

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. M. OULHADJ - Bouira

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département de Génie Civil



# Mémoire

Présenté par

**Rafed Rebiha**

**Larik Hayat**

Pour l'obtention du diplôme de

## MASTER

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : INGENIERIE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

**Étude de l'influence des adjuvants retardateurs,  
accélérateurs, plastifiants et superplastifiants sur les  
propriétés physico-mécanique du béton**

Soutenu le ... / ... / 2016

Devant le jury composé de :

KENNOUCHE	Salim	MCB	Président
HAMI	Brahim	MAA	Examineur
MESBOUA	Noureddine	MAA	Examineur
ARIBI	Chouaib	MAA	Promoteur

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Qui son cœur m'a vu avant ses yeux et ces entrailles m'ont  
embrassé avant ses mains.*

*La source de la tendresse : Ma mère, ma mère et puis ma  
mère Que Dieu le tout puissant t'accueille, en son vaste  
paradis.*

*A la source de la puissance et du sérieux Celui qui m'a  
donné l'amour, le respect et le bon caractère Mon père que  
Dieu le tout puissant t'accueille, en son vaste paradis.*

*A mes frères : Mohammed, Ahmed, Malek, Fathi, Abd  
errahmane*

*A ma sœur : Ilham.*

*A toutes mes amies (Rebiha, Khaoukha, hind, taous,  
Ahlam, Razika, Soumia), le groupe de matériaux et  
l'équipe de laboratoire GC.*

*Et enfin je dédie à toutes les personnes qui m'aiment et que  
j'aime*

*hayet*



*Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes très chers parents*

*Qui m'ont donnée la tendresse et le courage pour que je  
réussisse*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour,*

*A mes sœurs surtout la petite Bouchra et A mon cher  
Ahmed*

*A toute ma famille et toute mes connaissances.*

*A mes amis de groupe matériaux*

*A mes sœurs de cœurs Razika et Ahlam et surtout mon  
binôme Hayet.*



*REBIHA*

## ***Remerciement***

*On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord, nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre encadreur, Mr, Aribi pour le choix de ce sujet, pour ses conseils judicieux, sa disponibilité et son orientation. Nous remercions vraiment Mr Kennouch Salim pour avoir présidé notre jury et Mr Hami Brahim., Mr Mesboua Noureddine qui ont bien voulu examiner ce travail et faire partie du jury de soutenance.*

*Nos plus vifs remerciements s'adressent, aussi, à Mr, kennouch salim Chef du Département Gc, nous remercions également Mr mesboua et tous les enseignants du département GC de nous avoir formées.*

*Nous remercions également les ingénieurs de l'unité de recherche de l'université de Boumerdes, les ingénieurs de laboratoire de l'université de Bouira et tous qui m'aident pour terminer ce modeste travail.*



# SOMMAIRE

I.1. Introduction générale .....	5
I.2. Introduction .....	7
I.3. Aspect normatif des adjuvants : .....	7
I.3.1. Définition : .....	7
I.3.2. Classification des adjuvants : .....	8
I.3.2.1. Plastifiants – Réducteurs d'eau : .....	8
II.1. Ciments portland : .....	17
II.1.2. Composition de ciment portland : .....	17
II.2. Hydratation de ciment portland : .....	19
II.2.1 Mécanismes d'hydratation des phases du clinker : .....	19
II.2.2. Produits d'hydratation .....	24
II.3. Facteurs affectant l'hydratation .....	25
II.4. Chaleur d'hydratation .....	26
II.5. Interaction des adjuvants sur l'hydratation du ciment .....	27
II.5.1. Compatibilité adjuvant-ciment .....	27
II.6. Retrait chimique .....	28
II.7. Double couche électrique .....	30
II.8. Potentiel zêta : .....	32
II.8.1. Méthode de mesure : .....	35
III.1. Travaux Ali Mardani-Aghabaglou : .....	37
III.2. Travaux de Safaa MA El-Gamal : .....	37
III.3. Travaux d'E. Tkaczewska : .....	37
III.4. Travaux de jean baptiste champenois : .....	38
III.5. Aneta Nowak Michta : .....	38
III.6. Travaux j. plank : .....	38
III.7. Travaux de Yanrong Zhang : .....	41
III.8. Travaux El bieta Janowska Renkas : .....	42
IV. Étude expérimentale : matériaux, méthode expérimentale .....	44
IV.1. Introduction .....	44
IV.2. Effet de dosage des adjuvants .....	49
IV.2.1. Étalement au mini cône .....	50
IV.3. Rhéologie d'un coulis de ciment .....	55
IV.3. Potentiel zêta .....	60
IV.4. Contraction le chatelier .....	62
IV.5. Formulation de béton .....	64
IV.6. Caractérisation du béton .....	70
IV.6. 2. Caractérisation de béton à l'état durci .....	72
IV.6. 2. 1. Contrôle non destructif par ultrason .....	73
IV.6. 2. 2. Résistance à la flexion .....	76
IV.6. 2. 3. Résistance à la compression .....	78
IV.6. 2. 4. Comparaison entre le contrôle destructif et non destructif .....	80
IV.6. 2. 5. Essai de résistance à la fatigue par flexion .....	81
V. Conclusion et recommandation .....	86
BIBLIOGRAPHIE .....	88

## Liste des figures

FIGURE 1 : LIGNOSULFONATE MODIFIES .....	8
FIGURE 2 : STRUCTURE CHIMIQUE DES POLY NAPHTALENES SULFONATES ET .....	10
FIGURE 3 : STRUCTURE CHIMIQUE DES POLYMELAMINES SULFONATES.....	10
FIGURE 4 : SUPER PLASTIFIANT DE TYPE POLY CARBOXYLATE DE CONFIGURATION PEIGNE .....	10
FIGURE 5: STRUCTURE CHIMIQUE D'UN POLY CARBOXYLATE DE PREMIERE GENERATION (R=H, CH <sub>3</sub> ) .....	11
FIGURE 6 : STRUCTURE D'UN POLY CARBOXYLATE DE DEUXIEME GENERATION DE TYPE ETHER D'ALKYLE .....	11
FIGURE 7 : STRUCTURE D'UN POLY CARBOXYLATE DE DEUXIEME GENERATION .....	11
FIGURE 8 : STRUCTURE CHIMIQUE D'UN POLY CARBOXYLATE DE TROISIEME GENERATION .....	12
FIGURE 9 : SCHEMATIQUE DE L'ADSORPTION D'UN POLYMERE A LA SURFACE D'UNE PARTICULE .....	13
FIGURE 10 : DISPERSION DES GRAINS DE SULFATE DE CALCIUM PAR LA REPULSION ELECTROSTATIQUE .....	13
FIGURE 11 : DISPERSION DES GRAINS DE SULFATE DE CALCIUM PAR L'ENCOMBREMENT STERIQUE .....	14
FIGURE 12 : MODE D'ACTION DE L'ACCELERATEUR DE PRISE ET DURCISSEMENT .....	15
FIGURE 13 : MODE D'ACTION DE L'ADJUVANT RETARDATEUR DE PRISE .....	16
FIGURE 14 : MINERAUX OBSERVABLES AU MICROSCOPE OPTIQUE D'UN GRAIN DE CLINKER.....	17
FIGURE 15: THERMO GRAMME DE L'HYDRATATION D'UN CIMENT PORTLAND .....	23
FIGURE 16: MORPHOLOGIE DU C-S-H ET DU PORTLANDITE .....	25
FIGURE 17 : CHALEUR DEGAGEE LORS D'HYDRATATION DE CIMENT PORTLAND .....	27
FIGURE 18 : COMPATIBILITE CIMENT-SUPER PLASTIFIANT-SULFATE DE CALCIUM.....	28
FIGURE 19 : CONTRACTION LE CHATELIER .....	29
FIGURE 20 : ÉVOLUTION DU RETRAIT CHIMIQUE ET DU RETRAIT ENDOGENE .....	29
FIGURE 21 : DISTRIBUTION DES IONS AU VOISINAGE D'UNE SURFACE CHARGEE POSITIVEMENT .....	31
FIGURE 22 : EFFET DE LA FORCE IONIQUE DE LA SOLUTION SUR LA TAILLE DE LA COUCHE DIFFUSE. ....	32
FIGURE 23 : PRESENTATION SCHEMATIQUE DU POTENTIEL ZETA .....	33
FIGURE 24 : INFLUENCE DE LA FORCE IONIQUE DE LA SOLUTION SUR LE POTENTIEL ZETA DE LA PARTICULE.....	33
FIGURE 25 : ÉVOLUTION SCHEMATIQUE DU POTENTIEL ZETA EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN ION .....	34
FIGURE 26: EFFET DE L'AUGMENTATION DE LA CONCENTRATION EN IONS INDIFFERENTS .....	34
FIGURE 27: EFFET DE L'AUGMENTATION DE LA CONCENTRATION EN ION SPECIFIQUEMENT ADSORBES .....	34
FIGURE 28 : PROCEDE DE SYNTHESE DE PCE MPEG . .....	39
FIGURE 29 : COPOLYMERISATION RADICALAIRE POUR LA SYNTHESE DE TYPE MPEG PCE.....	39
FIGURE 30 : COMPOSITIONS CHIMIQUES DE TYPE APEG. ....	40
FIGURE 31 : COMPOSITIONS CHIMIQUES DE TYPE VPEG. ....	40
FIGURE 32 : COMPOSITIONS CHIMIQUES DE TYPE POLYMERES TYPE PCE HPEG.....	41
FIGURE 33. STRUCTURE CHIMIQUE DES QUATRE TYPES DE SUPER PLASTIFIANTS. ....	42
FIGURE 34. ÉVOLUTION DE L'ABSORPTION CAPILLAIRE SUR EPROUVETTES A 7 JOURS D'AGES .....	49
FIGURE 35. DETERMINATION DE L'ETALEMENT .....	50
FIGURE 36. ÉVOLUTION DE L'ETALEMENT EN FONCTION DES ADJUVANTS POUR CEM I.....	52
FIGURE 37.ÉVOLUTION DE L'ETALEMENT EN FONCTION DES ADJUVANTS POUR CEM II .....	52
FIGURE 38.: ÉVOLUTION DE L'ETALEMENT EN FONCTION DES ADJUVANTS POUR CRS.....	53
FIGURE 39. L'ÉVOLUTION DE L'ETALEMENT EN FONCTION DE RAPPORT E/C.....	54
FIGURE 40. L'ÉVOLUTION DE L'ETALEMENT EN FONCTION DE RAPPORT E/C.....	55
FIGURE 42. : VISCOSIMETRE VT550 .....	55
FIGURE 43. ÉVOLUTION DE LA CONTRAINT DE CISAILLEMENT EN FONCTION DE % ADJUVANT POUR CEM I .....	56
FIGURE 43. ÉVOLUTION DE LA VISCOSITE EN FONCTION DE % D'ADJUVANT POUR CEM I.....	57
FIGURE 44. ÉVOLUTION DE LA CONTRAINT DE CISAILLEMENT EN FONCTION DE % D'ADJUVANT POUR CRS .....	57
FIGURE 45. ÉVOLUTION DE LA VISCOSITE EN FONCTION DE % D'ADJUVANT POUR CRS .....	58
FIGURE 46. ÉVOLUTION DE LA CONTRAINT DE CISAILLEMENT EN FONCTION DE % D'ADJUVANT POUR CEM II.....	58
FIGURE 48. ÉVOLUTION DE LA VISCOSITE EN FONCTION DE % D'ADJUVANT POUR CEM II.....	59
FIGURE 48. APPAREILLE DE MESURE ZETASIZER .....	60
FIGURE 50.: VARIATION DU POTENTIEL ZETA EN FONCTION DU DOSAGE DES ADJUVANTS.....	61
FIGURE 51.: VARIATION DE POTENTIEL ZETA EN FONCTION DE DOSAGE DES ADJUVANTS.....	62
FIGURE 52.: VARIATION DE POTENTIEL ZETA EN FONCTION DE DOSAGE DES ADJUVANTS. ....	62
FIGURE 53.: : MESURE DU RETRAIT CHIMIQUE PAR LA METHODE DILATOMETRIQUE. ....	63
FIGURE 55: ABAQUE PERMETTANT LA DETERMINATION DE C <sub>OPT</sub> .....	67
FIGURE 56: AFFAISSEMENT AU CONE D'ABRAMS DES BETONS EN FONCTION DE TYPES D'ADJUVANTS .....	70
FIGURE 56: ETALONNAGE DE L'APPAREIL ULTRASON(TICO). ....	73
FIGURE 57: APPAREIL D'ULTRASON (TICO).....	74
FIGURE 59: ÉVOLUTION DE LA VITESSE LONGITUDINALE EN FONCTION DES TYPES D'ADJUVANTS. ....	75
FIGURE 59: ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION .....	76
FIGURE 61: ÉVOLUTION DES RESISTANCES MECANIQUES A LA FLEXION EN FONCTION D'AGE.....	77
FIGURE 61: ESSAI DE COMPRESSION .....	78

