition d'un béton ordinaire, à partir matières premières utilisées sont d'origine locale.

#### III.3.1. CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS :

Dans ce chapitre, on traite la détermination des caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton. La connaissance de leurs caractéristiques est impérative à toute recherche ou étude d'investigation, puisque chacune pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. C'est pour cette raison qu'on procède à la caractérisation de chaque constituant du béton.

##### III.3.1.1. Ciment :

On a utilisé le ciment MATINE CPJ-CEM II /B 42.5 N (NA 442), les caractéristiques du ciment inscrite sur la fiche technique sont données dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 1 :** Analyses chimiques (NA 5042).

Paramètre	Valeur
Pert au feu	7.5 – 12
Résidus insoluble	0.7 – 2
Teneur en sulfates $SO_3$	2 - 2.7
Teneur en oxyde de magnésium	1 - 2.2
Teneur en chlorures	0.01 - 0.05
Teneur équivalent en alcalis	0.3 - 0.75

**Tableau III.2 :** Composition minéralogique du ciment (CLINKER).

Minéraux	Pourcentage
$C_3S$	58 – 64
$C_2S$	12 – 18
$C_3A$	6 – 8
$C_4AF$	10 – 12

**Tableau III.3 :** Caractéristiques physiques du ciment MATINE.

Caractéristique	Valeurs	Unité
S.S. Blaine (NA 231)	4150 – 5250	Cm <sup>2</sup> /g
Consistance normale	25 – 28.5	%
Début de prise (NA 230)	140 – 195	Min
Fin de prise (NA 230)	195 – 290	Min
Retrait à 28 jours	<1000	µm/m
Expansion	0.3 – 2.5	Mm

**Tableau III.4 :** Résistance à la compression (NA 234)

Age	2 jours	28 jours
Résistance à la compression	différent ≥ 10Mpa	≥ 42.5Mpa

### III.3.1.2. EAU DE GACHAGE :

L'eau utilisée pour le gâchage du béton est une eau potable de la ville de BOUDOUAOU.

### III.3.1.3. LES GRANULATS :

#### III.3.1.3.1 SABLE :

Les sables utilisés sont : sable roulé grossier (S1) (AZROU KEDDARA), et sable fin roulé (S2) de (OUED SOUF).

Après traitement des deux sables, on a obtenu les résultats des essais physiques et l'analyse granulométriques suivants :

## ❖ PROPRIETES PHYSIQUES DE SABLE DE

**KEDDARA :****Tableau III.5 :** Caractéristiques de sable de **KEDDRA**

Caractéristiques	Unité	Résultats
- Masse volumique apparente	Kg/m <sup>3</sup>	1617
- Masse volumique absolue.	Kg/ m <sup>3</sup>	2168
- Tenure en eau.	%	1.26
- Tenure de fines	%	10.2
- E.S.V	%	70.8

**ANALYSE GRANULOMETRIQUE ET CLASSE GRANULAIRE**

Prise d'essais : 1000g.

**Tableau III.6 :** Analyse granulométrique du sable de **Keddara**

Ouverture de tamis en mm	Poids (g)		Pourcentage (%)		Mf
	Refus Cumulus	Refus Cumulus	Tamisats		
6,30	0	0	100		3.67
4	49	4.92	95.08		
2	409	41.14	58.86		
1	645	64.88	35.12		
0.5	796	78.87	21.13		
0.25	866	87.12	12.78		
0.125	898	90.34	9.66		
0.063	912	91.75	8.25		
<0.063	931	93.66	6.34		

## ❖ PROPRIETES PHYSIQUES DE SABLE DE OUED

SOUF :

Tableau III.7 : Caractéristiques de sable de Oued souf

Caractéristiques	Unité	Résultats
-Masse volumique apparente.	Kg/m <sup>3</sup>	1647
- Masse volumique absolue.	Kg/m <sup>3</sup>	2630
- Teneur en eau.	%	1.62
- Teneur en fines	%	1.83
- E.S	%	65

## ANALYSE GRANULOMETRIQUE ET CLASSE GRANULAIRE

Prise d'essais 500g.

Tableau III.8 : Analyse granulométrique du sable de Oued souf

Ouverture de tamis En mm	Poids (g)	Pourcentage (%)		Mf
	Refus cumulus	Refus cumulus	Tamisats	
4	0	0	100	2.22
2	17	3.45	96.55	
1	71	14.43	85.57	
0.5	222	45.12	54.88	
0,25	391	79.47	20.53	
0.125	476	96.74	3.26	
0.063	483	98.17	1.83	
<0.063	486	98.32	1.68	

L'analyse granulométrie montre que le module de finesse du sable S1 est  $Mf_1=3.67$ , nécessite une correction à cause de sa grosseur. Pour la correction on utilise le sable S2 avec un  $Mf_2 = 2.22$

#### ❖ Analyses de sable corrigé :

✓ On fixe un module de finesse égale à 3

$$S_1\% = [Mf - Mf_2] / [Mf_1 - Mf_2]$$

$$= [3 - 2.22] / [3.67 - 2.22]$$

$$S_1\% = 53.8\%$$

$$S_2\% = [Mf_1 - Mf_2] / [Mf_1 - Mf_2]$$

$$= [3.67 - 3] / [3.67 - 2.22]$$

$$S_2\% = 46.2\%$$

$Mf_1=3.67$  (sable grossier S<sub>1</sub>)

$Mf_2=2.22$  (sable fin S<sub>2</sub>)

$Mf=3$  (sable corrigé)

### III.3.1.3.2. LES GRAVIERS :

#### ❖ LE GRAVILLON (3/8).

Le gravier utilisé dans notre béton provient de la Carrière de Keddara : prise d'essais 1700g.

#### • PROPRIETES PHYSIQUES :

Tableau III.9 : Caractéristiques du G<sub>3/8</sub> de Keddara

Caractéristiques	Unité	Résultats
- Masse volumique apparente	Kg/m <sup>3</sup>	1465
- Masse volumique absolue	g/cm <sup>3</sup>	2645
- absorption	%	2.66
- Teneur en eau	%	2.96
- compacité	%	45

### ➤ ANALYSE GRANULOMETRIQUE

**Tableau III.10** : Analyse granulométrique du G3/8

Ouverture de tamis	Poids (g)	Pourcentage (%)	
	Refus	Refus	Tamisats
10	00	00	100
8	81	4.9	95.1
6.30	588	35.61	64.39
4	1541	93.33	6.67
2	1619	98.08	1.92
1	1627	98.54	1.42
0.5	1630	98.72	1.28
0.250	1632	98.84	1.16
0.125	1634	98.97	1.03
0.063	1638	99.21	0.79
<0.063	1639		0.79

#### ❖ LE GRAVILLON (G8/15).

Le gravier utilisé dans notre béton auto plaçant provient de la carrière de keddara

Prise d'essais 3200g.

#### • PROPRIETES PHYSIQUES :

**Tableau III.11** : Caractéristiques du G8/15 de Keddara

Caractéristiques	Unité	Résultats
- Masse volumique apparente.	Kg/m <sup>3</sup>	1384
- Masse volumique absolue	kg/m <sup>3</sup>	2740
- Absorption	%	2.35
- Teneur en eau	%	1.42
- Compacité.	%	50

### ➤ ANALYSE GRANULOMETRIQUE

**Tableau III.12** : Analyse granulométrique du G8/15

Ouverture de tamis	Poids (g)	Pourcentage (%)	
	Refus	Refus	Tamisats
20	00	00	100
16	96	3	97
14	797	25.2	74.8
12.5	1488	47.1	52.9
10	2539	80.4	19.6
8	3033	96.1	03.9
6.3	3103	98.3	1.7
4	3109	98.5	1.5
2	3110	98.5	1.5
1	3111	98.6	1.4
0.5	3111	98.6	1.4
0.25	3112	98.6	1.4
0.125	3113	98.6	1.4
0.063	3121	98.9	1.1

L'analyse granulométrique des gravillons (3/8, 8/15) ainsi que leurs résistances au choc dynamique et l'usure par frottement a montrée que les gravillons possèdent des caractéristiques qui leurs permettent de se rapprocher d'un gravillon normalisé.