FIGURE 62: EVOLUTION DES RESISTANCES MECANIQUES A LA COMPRESSION EN FONCTION D' AGE.....	79
FIGURE 63: LA MACHINE VIBROPHORE.....	82
FIGURE 64: ESSAI DE FATIGUE PAR FLEXION.....	83
FIGURE 65:COMPORTEMENT A LA FATIGUE PAR FLEXION.....	85

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. COMPOSITION MINERALOGIQUE DE CEM I (CLINKER).....	45
TABLEAU 2. COMPOSITION MINERALOGIQUE DE CEM II (CLINKER).....	46
TABLEAU 3. COMPOSITION MINERALOGIQUE DE CIMENT CRS (CLINKER).....	46
TABLEAU 4. EVOLUTION DE L'ETALEMENT POUR CEM I.....	50
TABLEAU 5. EVOLUTION DE L'ETALEMENT POUR CEM II /B 42.5N :.....	51
TABLEAU 6. EVOLUTION DE L'ETALEMENT POUR CRS.....	51
TABLEAU 7. POINT DE SATURATION.....	60
TABLEAU 8. VARIATION DE RETRAIT CHIMIQUE.....	63
TABLEAU 9. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES.....	64
TABLEAU 10. ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE SELON LA NORME NF EN 15 860.....	64
TABLEAU 11. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES.....	65
TABLEAU 12. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES.....	65
TABLEAU 13. ANALYSE GRANULOMETRIQUE NF EN 15 860.....	65
TABLEAU 14. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES.....	65
TABLEAU 15. ANALYSE GRANULOMETRIQUE NF EN 15 860.....	66
TABLEAU 16. COEFFICIENT GRANULAT G' EN FONCTION DE LA QUALITE ET DE LA TAILLE MAXIMALE DES GRANULATS $D_{MAX}$ .....	67
TABLEAU 17. COMPOSITION DE $1M^3$ DE BETON.....	68
TABLEAU 18. RAPPORT D'E/C ET DE L'AFFAISSEMENT.....	70
TABLEAU 19. VARIATION DE LA MASSE VOLUMIQUE A L'ETAT FRAIS DE DIFFERENTS BETONS.....	72
TABLEAU 20. VITESSE LONGITUDINAL DE PROPAGATION DE SON.....	74
TABLEAU 21. RESULTATS DE L'ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION.....	76
TABLEAU 22. RESULTATS D'ESSAIS DE COMPRESSION.....	79
TABLEAU 23. VALEUR DE LA RESISTANCE EN FONCTION DE « A » ET « B ».....	80
TABLEAU 24. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE VIBROPHORE.....	81
TABLEAU 25. PROTOCOLE D'ESSAI DE FATIGUE POUR LES DIFFERENTS BETONS.....	84



# Chapitre I

## Généralités sur les adjuvants

### **I.1. Introduction générale**

A l'heure actuelle, tous les bétons sont adjuvés, ces derniers sont des produits chimiques (polymères) qui sont ajoutés à faible quantité par rapport au ciment, et sous l'action des phénomènes physico-chimiques, permet de modifier les propriétés de béton à l'état frais et à l'état durci.

Le choix de tel adjuvant est un critère de compromis entre plusieurs paramètres : les conditions climatiques dans le cas gel/dégel par exemple, la cadence de production, les conditions de mise en forme et de transport ...etc.

Pour le même groupe d'adjuvant, de point de vue action, il y a plusieurs types, le développement sans cesse dans ce domaine arrive actuellement au stade de la synthèse des adjuvants dites de dernière génération, comme le cas des poly-carboxylates.

Le mode d'action de ces produits est purement chimique avec le ciment, mais le problème qui se pose est de prévoir les conséquences possibles sur les caractéristiques physiques et mécaniques de béton, surtout à l'état durci, dans ce cadre, nous avons réalisé ce travail qui est divisé en trois chapitres de bibliographie et une partie expérimentale.

Le premier chapitre est une présentation générale des adjuvants, en commençant par son classement selon les normes en vigueur, la structure chimique et les méthodes de synthèses, et on se termine par les différents modes d'action de ces produits.

Le deuxième chapitre traite le phénomène d'hydratation de ciment, afin de comprendre les mécanismes d'interaction adjuvant-ciment, on s'intéresse donc au double couche électrique qui permet de mesurer la mobilité des particules en répulsion et en attraction, ce qui permet d'estimer l'effet des adjuvants sur cette mobilité.

Le troisième chapitre présente brièvement des différents travaux réalisés sur les effets des adjuvants sur les propriétés de béton.

La partie expérimentale commence par l'étude de l'influence des adjuvants sur la rhéologie de ciment, on utilise les essais de mini cône les essais rhéologiques pour déterminer le point de saturation, ensuite, les essais de potentiel Zeta et de contraction de LECHATLIER.

## INTRODUCTION GENERALE

---

La formulation de béton est réalisée selon la modalité de DREUX pour un béton de 35 MPa, le rapport E/C est fixée par 0,47 cette valeur est proposé par la société SiKa, le béton formulé est caractérisé à l'état frais et à l'état durci par essai de fatigue par flexion. Les résultats obtenus sont exploités pour formuler une conclusion générale et recommandation.

## **I.2. Introduction**

Dès les origines de la fabrication du béton de ciment Portland, commencent les recherches sur l'incorporation de produits susceptibles d'améliorer certaines de ses propriétés. On cherche à agir sur les temps de prise, les caractéristiques mécaniques et de mise en œuvre et la porosité.

En (1875-1890) incorporé le gypse ou chlorure de calcium dans le ciment portland pour obtenir des prise plus régulières. Dans cette époque déposée l'addition du chlorure de calcium comme adjuvant qui permettait d'accélérer ou retarder la prise de ciment.

En 1960, des dispersants organiques appelés super plastifiants sont utilisés dans la formulation des bétons, des dispersants polymères les plus couramment utilisés sont alors des dérivés sulfonés : les lignosulfonates, naphthalènes sulfonates, poly mélamine sulfonates.

En 1986, naissance la première génération de type de poly carboxylate par la société japonaise Nippon Shokubai en collaboration avec Nisso Master Builder.

En 1989, deux nouveaux de poly carboxylates ont été développés en modifiant la nature des liaisons des chaînes secondaires à la chaîne principale.

En 2000, une dernière génération de poly carboxylate est née d'une collaboration entre la SIKA et la société japonaise TOHO.