### III.3.1.3.3. LES ADJUVANTS :

#### III.3.1.3.3.1ADVA<sub>R</sub>Cast 260 : Super plastifiant –haut réducteur d'eau

Conforme à la norme EN934-2, tab 1, tab3, 1, tab 3,2 et NA17052-2

#### Description

ADVA<sub>R</sub>Cast 260 est un super plastifiant haut réducteur d'eau. Il est à base de poly carboxylate et il permet sans modifier la consistance, de réduire fortement la teneur en eau de béton à long maintien d'ouvrabilité avec son grand pouvoir réducteur d'eau .

#### Domaine d'application :

- ✓ Les bétons de prefabrication
- ✓ Les bétons prêts à l'emploi.
- ✓ Les bétons lourds et légers.
- ✓ Les bétons d'ouvrage d'art.
- ✓ Les bétons de dallage industriels.
- ✓ Les bétons de batiments.
- ✓ Les bétons précontraints.
- ✓ Les bétons pompés .
- ✓ Les bétons pour fondation profondes.
- ✓ Les bétons pour ouvrages fortement ferrailés.
- ✓ Les bétons soumis à des milieux agressifs.
- ✓ Les BHP, BTHP et BUHP.
- ✓ Les bétons autonivelants-bétons autoplacants.
- ✓ Les bétons architectoniques.

**Mise en œuvre :**

Grace à ses propriétés le **ADVA RCast 260** permet :

**Sur béton frais :**

- Obtenir un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Eviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton

**Sur béton durci :**

- Augmenter la résistance mécanique à jeune et à long terme.
- Diminuer la porosité.
- Augmenter la durabilité.
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration.

**Caractéristiques techniques :**

- Liquide amber.
- Densité :  $1.1 \pm 0.02$
- Ph : 5.2-5.6
- Teneur en chlorure :  $\leq 0.10\%$
- Point de congélation :  $0^{\circ}\text{C}$

**Dosage :**

Plage de dosage recommandée : 0.4 à 2.5% du poids de ciment Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

**Effet surdosage :**

Le surdosage de **ADVA RCast 260** a pour effet une augmentation de la maniabilité et dans certaines circonstances, il peut conduire à une ségrégation de béton

**Délai de conservation :**

Une année dans son emballage d'origine à l'abri de gel et de chaleur ( $5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$ )

**Précautions d'emploi :**

Manipulation non dangereuse

**III.3.1.3.3.2. CHRYSO FLUID 220:**

**CHRYSO FLUID 220** est un superplastifiant à haut réducteur d'eau de nouvelle génération à base de polycarboxylate modifié, particulièrement recommandé pour le béton prêt à l'emploi et les chantiers de génie civil.

Il est destiné à créer une forte réduction d'eau et/ou une augmentation de l'ouvrabilité du béton. Il permet de réaliser des bétons avec un long maintien d'ouvrabilité sans retard de prise. Ainsi le **CHRYSO FLUID OPTIMA 220** peut être utilisé dans une gamme étendue de béton, et il est compatible avec la majorité des ciments.

**Application :**

- BPE
- Ouvrages d'art
- BHP –BTHP
- Bétons plastiques très fluides
- Bétons autoplaçants

**Dosage :**

Plage de dosage recommandée de 0,3 à 2,0 % du poids de ciment, le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

**Mode d'emploi :**

Dans le cas d'un ajout différé sur le béton frais et dans un camion malaxeur, il est nécessaire de malaxer à grande vitesse de 1 minute par m<sup>3</sup> de béton (avec un minimum total 6 minutes)

**Propriétés et effets**

Grâce à ses propriétés le **CHRYSO Fluide Optima 220** permet :

**a. Sur béton frais :**

- l'obtention d'un E/C très faible.
- l'amélioration considérable de la fluidité.
- une très bonne maniabilité.
- un long maintien de l'ouvrabilité.
- d'éviter la ségrégation.

- de faciliter la mise en œuvre du béton.

**b. Sur béton durci :**

- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme.

- de diminuer la porosité.

- d'augmenter la durabilité.

- de diminuer le retrait et le risque de fissuration.

### III.3.2. Préparation du mortier :

On a la masse totale égale a  $1350g \pm 5g$ , on fixe le rapport  $E/C = 0.5$  et le dosage de ciment dans  $1m^3$  égala 450 kg

$$E = 450 * 0.5 = 225 \text{ l/m}^3$$

On vers l'eau et le ciment puis malaxé pendant 30 s à 140 T/min, après en ajoute le sable corrigé et malaxé de 258 T/min pendant 30 s

Après le malaxage en remplit les éprouvettes

Résistance à la compression (Mpa)	7 jours	28 jours
mortier	17.9	34.9

### III.3.3. METHODE BOLOMY :

#### III.3.3.1. METHODE 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 soit 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 :

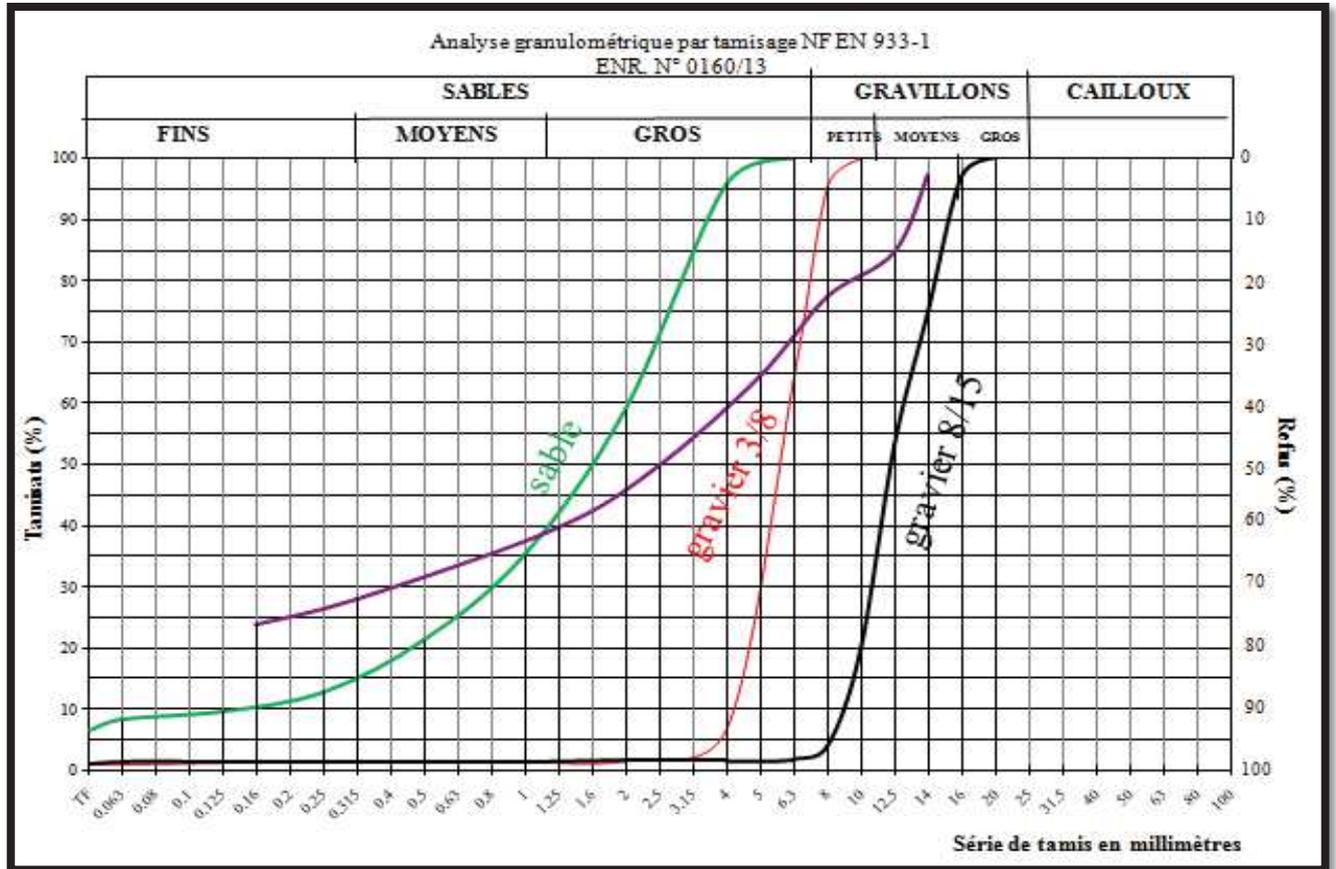
- P : le pourcentage des grains passant à la passoire de diamètre d.
- D : diamètre du plus gros grain
- A : varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus faible.

D'après la courbe de référence de Bolomy on obtient les pourcentages suivants :

Sable	—————>	58%
Gravier 3/8	—————>	19%
Gravier 8/15	—————>	23%

### III.3.3.2. DOSAGE EN POURCENTAGE DES GRANULATS

#### ❖ COURBE GRANULAIRE DE REFERENCE



#### III.3.3.3. LES DONNES DE BASE :

On choisit le dosage de ciment de  $450 \text{ kg/m}^3$ , le rapport :  $E/C = 0.5$ ,

#### III.3.3.4. OPTIMISATION DE LA COMPOSITION DU BETON

Volume de la pâte pour  $1 \text{ m}^3$  du béton :  $383 \text{ l/m}^3$

- $143 \text{ l/m}^3$  du ciment.
- $E/C = 0.5$
- $E = 225 \text{ L/m}^3$
- Vide =  $15 \text{ L/m}^3$

### a. Détermination de la masse de chaque constituant

$$\checkmark C = 450 \text{ Kg/m}^3$$

$$\checkmark E/C = 0.5$$

$$\text{Donc eau} = 225 \text{ L/m}^3$$

- **volume des granulate**

$$1000 - 383 = 617 \text{ m}^3$$

- Sable 0/2  $\frac{22 \times 617}{100} = 135.74 \text{ l}$

$$m = v \times \rho = 135.74 \times 2.63 = 357 \text{ kg}$$

$$\text{Sable 0/2} = 357 \text{ kg}$$

- Sable 0/4  $\frac{31.2 \times 617}{100} = 198 \text{ l}$

$$m = v \times \rho = 198 \times 2.68 = 530.64 \text{ kg}$$

$$\text{Sable 0/4} = 530.64 \text{ kg}$$

- Gravier 3/8  $\frac{19 \times 617}{100} = 117.2 \text{ l}$

$$m = v \times \rho = 117.2 \times 2.64 \text{ kg}$$

$$\text{G 3/8} = 309.5 \text{ kg}$$

- Gravier 8/15  $\frac{23 \times 617}{100} = 141.91 \text{ l}$

$$m = v \times \rho = 141.91 \times 2.74$$

$$\text{G 8/15} = 388.83 \text{ kg}$$

**b. Les masses des constituants pour 1 m<sup>3</sup>**

✓ Eau = 225 L/m<sup>3</sup>

✓ Ciment = 450 Kg/m<sup>3</sup>

✓ Gravier= 698.33 Kg /m<sup>3</sup>

G3/8 = 309.5 Kg/m

G8/15 = 388.83 Kg /m<sup>3</sup>

✓ Sable = 887.6 Kg/m<sup>3</sup>

S0/2 =357 Kg/m<sup>3</sup> → 22%

S0/4 =530.6 Kg/m<sup>3</sup> → 31.2%

**III.3.4. Les formulations****1<sup>er</sup> formulation du béton témoin :**

Le rapport E/C=0.5

Constituent	Ciment	Eau	Sable 0/2	Sable 0/4	Gravier3/8	Gravier8/15
Masse (kg)	18	9	14.3	21.2	12.4	15.5

**2<sup>eme</sup> formulation du béton dosé à 0.5% d'adjuvant chryso :**

Le rapport E/C=0.4

constituent	Ciment	eau	Sable 0/2	Sable 0/4	Gravier3/8	Gravier8/15	Adjuvant
Masse (kg)	18.89	7.5	16	23.1	14.7	17.5	0.09

**3<sup>eme</sup> formulation du béton dosé à 1% d'adjuvant chryso :**

Le rapport E/C=0.35

constituant	Ciment	eau	Sable 0/2	Sable 0/4	Gravier3/8	Gravier8/15	Adjuvant
Masse (kg)	19.3	6.8	16.8	24.1	14.5	18.3	0.24

**4<sup>eme</sup> formulation du béton dosé à 1.5% d'adjuvant chryso :**

Le rapport E/C=0.3

Constituant	Ciment	eau	Sable 0/2	Sable 0/4	Gravier3/8	Gravier8/15	Adjuvant
Masse (kg)	19	5.7	17	24.6	14.8	18.5	0.35

**5<sup>eme</sup> formulation du béton dosé à 0.5% d'adjuvant Adva cast :**

Le rapport E/C=0.4

constituant	Ciment	eau	Sable 0/2	Sable 0/4	Gravier3/8	Gravier8/15	Adjuvant
Masse (kg)	18.89	7.5	16	23.1	14.7	17.5	0.09

**6<sup>eme</sup> formulation du béton dosé a 1% d'adjuvant Adva cast:**

Le rapport E/C=0.35

constituant	Ciment	eau	Sable 0/2	Sable 0/4	Gravier3/8	Gravier8/15	Adjuvant
Masse (kg)	19.3	6.8	16.8	24.1	14.5	18.3	0.24

**7<sup>eme</sup> formulation du béton dosé à 1.5% d'adjuvant Adva cast :**

Le rapport E/C=0.3

constituant	Ciment	eau	Sable 0/2	Sable 0/4	Gravier3/8	Gravier8/15	Adjuvant
Masse (kg)	19	5.7	17	24.6	14.8	18.5	0.35

**III.4. Conclusion:**

Les caractéristiques physiques des granulats ont une forte influence sur la performance du béton, y compris l'ouvrabilité du béton, la zone de transition, le module d'élasticité, la résistance mécanique, etc.

Le choix des granulats joue un rôle très important dans la composition du béton et de leurs différentes propriétés rhéologiques et mécaniques. Il doit être toujours étudiées en fonction des performances attendues, spécialement sur le plan de la durabilité.

## IV. PROPRIETES DES BETONS :

Le béton est un matériau facile à mouler quel que soit la forme de l'ouvrage, à l'épreuve du temps, économique, résistant au feu et nécessitant peu d'entretien.

Matériau composite, mis en œuvre de multiples manières, il répond à un grand nombre de spécifications :

- Résistance mécanique, notamment à la compression,
- Isolation thermique et phonique,
- Étanchéité,
- Aspect,
- Durabilité,
- Sécurité incendie.

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 plus être modifiée mais que ses caractéristiques continuent à évoluer durant de nombreux mois, voir des années.