## **I.3. Aspect normatif des adjuvants :**

### **I.3.1. Définition :**

Les adjuvants définis par la norme NFEN934-2, sont des produits organiques selon leur composition chimique, qui incorporés dans les bétons au moment de malaxage ou avant la mise en œuvre du béton à faible dose inférieur ou égale à 5% en masse du poids de ciment dans le béton, mortier ou coulis, pour provoquer des modifications physico-chimique à l'état frais ou durci.

Chaque adjuvant possède une fonction principale unique, caractérisée par la ou les modifications majeures qu'elle apporte aux propriétés des bétons, des mortiers ou des coulis, à l'état frais ou durci [1], cette fonction peut varier selon le dosage de l'adjuvant et les matériaux utilisés, et présente d'autres fonctions secondaires qui peuvent avoir une ou

plusieurs fonctions secondaires, ainsi un adjuvant réducteur d'eau peut avoir une fonction secondaire de retardateur de prise.

### I.3.2. Classification des adjuvants :

Il existe plusieurs types adjuvants, on peut distinguer les adjuvants modifier l'ouvrabilité (plastifiant-réducteur d'eau et super plastifiant-haut réducteur d'eau), les adjuvants modifier la prise et le durcissement (retardateur et accélérateur).

#### I.3.2.1. Plastifiants – Réducteurs d'eau :

Ces adjuvants ont pour fonction principale, d'augmenter l'ouvrabilité du béton, du mortier ou du coulis, sans en diminuer les résistances mécaniques par une réduction de la teneur en eau. Les plastifiants jouent sur la viscosité de la pâte de ciment en défoulent les grains, diminuent les frottements inters 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, toute en n'alternant pas les résistances [2].

Cet adjuvant fabriqué à base de lignosulfonate modifiés ce sont des poly électrolytes qui dispersent la suspension par l'effet purement électrostatique et éventuellement certains gluconates. Leur structure représentée par la figure suivant.

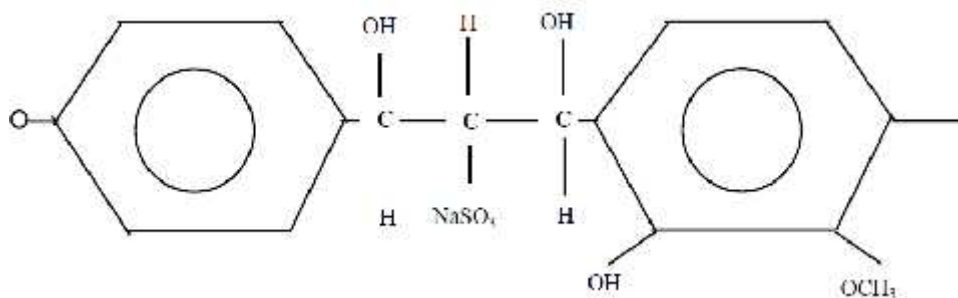


Figure 1 : lignosulfonate modifiés [1].

#### I.3.2.1.1. Mode d'action :

L'action d'un plastifiant passe nécessairement par son adsorption sur les particules de ciment, en se fixant à la surface et provoquent une défloculation des graines, elle modifie la nature des charges électriques, qu'ils ont tous la même charge et s'entoure d'un film d'eau très mince [1]. Ce processus permet, soit une amélioration de la maniabilité sans augmenter le dosage en eau, soit un réducteur du rapport eau/ciment conduisant à une augmentation des résistances mécaniques.

Les adjuvants réducteurs d'eau augmentent la surface des grains de ciment qui engendre l'hydratation initial ainsi que la quantité de l'eau disponible pour hydratation [2].

### **I.3.2.2. Les super plastifiants-haut réducteurs d'eau :**

Un adjuvant super plastifiant haut réducteur d'eau est un adjuvant qui sans modifier la consistance, permet de réduire fortement la teneur en eau jusqu'à 30% d'un béton donné, en augmente considérablement l'affaissement ou l'étalement [3]. Le résultat de leur ajout est une maniabilité et ouvrabilité du béton par défloculation des grains de ciment, leur avantage principal est la réduction de la quantité d'eau pour le malaxage et la mise en place du béton et de lui conférer un meilleur comportement mécanique [4].

On ne pourrait obtenir les mêmes effets avec les plastifiants réducteurs d'eau même en augmentant considérablement ces dosages en raison des effets secondaires : retarde de prise, excès d'air occlus.

#### **I.3.2.2.1. Classification de super plastifiant :**

Sont classé en quatre groupe, par deux catégorie selon la nature du groupement anionique La première est composée des polymères contenant des fonctions sulfonate  $-\text{SO}_3^-$  et la deuxième des polymères munis de fonctions carboxylate  $-\text{COO}^-$ .

#### **1. super plastifiant à base de sulfonâtes :**

- ) lignosulfonate modifiés(LSM): sont obtenus à partir de la liqueur résultant du procédé de la réduction du bois en pâte. La dégradation thermique et la réaction de sulfonation transforment la lignine de grande masse en polyélectrolytes anioniques polydisperses solubles dans l'eau. Ce Sont des produits tensio-actifs utilisé comme réducteur de l'eau, hydroxyles primaires et secondaires, des phényl-hydroxyles, des méthoxyles, des groupes éthers, des groupes carbonyles et carboxyliques et des groupes sulfonates [5].
- ) polynaphtlenes sulfonate(PNS) : Sont des polymères composé d'un formaldéhyde et de naphthalène sulfoné, qui comporte des parties hydrophiles de groupement sulfonate, et des parties hydrophobes d'anneaux benzénique du naphthalène, selon la composition du groupement sulfonate il ya deux type de PNS, et , la forme thermodynamiquement plus stable que la forme est essentielle pour la fluidification, car la forme n'a quasiment aucun pouvoir dispersant [6] représenté par la figure suivant.

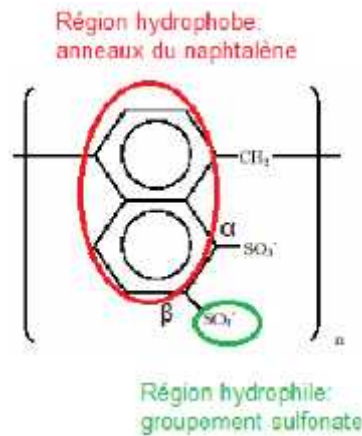


Figure 2 : Structure chimique des poly naphthalènes sulfonates et [6]

) Poly mélamine sulfonate :

Sont des polymères composés par le formaldéhyde et l'acide mélamine sulfonique représentée par la structure chimique suivant.

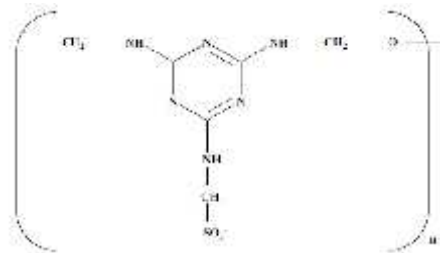


Figure 3 : Structure chimique des polymélamines sulfonates[7].

## 2. Super plastifiant à base de carboxylate :

La molécule d'un super plastifiant de type poly carboxylate est composée d'une chaîne principale, qui porte les fonctions carboxylates  $-COO^-$ , et sur laquelle sont greffées de nombreuses chaînes secondaires.

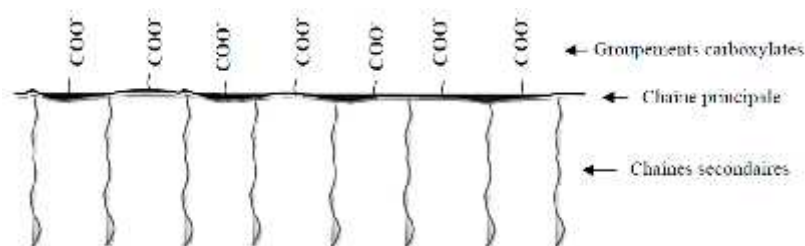


Figure 4 : Structure schématique d'un super plastifiant de type poly carboxylate de Configuration peigne [8].

Poly carboxylates de première génération sont des polymères anioniques et ramifiés obtenus par copolymérisation entre un acide carboxylique insaturé et un ester d'acide carboxylique et de méthacrylate-polyéthylène-glycol (MPEG).

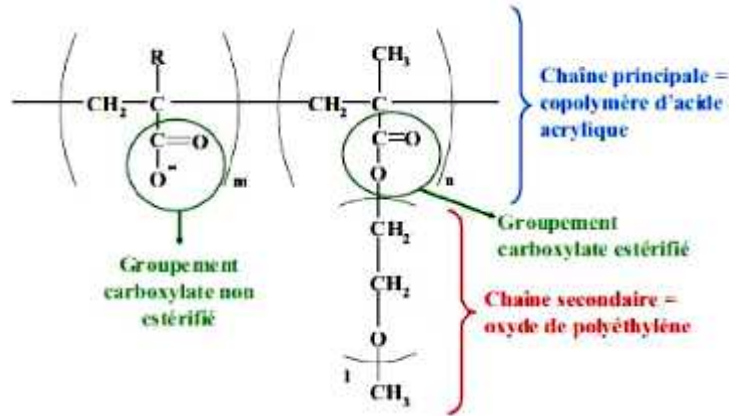


Figure 5: Structure chimique d'un poly carboxylate de première génération (R=H, CH<sub>3</sub>) [9]

Poly carboxylates de deuxième et troisième génération : mis au point un poly carboxylate au sein duquel les chaînes secondaires est greffées à la chaîne principale par des liaisons éthers, La chaîne principale se compose de monomères relativement simples comme l'acide acrylique, l'anhydrite d'acide maléique et la chaîne secondaire est formée par des éthers d'allyle ou de vinyle.