### IV.1. LE BETON 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 étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés.

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

De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité :

- Type et dosage en ciment,
- Forme des granulats, granulométrie,
- Emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau.

Un excès d'eau se traduit, entre autres à un inconvénient, le phénomène de «ressuage», qui est la création d'un d'eau à la surface d'une pièce en béton, générateur de fissures après évaporation.

Les autres conséquences d'une trop forte teneur en eau sont :

- la diminution de la compacité et, corrélativement, des résistances ;
- une porosité accrue ;
- un risque de ségrégation des constituants du béton ;
- un retrait augmenté ;
- un état de surface défectueux se traduisant notamment par du 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 effectuée facilement sur chantier avec la méthode du cône d'Abrams ou «Slump test», qui est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronçanique.

**La norme NF EN 206-1 définit cinq classes de consistance.[26]**

<b>Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams – norme NF EN 206-1</b>		
<b>Classe</b>	<b>Consistance du béton</b>	<b>Affaissement (en mm) au cône d'Abrams</b>
<b>S1</b>	Ferme	10 - 40
<b>S2</b>	Plastique	50 - 90
<b>S3</b>	Très plastique	100 - 150
<b>S4</b>	Fluide	160 - 210
<b>S5</b>	Très fluide	≥ 220

**Tableau IV .1** : appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône

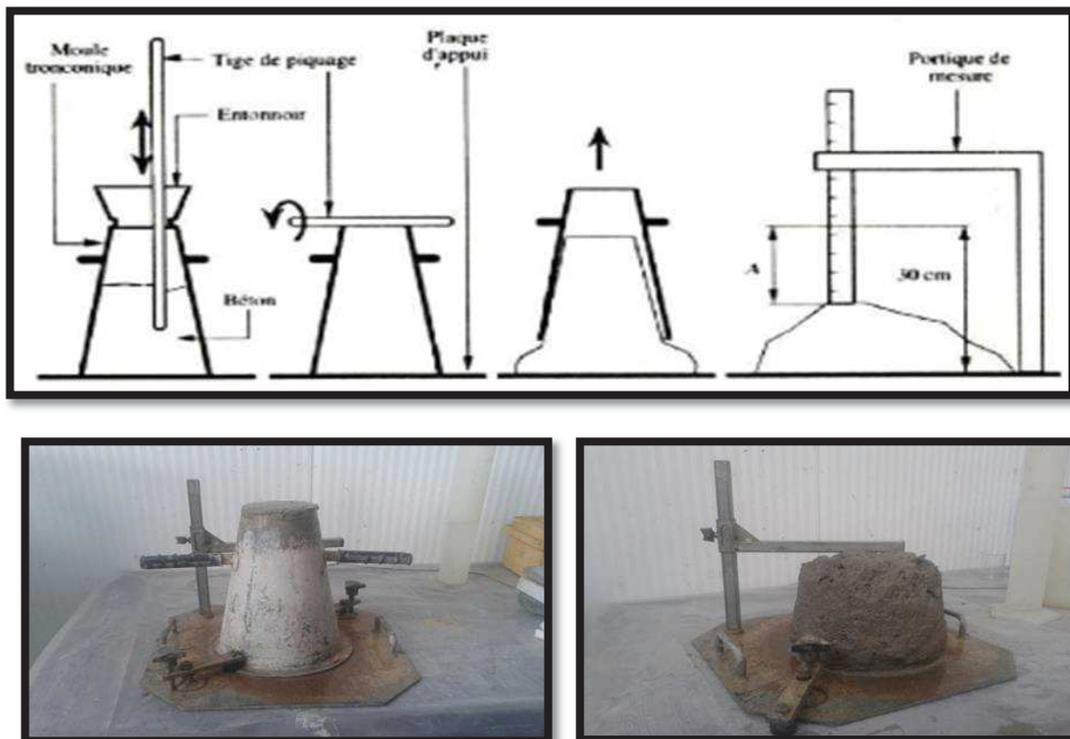


Figure IV. 1 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams

#### IV.1.1. Masse volumique du béton frais :

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage, après un arasement approprié, le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante :

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

$\rho$  : la masse volumique du béton frais ( $\text{kg/m}^3$ ).

$m_1$  : la masse du récipient (Kg).

$m_2$  : la masse de récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (Kg).

$V$  : le volume du récipient ( $\text{m}^3$ ).



**Figure IV. 2** : mesure de la masse volumique.

## **IV.2. LE BETON DURCI :**

### **IV.2.1. LA POROSITE :**

Une caractéristique essentielle du béton durci est sa porosité (rapport du volume des vides au volume total).

Les études de Féret (début du XX<sup>e</sup> siècle) avaient déjà établi le lien entre la porosité du béton et sa résistance.

L'importance de cette caractéristique sur la résistance du béton aux agents agressifs, sur la carbonatation et sur la tenue au gel a été démontrée depuis. C'est donc un facteur déterminant de la durabilité du béton.

La recherche d'une porosité minimale doit nécessairement passer par : l'augmentation de la compacité du béton frais grâce à une bonne composition du béton et à des moyens de mise en œuvre adaptés.

Les compacités réellement atteintes sur chantier ne dépassent guère 0,850 dans 1 m<sup>3</sup> 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 extrêmement fins, répartis dans la pâte de ciment durcie (capillaires) ;

L'augmentation du dosage en ciment et le choix de son type ont 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.

Pour améliorer la compacité du béton, nous jouons sur la granulométrie des granulats dans la fraction des éléments fins, et sur la réduction d'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 les risques de corrosion.

#### IV.2.2. LES RESISTANCES MECANIQUES :

Une bonne résistance à la compression est la performance bien souvent recherchée pour le béton durci.

Cette résistance est généralement caractérisée 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 le type 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 formules qui permettent de prévoir les résistances, celle de Féret est la plus connue.

- **Lors des essais destructifs**, la résistance à la compression peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes généralement cylindriques ; la plus courante en France est l'éprouvette de diamètre 16 cm, hauteur 32 cm ; confectionnées avec le béton destiné à l'ouvrage à contrôler.
- **Les essais non destructifs**, 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).

$$R = k \left( \frac{C}{C + E + V} \right)^2$$

R = résistance du béton

k = coefficient dépendant de la classe de ciment, du type de granulats et du mode de mise en œuvre

C = dosage en ciment

E = dosage en eau

V = volume d'air subsistant

- **Lors des essais destructifs** : Résistance à la compression

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uniaxiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité.

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression, et l'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance sera évaluée en utilisant des échantillons en forme de cubes ou de cylindres. La vitesse de chargement, doit être choisie dans la gamme 0,2 à 1 MPa/s et être maintenue constante à 10% près selon la norme européenne EN 12394 [27]. Les caractéristiques des machines d'essais sont indiquées dans la norme européenne EN 12390-3 [28].

La conduite de l'essai est la suivante : l'éprouvette, une fois rectifiée (surfaçage) doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. La mise en charge doit être effectuée à raison de 0.5 MPa avec une tolérance de  $\pm 0.2$  MPa pour des éprouvettes de 15x15x15cm. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.

La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette, elle est donnée par l'équation suivante :

$$R_c = \frac{F}{S}$$

$R_c$  : Résistance à la compression en MPa (N /mm<sup>2</sup>).

F : Charge maximale (N).

S : l'aire de la section de l'éprouvette (mm<sup>2</sup>).

➤ **Surfaçage :**

Avant d'entamer l'essai, il est recommandé de préparer les éprouvettes en effectuant un surfaçage des deux bases de l'éprouvette selon la machine suivante :



**Figure IV.3 :** la machine de surfaçage



**figure IV.4 :** éprouvette à réctifier

➤ **Principe de l'essai :**

Les éprouvettes sont chargées jusqu' à la rupture dans une machine pour l'essai de compression.