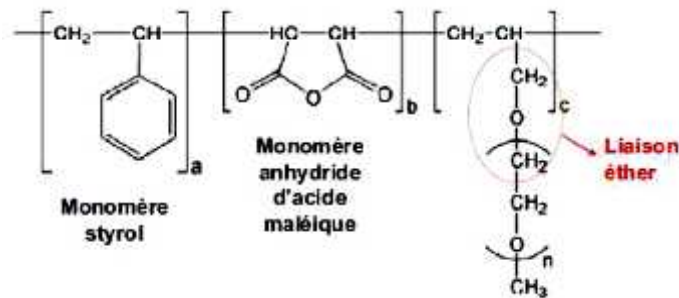


Figure 6 : Structure chimique d'un poly carboxylate de deuxième génération de type éther d'alkyle [7]

Grace a élaboré un poly carboxylate où les chaînes secondaires sont rattachées à la chaîne principale par des liaisons amide ou amine.

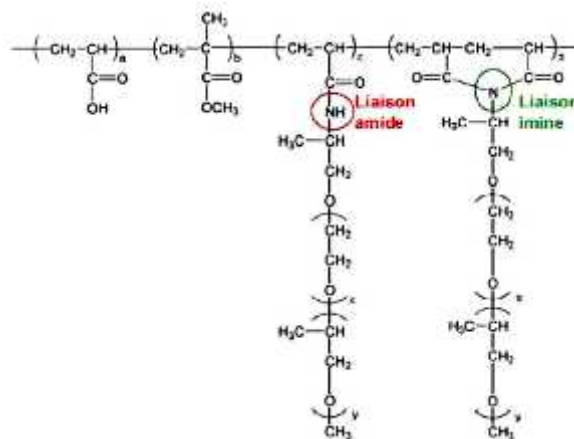


Figure 7 : Structure chimique d'un poly carboxylate de deuxième génération développé par W.R [7].



Dernière génération de poly carboxylate est un polymère portent des fonctions carboxylates sur leur chaîne principale et des fonctions amines sur leurs chaînes secondaires, ils sont capables d'être soit un polymère anionique soit un polymère cationique.

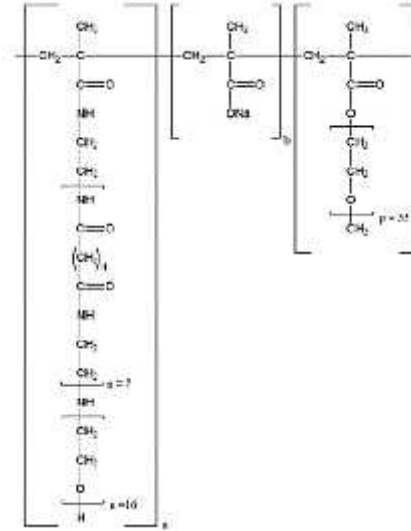


Figure 8 : Structure chimique d'un poly carboxylate de troisième génération [7].

### I.3.2.2.2. Mode d'action :

#### 1. Adsorption :

L'adsorption des super plastifiants à la surface des particules de ciment, qui contribuait à la dispersion des particules pour éviter l'agglomération de ces particules et de libérer l'eau

emprisonnée dans ces agglomérats[5], leur adsorption conduit une dispersion entre les particules qui réduisant les forces attractives d'interaction inter-particulaire de van der waals qui existent entre les atomes des différents particules[6], et ainsi l'analogie ciment-sulfate de calcium est possible du fait de la forte présence d'ion  $Ca^{+2}$  à la surface de grains de ciment en suspension, est à l'origine d'un potentiel de surface importante, plus le potentiel de surface est élevé, plus la force de répulsion est grande. Ce phénomène est illustré sur la figure suivante.

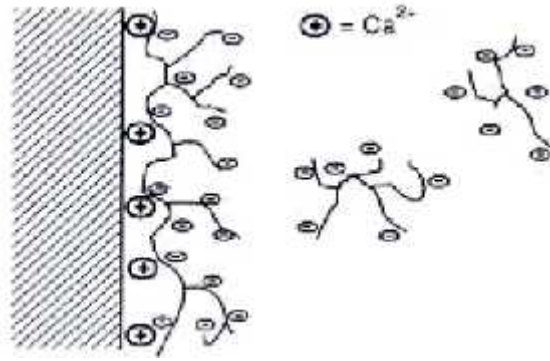


Figure 9 : Représentation schématique de l'adsorption d'un polymère à la surface d'une particule [6].

L'adsorption des superplastifiants à la surface des grains de ciment repose sur l'attraction électrostatique entre les groupements anioniques de l'adjuvant ( $-\text{SO}_3^-$ ,  $-\text{COO}^-$ ) et les domaines positivement chargés de la double couche électrochimique. Il s'agit ainsi d'un mécanisme de physisorption. Ce processus montre un plateau d'adsorption, lequel est appelé point de saturation de surface et correspond grossièrement à la quantité de super plastifiant permettant la fluidité optimale [7].

## 2. Répulsion électrostatique

L'addition d'un super plastifiant augmente le potentiel négatif des particules de ciment, causant ainsi des forces répulsives électrostatiques se forme en raison des charges identiques cette force provoque une dispersion des particules et empêche ainsi la formation d'amas.

Le potentiel représente une valeur approchée de la force électrostatique et permet ainsi d'étudier la stabilité d'une suspension de ciment. Il a ainsi été avancé que l'intensité de la force répulsive est intimement liée à la structure moléculaire de l'adjuvant [6].

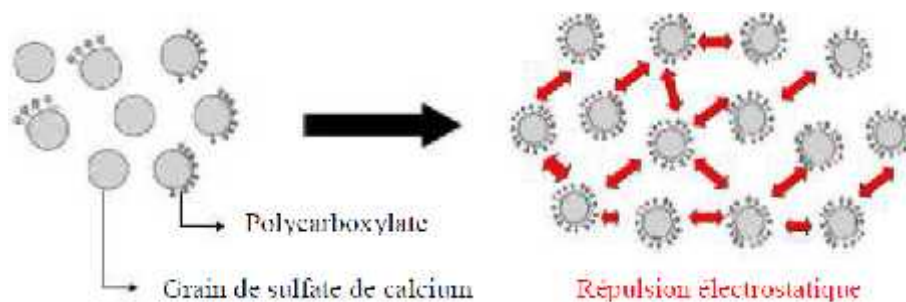


Figure 10 : Dispersion des grains de sulfate de calcium par la répulsion électrostatique [7]

## 3. Effet stérique :

Les polymères ramifiés adsorbés à la surface d'une particule induisent une force de répulsion complémentaire lorsqu'une particule rentre en contact avec une seconde particule créée par le super plastifiant de type de polycarboxylate, la dispersion des grains

de ciment observée est principalement due aux répulsions stériques. Les polymères anioniques s'adsorbent à la surface des particules et les chaînes secondaires s'étendent aux alentours, lorsque la couche de polymère se comporte mécaniquement comme un ressort amortisseur limitant le rapprochement des deux particules soumises aux forces attractives de van der Waals, à cause de l'augmentation de l'épaisseur de la couche adsorbée et de la densité des chaînes des polymères améliore la dispersion. Ainsi, les polymères de grande masse moléculaire accentuent la répulsion stérique [6].

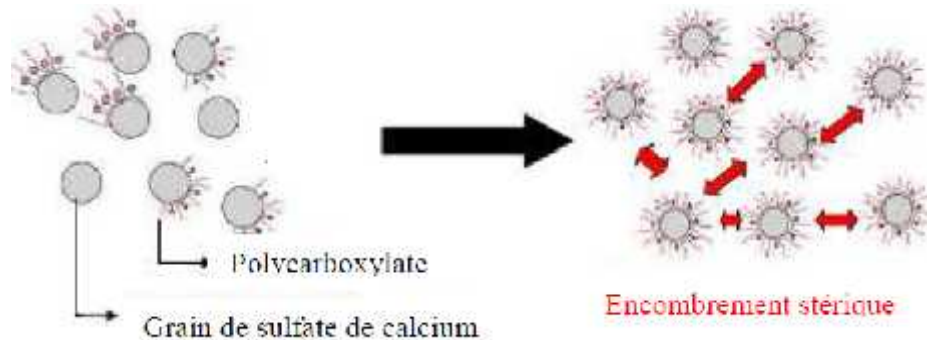


Figure 11 : Dispersion des grains de sulfate de calcium par l'encombrement stérique [7]

### I.3.2.3. Accélérateur de prise et le durcissement :

#### I.3.2.3.1. Accélérateur de prise :

C'est un adjuvant dont la fonction principale est d'accélérer le début et la fin de prise du ciment, qui diminuent le temps de début de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état rigide. Cet adjuvant composé par deux catégories, adjuvants chlorés par chlorure de calcium, chlorure de sodium, leur utilisation dépassent 1g par litre de concentration sont fortement déconseillés pour les bétons armés, et adjuvants non chloré composé par l'Aluminate de soude, de potasse, le silicate de soude, de potasse, nitrate de calcium. Le silicate de soude est un adjuvant très accélérateur ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Il est surtout utilisé dans les projections de béton. C'est un raidisseur qui épaissit les interstices aqueux en accroissant le seuil de cisaillement de la pâte de ciment, ce qui nous donne dès les premières minutes (voire secondes) une formation de gel de silice, C'est également un bon hydrofuge [1], et utilisé surtout par temps froid.

#### I.3.2.3.2. Accélérateur de durcissement

Ces adjuvants ont la fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiale du béton. Permet d'obtenir des temps de prise plus rapides et un durcissement accéléré.

Cependant, en matière d'accélération du 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. Il est en effet, tout à fait possible d'obtenir des résistances supérieures à 20 MPa en moins de dix-huit heures sans chauffer le béton, [3] cet adjuvant constitue par chlorure, carbonates. Les adjuvants chlorés sont interdits pour certains travaux à cause du risque de corrosion.