#### **IV.2.2.1. PREPARATION ET POSITIONNEMENT DES EPROUVETTES :**

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

- ❖ Essuyer toute humidité excessive de la surface d'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai.
- ❖ Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés et toutes particules ou corps étrangers retirés des surfaces de l'éprouvette, qui seront en contact avec eux.

❖ Centrer l'éprouvette sur le plateau avec une précision de  $\pm 1\%$  de la dimension du diamètre de l'éprouvette cylindrique.

➤ **Expression des résultats :** La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :  $R_c = F/S$

$R_c$ : La résistance en compression exprimée en *MPa*.

$F$ : La charge maximale exprimée en *MPa*.

$S$ : L'air de la section sur laquelle la force de compression est Appliquée, est exprimée en  $\text{mm}^2$



**Figure IV.5 :** éprouvette ou cure

D'écrasement



**Figure IV.6 :** éprouvette après

l'écrasement

### IV.3. Résultats et interprétations :

#### IV.3.1. Caractérisation du béton à l'état frais :

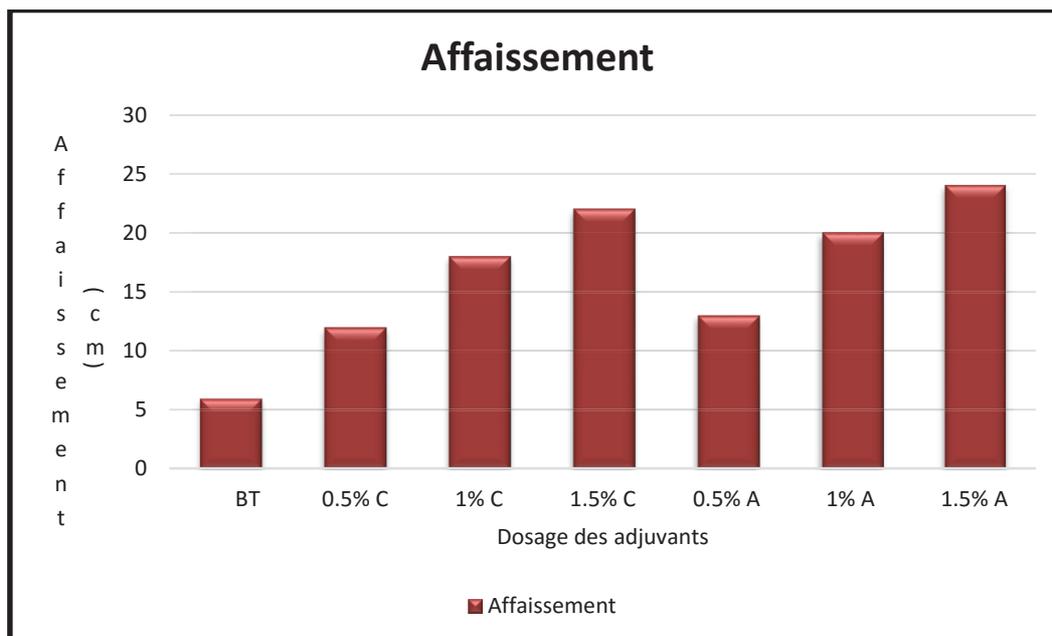
##### IV.3.1.1 Affaissement au cône d'Abrams :

Les principaux paramètres à l'état frais sont l'ouvrabilité (affaissement au cône d'Abrams) et la masse volumique, Le tableau suivant présent l'affaissement des différents bétons formulés.

**Tableau IV-2 : Rapport d'E/C -affaissement**

Type de béton		Produit de	E/C	Affaissement
Béton témoin BT		SANS ADJUVANT	0.50	6
+ CHRYSO	0.5%	SIKA	0.40	12
	1%		0.35	18
	1.5%		0.30	22
+ ADVA	0.5%	MBS	0.40	13
	1%		0.35	20
	1.5%		0.30	24

Afin de mieux comprendre ce phénomène, les résultats obtenus sont présentés sous forme d'histogramme sur la figure suivante :



**Figure IV.7 :** Evolution de l'affaissement au cône d'Abrams des bétons en fonction des différents adjuvants superplastifiants et différents pourcentage.

➤ **Observation et interpretation :**

La figure représente l'évolution de l'affaissement au cône d'Abrams des bétons en fonction des différents adjuvants superplastifiants de différents pourcentages.

D'après l'histogramme, on constate que l'affaissement est plus important quand il s'agit d'un béton adjuvanté par des hauts réducteurs d'eau qu'au béton sans adjuvants.

L'augmentation du dosage (pourcentage) d'adjuvant (ADVA<sub>R</sub>Cast 260, CHRYSO FLUID OPTIMA 220), augmente aussi l'affaissement du béton

Cependant, l'adjuvant ADVA 260 a donné le meilleur affaissement au cône d'Abrams par rapport à l'adjuvant Chryso.

Si on fait une comparaison entre l'effet des deux adjuvants (ADVA<sub>R</sub> Cast 260, CHRYSO FLUID OPTIMA 220), il est presque le même sur le béton.

### IV.3.1.2. Masses volumiques :

Les masses volumiques des bétons ont été déterminé par la formule suivante :

$$\rho = \frac{M}{V}$$

M : la masse du béton.

V : le volume de l'éprouvette.

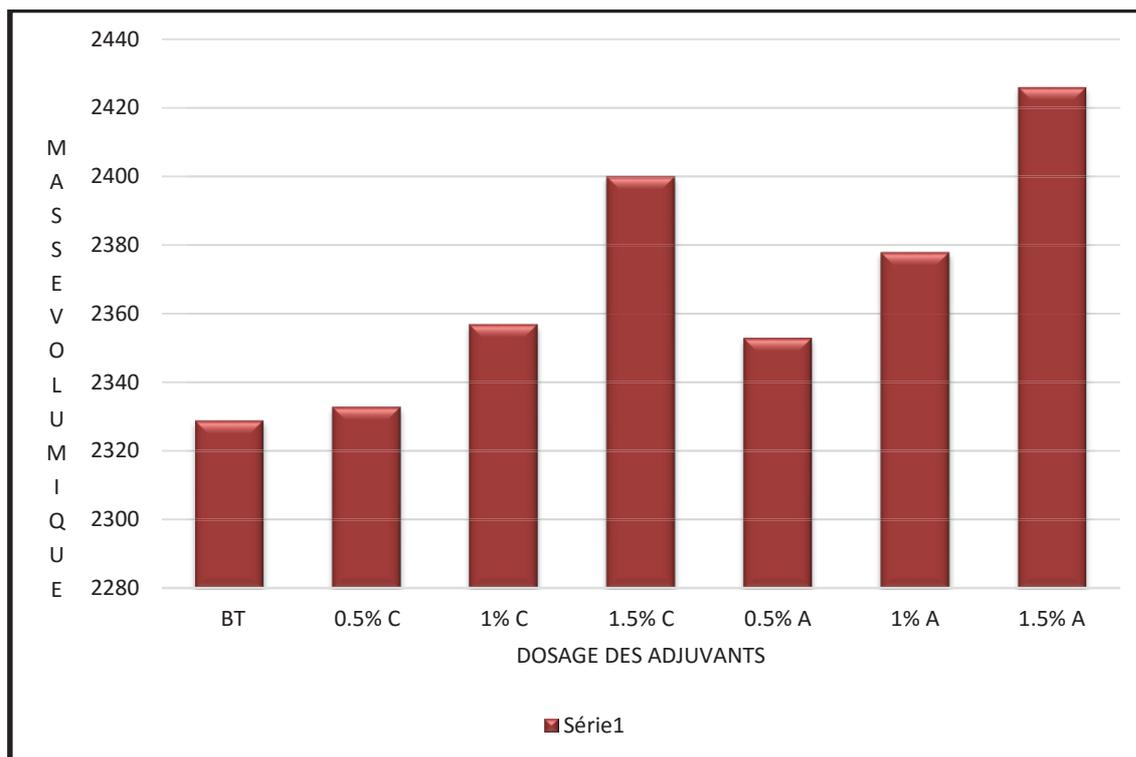
Les résultats sont présentés sur le tableau suivant :