### I.3.2.3.3. Mode d'action :

Cet adjuvant modifiant sélectivement la solubilité et la vitesse d'hydratation des liants constituant anhydride. De nombreux composés chimiques ont été utilisés comme accélérateurs de prise, le plus ancien et le plus connu étant le chlorure de calcium [3], sont en générale des minéraux, le chlorure de calcium que favorise la croissance du silicate de calcium hydraté [2]. Les ions sont susceptibles d'avoir un effet sur la vitesse de prise du ciment par précipitation d'une nouvelle phase, ce sont des hydrates ou des sels basiques de magnésium, de zinc, de plomb ou des sels peu solubles de calcium, sulfates, carbonates, phosphates, fluorures et borates. 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 [3].

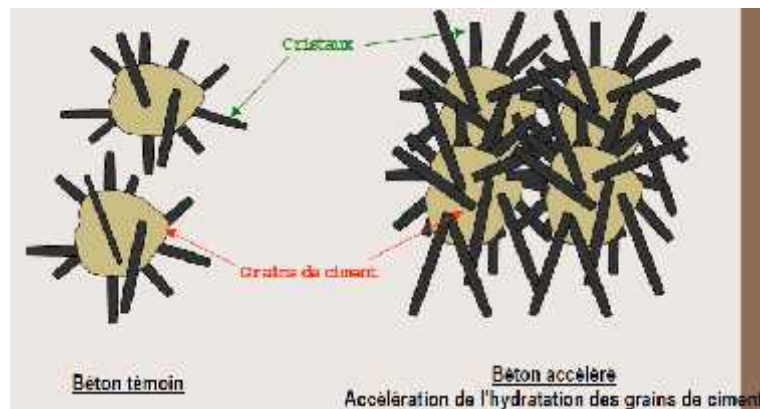


Figure 12 : Mode d'action de l'accélérateur de prise et durcissement [9]

### I.3.2.4. Retardateur de prise :

Les retardateurs de prise sont des produits, le plus souvent des substances organiques, qui retardent la progression de l'hydratation du ciment pendant un certain temps. Ils ont

pour fonction principale d'augmenter le temps de début de transition du mélange, pour passer de l'état plastique à l'état rigide.

Le développement de la résistance au jeune âge est aussi prolongé avec une augmentation de la résistance à la compression à long terme. En général, les retardateurs les plus efficaces ont plusieurs atomes d'oxygène qui sont capables de produire un effet polaire. Il ne faut pas aussi oublier que l'eau est un retardateur de prise [2].

#### I.3.2.4.1. Mode d'action :

Les retardateurs peuvent agir en diminuant la vitesse d'hydratation de certains constituants anhydrides des ciments. En se précipitant autour des grains de ciment ou en formant avec la chaux des précipités enrobant certaines parties des grains anhydrides ( $\text{CaSO}_4$ ). Il y a donc une formation d'une enveloppe plus ou moins imperméable et d'épaisseur variable [3].

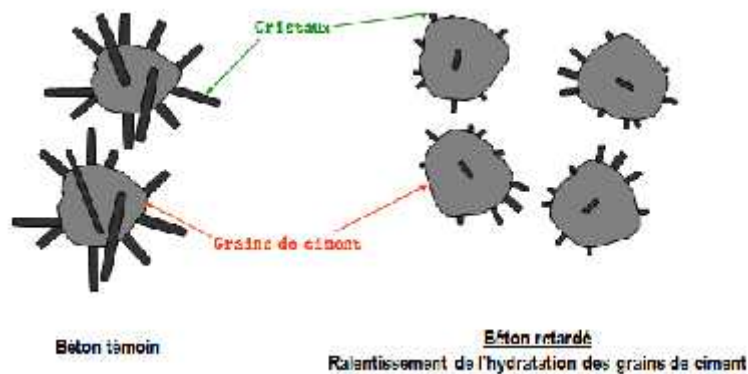


Figure 13 : Mode d'action de l'adjuvant retardateur de prise [10]

## II.1. Ciments portland :

Le ciment portland est un liant hydraulique le plus utilisé dans le domaine de fabrication de béton, qui gâchée avec l'eau forme une pâte qui fait prise et durci par suite des réactions et processus d'hydratation, le ciment portland c'est le résultat de cuisson de la farine cru dans un four rotatif qui donner le clinker à haut température  $1450^{\circ}\text{C}$  mélangé avec une quantité nécessaire de gypse , la série des réactions chimique très complexe au cours d'hydratation de ciment qui formé des hydrate à partir des phase de clinker.

### II.1.1. Nomenclature chimique de ciment portland :

Le ciment composé de quatre phases formant le clinker représenté par des symboles abrégés, cette notation abrégée utilisé par les chimistes de l'industrie du ciment, d'écrit les formules des oxydes courants en une simple lettre.

Les abréviations les plus communément utilisées dans la nomenclature du ciment sont représenté comme suivant :

C = CaO	F F = Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S = SO <sub>3</sub>	P =P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
S = SiO <sub>2</sub>	M= MgO	N N= Na <sub>2</sub> O	C =CO <sub>2</sub>
A = Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K = K <sub>2</sub> O	T =TiO <sub>2</sub>	H= H <sub>2</sub> O

### II.1.2. Composition de ciment portland :

Le ciment est un produit minéral constitué de quatre phases principales (Silicate tricalcique (C3S) : 3CaO. SiO<sub>2</sub> (Alite), Silicate bicalcique (C2S) : 2CaO. SiO<sub>2</sub> (Belite), Aluminate tricalcique (C3A) : 3CaO. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et feroaluminate calcique (C4AF) 4CaO. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Célite)). Aussi quelques composés mineurs de la chaux libre CaO, de la magnésie MgO et des alcalis Na<sub>2</sub>O et K<sub>2</sub>O.

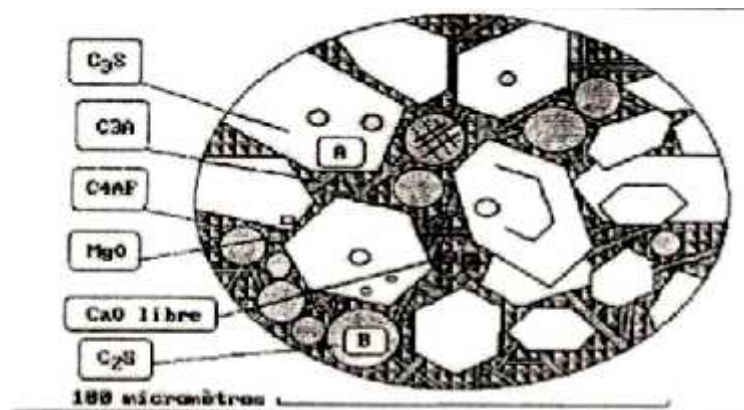


Figure 14 : dessin représentant les minéraux observables au microscope optique d'un grain de clinker.

[3]

### II.1.3. Phases du clinker :

Compose par deux phases à base de silicate de calcium, C2S et C3S. Et de deux phases à base d'aluminate de calcium, C3A et C4AF.

#### II.1.3.1. Alite (C<sub>3</sub>S) :

C'est un constituant nécessaire de ciment, plus souvent impur dans le clinker, le C3S contient soit en substitution des ions Ca ou Si, soit en insertion dans le réseau cristallin des traces de Mg, Al et Fe, Ces impuretés améliorent généralement la réactivité du ciment[3], la tenue de cette impureté lié par la nature des matière première et la température de cuisson et le mode de refroidissement de clinker, l'alite est souvent envisagée comme un modèle raisonnable pour l'étude de l'hydratation initiale du ciment Portland, en particulier la prise et le développement de la résistance à la compression au jeune âge[11].

#### II.1.3.2. Bélite ( -C<sub>2</sub>S) :

Le C2S impurété, on retrouve en plus de potassium, et les mêmes des ions étrangers que dans le C3S. C2S fournit au ciment sa résistance à long terme. Il existe sous quatre variétés polymorphiques de C2S ( , , , ) et leur domaine de stabilité est différent selon le chauffage et le refroidissement. La forme est celle que l'on rencontre le plus souvent dans les clinkers industriels. Lors d'un refroidissement lent, la forme peut se transformer en qui n'a aucune propriété hydraulique. Contrairement au C3S, les propriétés hydrauliques du C2S varient considérablement selon la variété polymorphique.

#### I.4.3.3. Phase aluminate(C<sub>3</sub>A) :

Appeler phase célite, qui représente de 15% de la composition de ciment portland, est constituée de cristaux de maille cubique, les cristaux contiennent fréquemment des ions étrangers, comme Na<sup>+</sup>, la maille des cristaux prend alors une forme orthorhombique ou monoclinique, Généralement dans le ciment, le C3A est toutefois un mélange des formes cubique et orthorhombique, Le C3A orthorhombique stabilisé par la présence de sodium est moins réactif que le C3A cubique.

#### II.1.3.4. Phase ferrialuminate (C<sub>4</sub>AF) :

Le C4AF représente 5 à 15 % de la composition du ciment Portland, est une solution solide, de composition variable dont les principaux composés sont C4AF, C6A2F. La

phase ferrite présente une réactivité équivalente à celle de la phase aluminat. Sa réactivité est d'autant plus faible que la teneur en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est grande.

## II.2. Hydratation de ciment portland :

L'hydratation du ciment c'est un ensemble des réactions chimique complexe qui se produisent lorsque Le ciment en contact avec l'eau pour former des hydrates, Elle provoque le durcissement de la pâte de ciment, suspension fluide ou plastique, laquelle va se transformer en un matériau solide et résistant[7], l'évolution des caractéristiques physiques et mécaniques, très rapide dans les heures qui suivent la prise, continue pendant plusieurs mois, mais de plus en plus lentement[11].pour comprendre le phénomène physico-chimique qui se produisent au cour d'hydratation du ciment, étudier les réaction d'hydratation de chacune des phases de clinker.

### II.2.1 Mécanismes d'hydratation des phases du clinker :

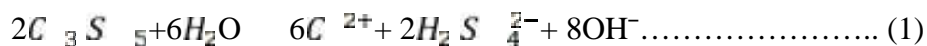
Le clinker compose par quatre phases (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF), Chacune phase des produits d'hydratation au cours de différentes réactions chimiques. Les mécanismes d'hydratation des quatre phases sont successivement d'écrits.

#### II.2.1.1. Hydratation des silicates tri- et bi calcique :

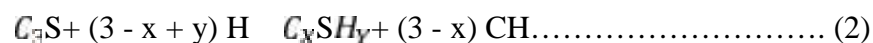
L'hydratation du C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S sont similaire, ces deux constituants produisent des gels de silicate de calcium hydraté amorphe (C-S-H) et la portlandite (CH), la cinétique d'hydratation du C<sub>3</sub>S est plus rapide par rapport C<sub>2</sub>S. À la cour d'hydratation du C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S passe par cinq périodes successives sous température ambiant.

##### ✓ Période de pré-induction :

Au contact de l'eau, les Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> et les Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> se dissolvent sous forme des ions calcium Ca<sup>2+</sup>, hydroxyle OH<sup>-</sup> et silicate H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>). La formation de (C-S-H) plus rapide et contrôlée chimiquement, avec un pH élevé et des concentrations ioniques dans la solution interstitielle selon la réaction (1).



Pendant l'hydratation de C<sub>3</sub>S donner une phase de (C-S-H) et des compositions variables, dont le rapport molaire CaO/SiO<sub>2</sub> est inférieur à 3,0 et stœchiométriques, Parallèlement le produit de (CH) est libéré dans la phase aqueuse sous forme ionique selon la réaction (2).





Les C-S-H sont les constituants majoritaires de ciment portland faiblement cristallisés, ils sont responsables de la cohésion de la matrice cimentaire, ainsi que leur structure est variable en fonction du degré d'avancement de la réaction d'hydratation, une compétition s'établit entre la germination des C-S-H et CH qui consiste à former des assemblages aléatoirement, s'effectue par accumulation d'atomes ou de molécules en couches successives au niveau de l'interface liquide et solide. La cinétique d'hydratation de C<sub>3</sub>S possède une forte libération de chaleur en fonction de temps d'hydratation, et la quantité de C<sub>3</sub>S réagit étudiée par la méthode analytique de diffraction de rayon X quantitative, la durée de cette période est typique de 15 à 20 minutes.

✓ Période d'induction :

Cette période appelée aussi dormante, lorsque Les réactions précédentes de dissolution et de précipitation se poursuivent pendant quelques heures mais avec des vitesses et des quantités de produit fortement diminuées et contrôlées par le seul processus de nucléation [7]. Le PH est élevé en présence de Ca<sup>2+</sup>, la vitesse de dissolution décroît par sursaturation de la solution, la quantité de C-S-H forme est très faible de même que la consommation en eau donc la pâte fait maniable, avec faible dégagement de chaleur, lorsque la précipitation du portlandite atteint une valeur limite déclenche une nouvelle formation des C-S-H, caractérisée par une diminution des ions Ca<sup>2+</sup> et OH<sup>-</sup>, la durée de cette période typiquement de quelques heures.

✓ Période d'accélération :

Pendant cette période, la concentration de CH dans la phase liquide atteint maximum, puis commence à décroître, est déclenchée la précipitation de cristaux de CH, qui entraîne la dissolution de tous les constituants du ciment anhydre, avec un flux thermique augment. La formation des hydrates très forts en consommant de l'eau. La transformation des silicates de calcium en C-S-H a lieu par polymérisation progressive des anions silicate isolés dans le C<sub>3</sub>S [7].

✓ Période de décélération :

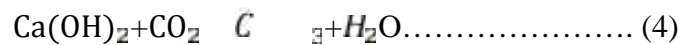
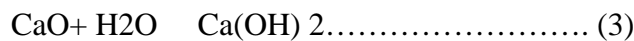
Dans cette période le flux thermique est diminué lentement, et la vitesse de la réaction varie en fonction de la quantité restant de C<sub>3</sub>S, donc l'hydratation ralentir et contrôlée par la diffusion, lorsque l'observation le recouvrement des grains par une couche de C-S-H obtenu une épaisseur suffisante pour ralentir la diffusion des espèces ioniques et des molécules d'eau. La formation de C-S-H sous la forme des paquets de courtes fibres de 300 nm, qui se souder entre elles par des ponts ions calcium ou des ponts hydrogène

très solides et avec les cristaux de portlandite remplissent les espaces inter granulaires et développé la résistance mécanique au jeune âge, donc le matériau devient solide.

✓ Période de renforcement :

Après 7 jours d'hydratation, les C-S-H deviennent de longues fibres de 1,5 µm, lesquelles vont s'entremêler [7]. Dans cette période l'hydratation de C<sub>3</sub>S continue lentement pendant des plusieurs mois et années plusieurs. Cette dernière est le responsable de développement la résistance mécanique à long terme de la pâte de ciment durci. Diamond, à défini quatre types de C-S-H en fonction de leur morphologie. Le C-S-H (1), fibreux, et le C-S-H (2), en nids d'abeille, se forment au début de l'hydratation dans l'espace inter granulaire. Le C-S-H (3) est en forme de grains et le C-S-H (4) est un matériau compact qui occupe l'espace des grains anhydres d'origine [7].

D'hydratation de la chaux libre formée le portlandit (CH) largement cristaux hexagonaux selon l'équation (1), est présenté à faible quantité dans la pâte de ciment durci à cause de la solubilité dans l'eau pur et l'acide et peut se carbonater selon l'équation (3) et (4).

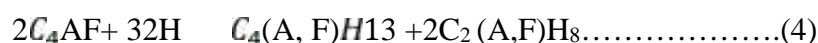


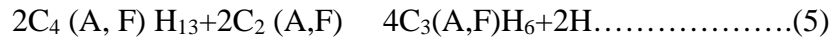
### II.2.1.2. Hydratation de l'aluminate tricalcique

C'est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau, qui influencée par la présence du gypse (CaSO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O), qui permet de réguler l'hydratation du C<sub>3</sub>A pour éviter le phénomène de prise rapide du ciment, les réactions d'hydratation sont différents en fonction de la présence ou l'absence de sulfate de calcium.

En absence le sulfate de calcium, lorsque en contact avec l'eau la réaction devient très rapide qui formée les aluminates hydratés hexagonaux instable selon la réaction(4), avec fort dégagement de chaleur, cette dernier c'est une barrière de protection et ralentit l'hydratation de C<sub>3</sub>A, se forment au cour de temps en cristaux cubique plus stable selon là l'équation(5),qui protéger et augmenter la vitesse d'hydratation de C<sub>3</sub>A

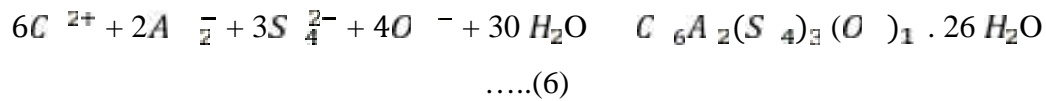
En présence de sulfate de calcium, l'hydratation de C<sub>3</sub>A est lente à cinétique variable similaire à C<sub>3</sub>S, passe par quatre phases différentes.





- ✓ Phase initial :

Lorsque au contact de  $C_3A$  et le gypse avec l'eau sont dissolvantes rapidement, conduit la solution sursaturée en les hydrates, cette réaction fortement exothermique parallèlement formé l'ettringite à température ambiante, qui forme une barrière protectrice contre l'hydratation rapide donnée par la réaction. Ce dernier est stable sous des conditions de température à 25°C, et les valeurs de PH entre 10.4 et 12.5 contenues dans les pores, car les ions OH<sup>-</sup> plus importants dans la construction d'ettringite.

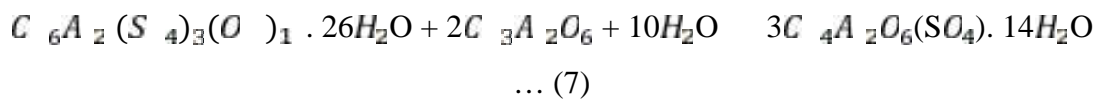


- ✓ Phase de réaction lente :

Le  $C_3A$  présent dans la phase dormante, l'ettringite contenue forme à faible vitesse, l'ettringite formée à la surface de la phase aluminatée constitue une couche d'hydrates qui gêne le transport de l'eau et des ions sulfate bien plus fortement que la couche de C-A-H hexagonal et métastable qui se forme en l'absence de sulfate [7].

- ✓ Épuisement du gypse :

Après quelques heures, le gypse totalement consommé pour la formation d'ettringite, qui va alors se dissoudre et devient une nouvelle source des ions de sulfate qui réagit avec l'aluminat anhydre pour former monosulfoaluminat de calcium hydraté selon la réaction (7).



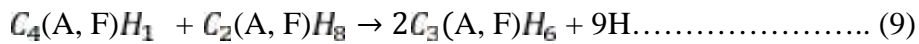
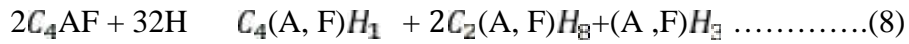
- ✓ Réaction à long terme :

Après quelques semaines, le produit final d'hydratation du  $C_3A$  est une solution solide de MSA- $C_4AH_{13}$ , dépendant des proportions initiales d'aluminat, et la transformation complète de l'ettringite en monosulfoaluminat.