**Tableau IV-3** : variation de la masse volumique à l'état frais de différents bétons

Type de béton		Résultats	Unités
Béton témoin		2329	Kg /m <sup>3</sup>
Béton avec superplastifiant CHRYSO	0.5%	2333	Kg /m <sup>3</sup>
	1%	2357	
	1.5%	2400	
Béton avec superplastifiant ADVA	0.5%	2353	Kg /m <sup>3</sup>
	1%	2378	
	1.5%	2426	

La figure représente l'évolution de la masse volumique en fonction de dosage des adjuvats

Les résultats obtenus sont présentés sous forme d'histogramme sur la figure suivante :



**Figure IV.8 :** l'évolution de la masse volumique en fonction de dosage des adjuvants

➤ **Observations et interprétation :**

En remarque que la masse volumique des bétons adjuvanté est plus grande que celle du béton témoin

L'augmentation du dosage des adjuvants implique une augmentation de la masse volumique .donc le rôle de l'adjuvant est de combler les vides entre les particules de ciment.

### IV.3.2. Caractérisation de béton à l'état durci :

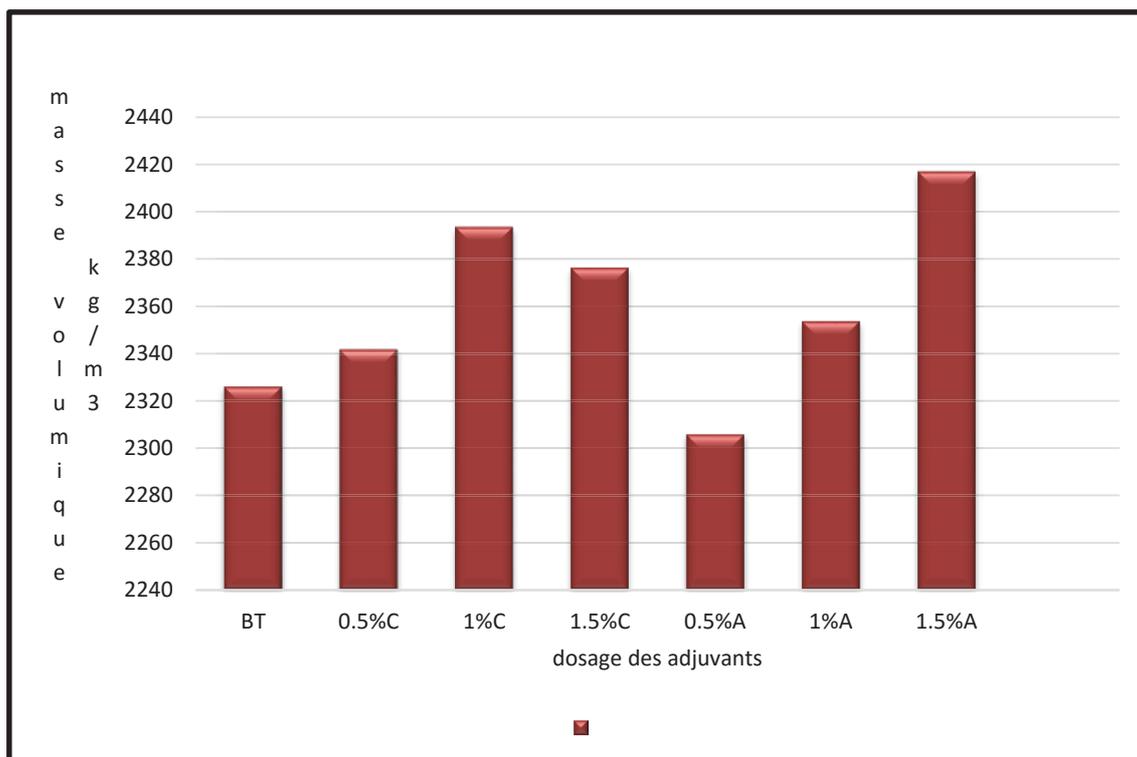
Afin de mieux comprendre l'influence des différents adjuvants superplastifiants sur le comportement mécanique à l'état durci, on a effectué les essais mécaniques suivants :

- Evolution de la masse volumique de béton durci
- Evolution de la résistance à la compression.
- Evolution de la résistance à la flexion par fendage.

**Tableau IV-4 : la masse volumique de béton durci**

Type de béton		Résultats	Unités
Béton témoin		2326.5	Kg /m <sup>3</sup>
Béton avec superplastifiant CHRYSO	0.5%	2342.1	Kg /m <sup>3</sup>
	1%	2393.7	
	1.5%	2367.5	
Béton avec superplastifiant ADVA	0.5%	2306.3	Kg /m <sup>3</sup>
	1%	2354	
	1.5%	2417	

Les résultats de ce tableau sont représentés dans l'histogramme suivant



**Figure IV.9 : variation de masse volumique de béton durci**

### IV.2.2.2. Evolution de la résistance à la compression :

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

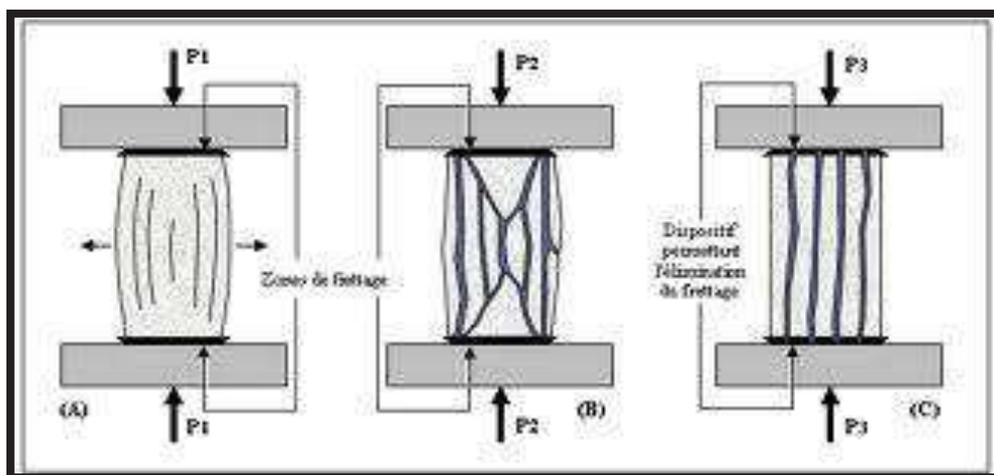


Figure IV.10 : appareil de compression

### IV.2.2.3. En traction par fendage :

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien". Si  $P$  est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera :

$$F_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL}$$

$f_t$  : résistance à la traction.

J : Age du béton (jours).

D : diamètre du cylindre.

L : longueur du cylindre.

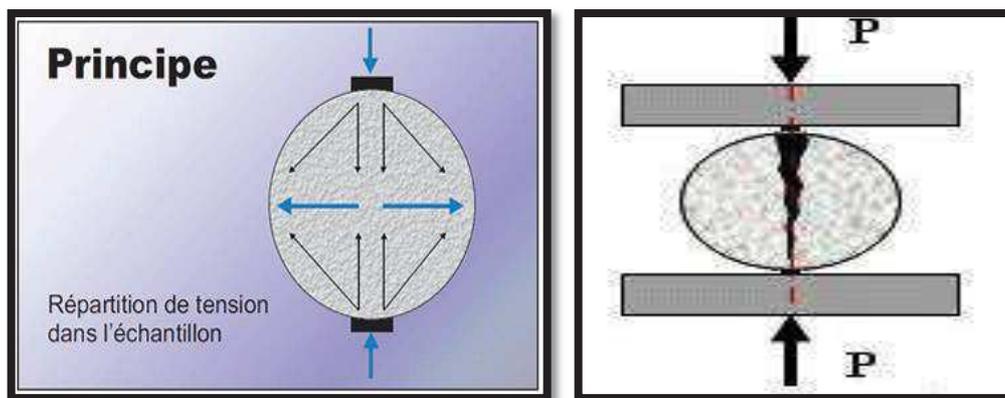


Figure IV.11 : essai de traction par fendage

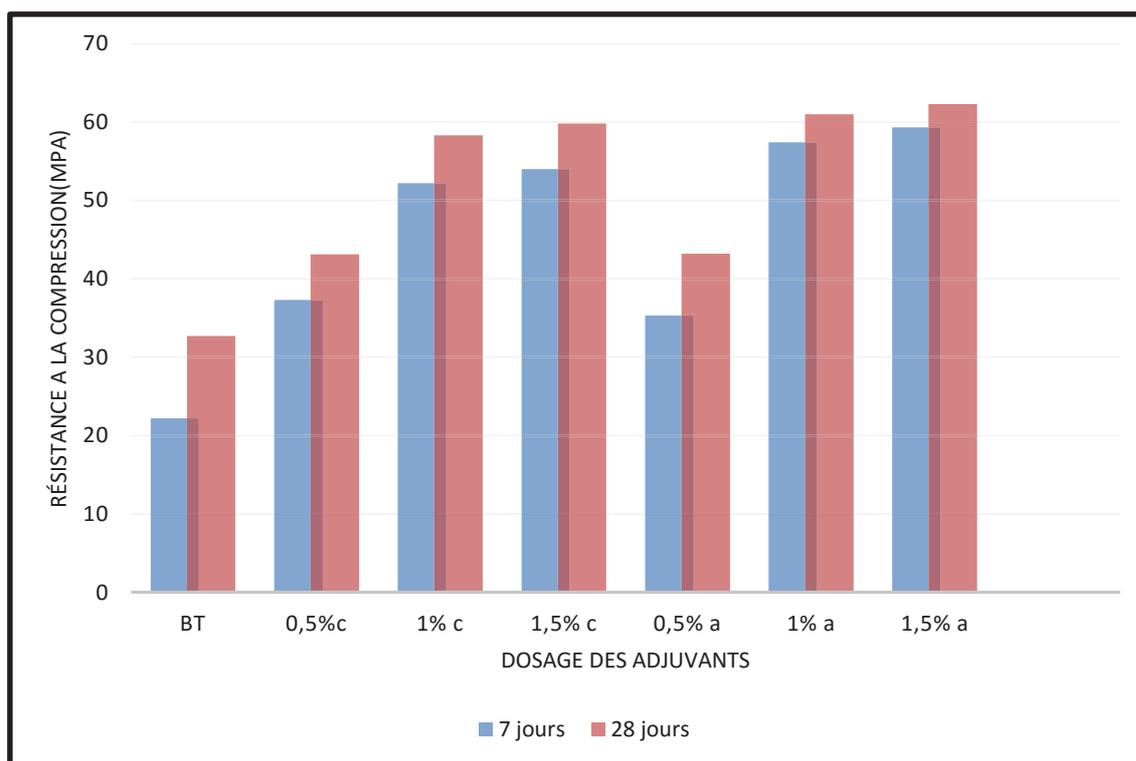


Figure IV .2 : une éprouvette soumise à l'essai de fendage

**Tableau IV.5** : résultats d'essai de compression

Type de béton		Résistance à la compression (Mpa)	
		7 Jours	28 Jours
Béton témoin BT		22.2	32.7
+ CHRYSO	0.5%	37.3	43.1
	1%	52.2	58.3
	1.5%	52.6	59.8
+ ADVA	0.5%	35.3	43.2
	1%	57.4	61
	1.5%	59.3	62.3

Les résultats de ce tableau sont représentés dans l'histogramme suivant

**Figure 13** : Evolution de la résistance mécanique a la compression en fonction d'Age.

➤ **Observation et Interpretation :**

On observe que la résistance à la compression à 28 jours augmente par rapport à celle de 7 jours dans le béton témoin et le béton adjuvanté par deux types d'adjuvant (**CHRYSO-ADVA**), et a trois différents pourcentages (0.5-1 et 1.5)

Le béton adjuvanté donne une résistance à la compression plus importante par rapport au béton témoin

L'augmentation du dosage des adjuvants influe sur la résistance à la compression (si on augmente le pourcentage des adjuvats la résistance augmente)

A 7 jours le béton adjuvanté donne une résistance à la compression élevée qui évolue légèrement après 7 jours, par contre évolution de la résistance de béton témoin augmente de manière rapide

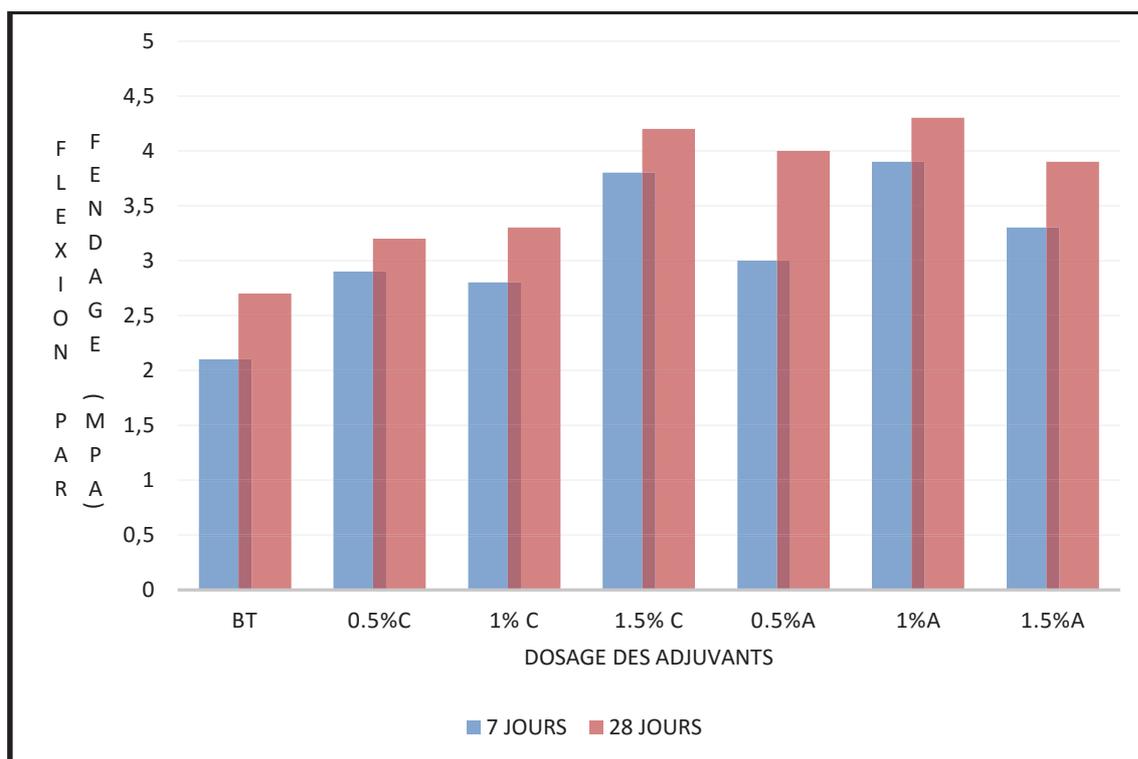
L'adjuvant **ADVA R Cast 260** donne une meilleure résistance à la compression par rapport à l'adjuvant **Chryso**