### 1.2.1.3. Hydratation du ferrialuminat tétra calcique

L'hydratation de  $C_4AF$  est similaire à celle du  $C_3A$  et n'est pas totalement élucidée, et les produits d'hydratation sont différents en absence ou présence de sulfate, la réaction plus lentement, dans le cas de  $C_4AF$  pur réagit rapidement avec l'eau, et présente la façon inerte dans le ciment.

En le sulfate la réaction de C<sub>4</sub>AF avec l'eau est donner hydrates de ferroaluminat de calcium métastables : C<sub>4</sub>(A, absence F)H<sub>13</sub> et C<sub>2</sub>(A, F)H<sub>8</sub> selon la réaction, qui se transforment en un composé hydraté stable thermodynamiquement C<sub>3</sub>(A, F)H<sub>6</sub> selon l'équation (7) et (8).



En présence le sulfate, l'hydratation de C<sub>4</sub>AF est ralentie et former les sulfoaluminates et sulfoferrates de calcium hydratés, le mélange de C<sub>4</sub>AF avec le sulfate se produit l'ettringite de fer C<sub>3</sub>(A,F).<sub>3</sub>CS.H<sub>32</sub> sous forme cristaux prismatique selon la réaction, lorsque la concentration de sulfate diminue, la formation de monosulfoferroaluminat de calcium C<sub>3</sub>(A,F).CS.H<sub>12</sub> produit par l'hydratation de l'ettringite avec C<sub>4</sub>AF selon l'équation.

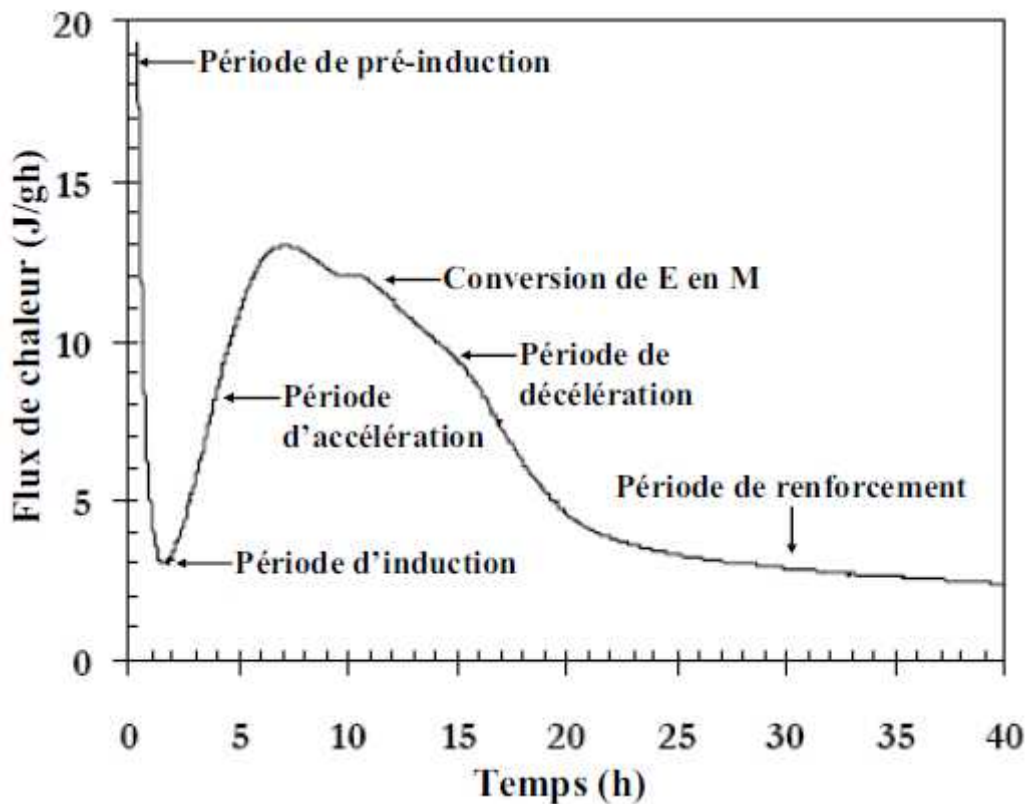
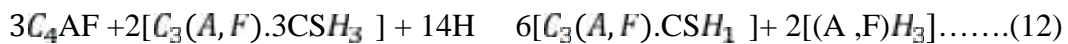
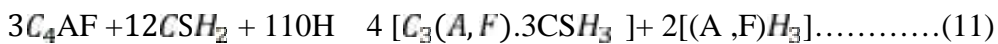


Figure 15: Thermo gramme de l'hydratation d'un ciment Portland montrant les cinq périodes du processus (E = ettringite, M = monosulfate) [7].

## II.2.2. Produits d'hydratation

### II.2.2.1. Silicate de calcium hydraté(C-S-H)

Le gel C-S-H le plus formé dans la pâte de ciment hydraté, mise à part de l'hydratation de C2S et C3S, qui possède une propriété liante, sont composés nanocristallins se forme lamellaire qui constituées de deux ou trois feuillets avec une épaisseur d'environ 5µm. Sont distingués trois phases de C-S-H selon le rapport Ca/Si:

C-S-H-	$0.66 < \text{Ca/Si}$
C-S-H-	$1 < \text{Ca/Si} < 1.5$
C-S-H-	$1.5 < \text{Ca/Si} < 2$

Et quatre types liés par la morphologie d'après Diamond, Le premier type qui présente en feuillets très minces s'enroulent sur eux-mêmes en formant des tubes creux, et rayonnent autour du grain de ciment, il est visible aux premiers âges de l'hydratation sous forme fibreuse, le deuxième type qui présente sous forme alvéolaire, le troisième type qui présente sous forme de petits disques ou des sphères (0.2µm) assemblés pour former des structures plus massives, et les quatrième types apparaissent comme une combinaison épaisses et amorphe.

La morphologie de C-S-H sont remarquable à jeune âge pour le I et II type et plus mûre qui apparaissent dans le béton pour le III et IV [12].

### II.2.2.2. Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$

La portlandite est le produit minéralogique de l'hydroxyde de calcium cristallisé sous forme hexagonaux développés dans la porosité capillaire dans la pâte de ciment, qui constitue par plans d'ions de calcium en environnement octaédrique assuré par trois ions  $\text{OH}^-$  et d'autres plans ce qui constitue un feuillet d'hydroxyde qui est répété selon l'axe. La portlandite représente une faible surface spécifique en raison de la grande taille des cristaux, et le composant le plus soluble dans l'eau avec un PH d'équilibre de 13 et une température à 25°C qui maintient le PH de la solution interstitielle élevée [12].

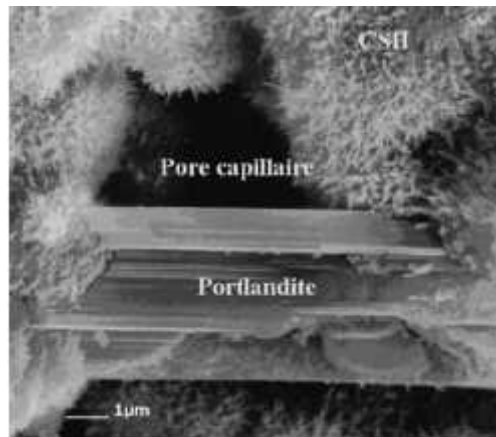


Figure 16: morphologie du C-S-H et du portlandite [12].

### I.2.2.3. Aluminat de calcium hydraté

La réaction de  $C_3A$  et  $C_4AF$  et le gypse est dérivé l'ettringite cristallisé sous forme d'aiguilles à base d'hexagonale, à des longueurs de microns, se retrouvant parsemées dans les fibres de C-S-H avec le monosulfoaluminate cristallisé [13]. Le nombre de molécule  $H_2O$  de la formulation de l'ettringite est mal connu, il peut être 30, 31 ou  $32H_2O$  suivant la température et la pression partielle de la vapeur d'eau du milieu [12].

## II.3. Facteurs affectant l'hydratation

### II.3.1. Rapport E/C

L'eau de gâchage jouer un rôle essentiel pour l'hydratation de ciment qui dissolvant, pour un faible rapport E/C la concentration ionique de la solution interstitielle sont plus grands, et des précipitations plus rapide des hydrates, et plus le dégagement de chaleur est violent en raison de la réaction chimique ont un avancement plus élevé et bien connu que l'eau a une capacité thermique plus faible par rapport les constitue de ciment dans la période initiale [14]. Le processeur de dissolution-précipitation des réactions d'hydratation est limite du fait, qu'on atteinte la dé-saturation plus rapidement. Lorsque l'hydratation est contrôlée par diffusion, la densité plus ou moins grands de C-S-H est peut-être à l'origine d'un ralentissement des réactions [5].

### II.3.2. Température

La variation de la température est plus importante pour la cinétique d'hydratation, lorsque l'augmentation de la température conduit à une accélération des réactions d'hydratation et augmentation de l'énergie thermique dégagée [15], et aussi précipitation compact et violent d'hydrates, et la diminution de la température pouvant être arrêté l'hydratation à  $-10\text{ C}$  donc il est nécessaire l'utilisation des adjuvants

accélérateur de prise [14]. La température peut influencer sur la morphologie et la nature des hydrates, plus la température augmente l'étringite devient fragile et la chaîne de C-S-H sont plus longues, et pour la portlandite est plus dense à haute température et dans le cas de température faible la morphologie est devenue lamelles allongées [13].