Le dosage de 1.5 donne la meilleure valeur avec les deux types d'adjuvant

**Tableau IV.6 : résultats d'essai de fendage**

Type de béton		Résistance à la compression (Mpa)	
		7 Jours	28 Jours
Béton témoin BT		2.1	2.7
+ CHRYSO	0.5%	2.9	3.2
	1%	2.8	3.3
	1.5%	3.8	4.2
+ ADVA	0.5%	3	4
	1%	3.9	4.3
	1.5%	3.3	3.9

Les résultats de ce tableau sont représentés dans l'histogramme suivant



**Figure IV.14 :** Evolution de la résistance mécanique a la compression en fonction de l'Age.

➤ **Observation et Interpretation :**

On observe que la résistance à la traction par fendage augmente à 28 jours par rapport à 7 jours

La résistance à la traction par fendage du béton adjuvanté est plus importante par rapport au béton témoin.

La meilleure valeur de la résistance à la traction par fendage à 28 jours est obtenue avec un dosage à (1.5%) d'adjuvant CHRYSO est pour le dosage a (1%) d'adjuvant ADVA

On remarque que d'après les résultats que la meilleure valeur de fendage pour l'adjuvant chryso est à (1.5%) que pour le 2<sup>ème</sup> adjuvant si on dépasse le (1%) la valeur de fendage chute



# Conclusion Générale

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de deux types d'adjuvants à différents pourcentage d'ajouts sur le comportement mécanique d'un béton ordinaire.

Les adjuvants sont devenus des composants essentiels des bétons modernes, car ils multiplient les possibilités d'utilisation des bétons. La science et la technologie des adjuvants évoluent vite de nos jours. Et les principes de base qui gouvernent leur mode d'action et d'utilisation commencent à être mieux connus.

Les adjuvants sont des composants très importants dans la composition des bétons modernes, ils permettent de modifier certaines de leurs propriétés à l'état frais ou durci. En dispersant les grains de ciment et autres fines, à dosage en eau constant, on peut rendre le béton plus fluide. Plusieurs types de molécules organiques peuvent être utilisés pour obtenir de tels résultats, selon des mécanismes qui les diffèrent légèrement les uns des autres.

Le dosage des adjuvants se fait par essai, en se basant sur les recommandations du fabricant car une adaptation est toujours nécessaire en fonction du ciment, de la présence d'ultrafine, des granulats, et du dosage optimal en adjuvant qui est fonction de l'efficacité du système de malaxage utilisé, ainsi que de la séquence d'introduction des adjuvants.

Cette étude qui est essentiellement expérimentale, reste centrée sur l'effet de l'introduction de ces adjuvants de type (CHRYSO Fluide Optima 220, ADVA<sup>®</sup> Cast 260) ayant les pourcentages de (0.5, 1 et 1.5%) sur la propriété d'écoulement des suspensions concentrées, Nous avons montré que de légères modifications des réponses rhéologiques peuvent apparaître en fonction de l'adjuvant utilisé dans la formulation.

Les superplastifiants et leurs effets sur le béton, ont montré que ces types d'adjuvants permettent d'améliorer la fluidité du béton, car les particules de ciment utilisé forment une suspension instable dans l'eau. En effet, le phénomène d'hydratation entraîne une agrégation des particules et une augmentation de la fluidité du béton.

L'incorporation des superplastifiants au béton modifie largement l'ouvrabilité de ce dernier, augmente ses propriétés mécaniques et son comportement rhéologique selon le type et la quantité du polymère utilisé.

L'utilisation des différents pourcentages d'adjuvants influe sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons.

- [1] **Andriamananstilavo.N** : «Comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation ». Thèse de doctorat à l'Université de BOUMERDES, 2003.
- [2] **NF EN 197-1** : Ciment - Composition, spécification et critères de conformité des ciment courants (indice de classement P15-101-1).
- [3] **NF EN 197-1** : Ciment - Composition, spécification et critères de conformité des ciment courants (indice de classement P15-101-1).
- [4] **NF EN 197-1** : Ciment - Composition, spécification et critères de conformité des ciment courants (indice de classement P15-101-1).
- [5] **NF P 18-502** : Additions pour béton hydraulique – Fumée de silice (indice de classement P 18-509).
- [6] **NF P 18 -508** : Additions pour béton hydraulique – Additions calcaires-Spécification et critères de qualité (indice de classement P 18-508).
- [7] **NF EN 196 -1** : Méthodes d'essais des ciments – Détermination des résistances mécaniques (indice de classement P 15 – 471).
- [8] **G. H. Tattersall**: The rheology of fresh concrete. Pitman books limited, 1983
- [9] **NF EN 196 -1** : Méthodes d'essais des ciments – Détermination des résistances mécaniques (indice de classement P 15 – 471).
- [10] **P 15-433** Retraite de prise en ( $\mu\text{m/m}$ )
- [11] **EN196-3** Début De prise en (min)
- [12] **EN196- 3** stabilité (mm)
- [13] **XP P 18-540 Granulats** –Définitions, conformité, spécifications (indice de classement P 18-540).
- [14]**NF P18-101** Limite des différentes fractions **d** et **D**, Le % de fines particules et La continuité ou la discontinuité de la granularité
- [15] **NF EN 1008** : Eau de gâchage pour béton s –Spécifications d'échantillonnage, d'essai et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton (indice de classement P18-211

[16] **Dreux.G.** : Nouveaux guide du béton, Ed.

[17] **Emoto T, Bier T. A:** Rheological behavior as influenced by plasticizers and hydration kinetics, Cement and concrete research, 2007, 647p.

[18] **Rixom M. R, Mailvaganam N. P:** Chemical admixtures for concrete, E & F. N. Spon, Ed., London, 1986.

[19] **Hornof, V, Hombek, R:** Surface-active Agents based on Propoxylated Lignosulfonate, Journal of Applied Polymer Science, 1990.

[20] **E. Karmazin :** Cinétique et mécanismes d'hydratation des sulfates de calcium semi hydratent, INSA Lyon, 1978.

[21] **Boussant.J:** Growth of ettringite in diffusion controlled conditions. Influence of additives on the crystal morphology, Proceedings of the eleventh international conference on cement microscopy, p. 185, New Orleans, Louisiana, 10-13April 1989.

[22] **Cormon.P :** Bétons légers d'aujourd'hui, Ed. Seyroles, Paris, 1973.

[23] **LAPLANTE .P et CATHERINE :** Chapitre 4, démarche et conseils pratiques quant au choix des adjuvants.

[24] **Techniques de l'ingénieur :** «généralités sur les adjuvants», 10 févr. 1993.

[25] **Sous la direction de Larrard .F:** construire en béton, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 2000.55

[26] **La norme NF EN 206-1** définit cinq classes de consistance. [26]

[27] **la norme EN 12394 :** L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance sera évaluée en utilisant des échantillons en forme de cube ou de cylindre. La vitesse de chargement, doit être choisie dans la gamme 0, 2-à 1MPa/s et être maintenue constante à 10%

[28] **la norme EN 12390-3 :** Les caractéristiques des machines d'essais