### **II.3.3. Composition et finesse de ciment**

La composition minéralogique et la finesse ont une influence importante sur la cinétique d'hydratation, pour un rapport E/C connu, les différents composants ne réagissent pas à la même vitesse [5]. En plus l'ajout de certaines additions minérales (fillers calcaires, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux et fumée de silice) peut affecter le processus de l'hydratation [13]. Il y a une relation entre la distribution de la taille des particules et le degré de l'hydratation, plus la distribution de tailles des grains est fine, plus la chaleur d'hydratation dégagée est importante [14].

### **II.4. Chaleur d'hydratation**

La chaleur libérée lors de la réaction chimique d'hydratation des composants du ciment complète, dépend de sa composition minéralogique, plus la teneur en aluminat tricalcique (C3A) et silicate tricalcique (C3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte, et autre facteur qui influence sur la dynamique d'hydratation, la finesse de mouture plus le ciment broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée, et l'ajout d'addition comme le gypse, et la température extérieure, les réactions exothermiques peuvent engendrer des dégradations lors du refroidissement du béton telles que fissures de retrait thermique lors de refroidissement trop rapide [16]. La calorimétrie permet de mesurer ce dégagement de chaleur en fonction du temps et les valeurs de chaleur d'hydratation des différentes phases pures mesurées soit directement sur les phases pures, soit dans le clinker, soit dans le ciment. [17]

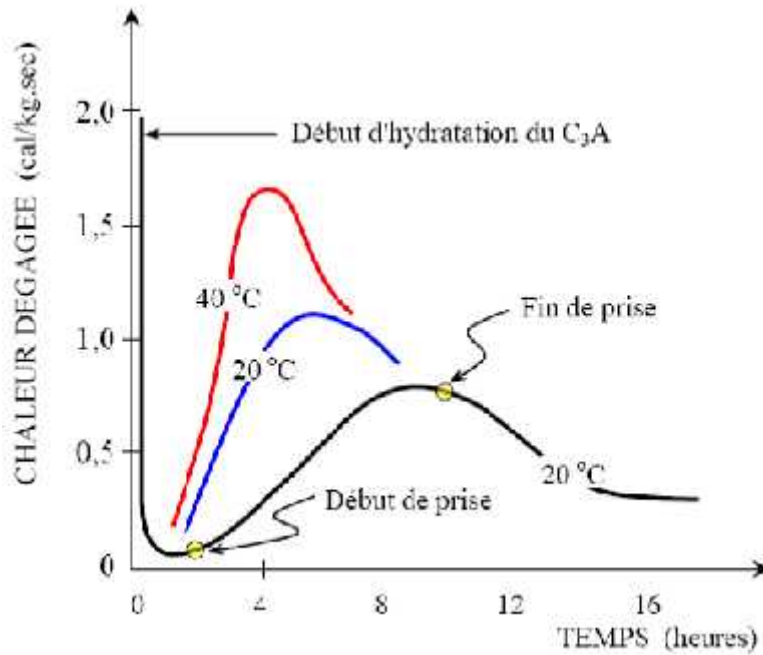


Figure 17 : chaleur dégagée lors d'hydratation de ciment portland [16].

## II.5. Interaction des adjuvants sur l'hydratation du ciment

Plusieurs chercheurs ont étudié l'impact du différent type de super plastifiants sur l'hydratation de ciment, Yanrong Zhang [18] ont montré que la présence de NSF et PCE ralentit l'hydratation initial de ciment, aussi d'autres chercheurs ont trouvé que la présence de PCP et PNS diminue la vitesse de dissolution de C<sub>3</sub>A, ce dernier ralentit la formation de l'ettringite et le PCP provoque une diminution de la taille des cristaux d'ettringite formé [19], Didouche Zahia, ont affirmé que le PNS et PC retardent l'hydratation et accompagnent l'augmentation du flux de chaleur et prolongent la période dormante [20].

### II.5.1. Compatibilité adjuvant-ciment

La compatibilité ciment-adjuvant peut être étudiée par la méthode de coulis, l'ajout des adjuvants influence les propriétés des bétons, l'hydratation, la prise ou le durcissement, et on parle d'incompatibilité tous les phénomènes indésirables tels que la perte de maniabilité et le retard de la prise ou le raidissement prématuré de la pâte, les aspects physique et chimique caractérisés par les interactions adjuvant-ciment relient par l'optimisation du dosage et le type d'adjuvant pour le ciment, le choix d'un rapport E/C et la teneur en C<sub>3</sub>A pour produire le béton.



Laouar Samira, travaillé sur la compatibilité de deux variétés de ciment avec trois variétés de super plastifiants de type de poly carboxylate, qui trouvé un certain pourcentage optimum de super plastifiant appelé point de saturation remarqué par la stabilité de la fluidité, qui influencé sur la composition minéralogique du ciment ainsi le pouvoir fluidifiant gouverné par la structure moléculaire du super plastifiant [21]. le phénomène de la compatibilité lié à une interaction entre le super plastifiant et sulfate de calcium présent dans le ciment, en plus de leur action de dispersion, les super plastifiant agissant avec le C3A pour bloquer la formation de l'ettringet et même retarder ou bloquer plus ou moins la mise en solutio(n de la plupart des différentes forme de sulfate de calcium que l'on retrouve dans le ciment [22].

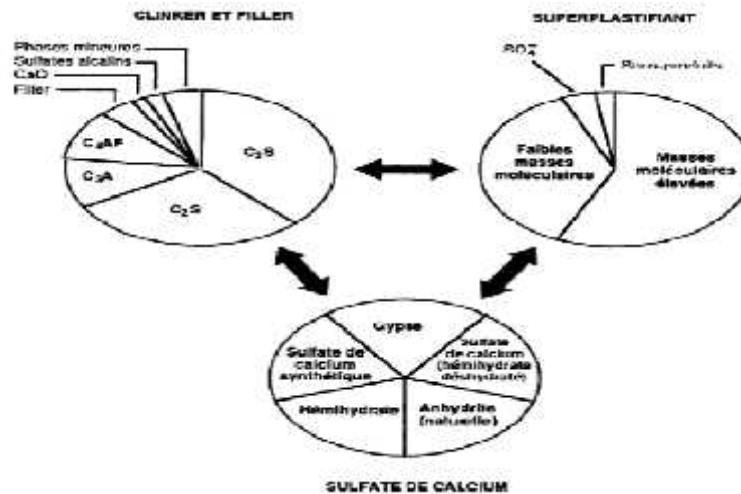


Figure 18 : compatibilité ciment-super plastifiant-sulfate de calcium.

## II.6. Retrait chimique

Les variations volumiques liées à la réaction d'hydratation du ciment, variation de volume de volume thermique due à l'exothermique de l'hydratation au cours des première heures et variation de volume d'origine chimique [15].

Le chatelier à découvert le phénomène de contraction le chatelier en 1990, ce phénomène traduit par les réactions de l'hydratation du ciment, qui explique une diminution globale de volume absolue des produit d'hydratation et la somme des volumes génère une déformation de la matrice cimentaire également appelée retrait chimique, qui poussé une diminution de volume varié entre 8% et 10% de la somme de volume de l'eau et ciment [5], il existe deux méthode pour mesure la contraction le chatelier la méthode dilatométrique dépendant le changement le volume absolue dans

l'échantillon, et la méthode gravimétrique qui permettant de mesurer le changement du poids à chaque instant de la pâte de ciment nécessité au retrait chimique.

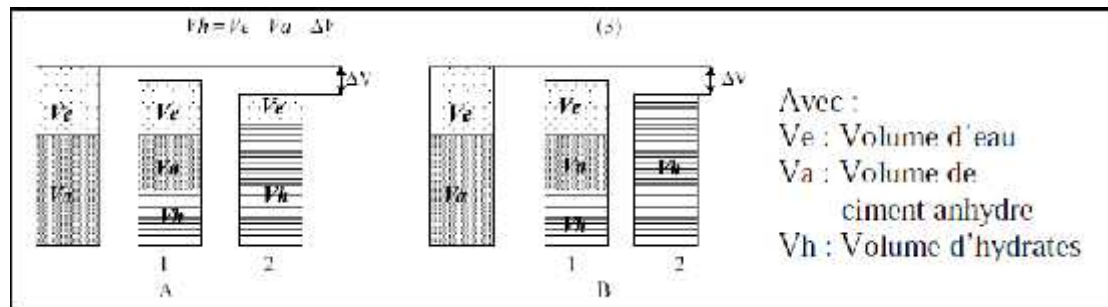


Figure 19 : Contraction Le Chatelier (A : avec ressuage; B : sans ressuage; 1 : hydratation intermédiaire; 2 : hydratation complète) [23].

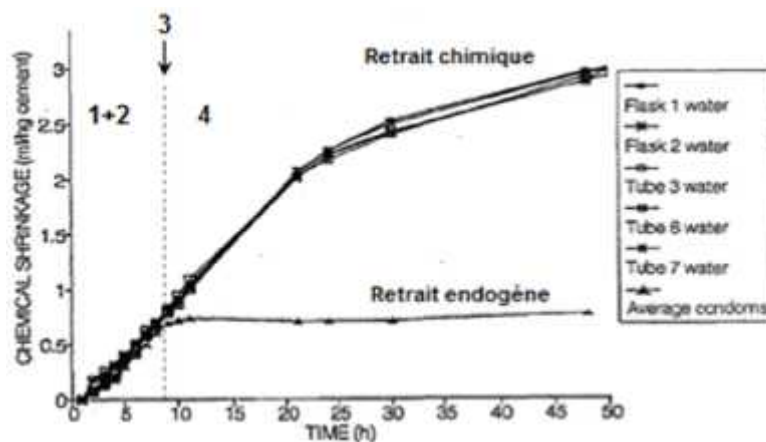


Figure 20 : Évolution du retrait chimique et du retrait endogène pendant l'hydratation d'un ciment avec un E/C de 0,4 [15].

L'évolution du retrait chimique totale passe par quatre phases.

- ✓ Phase 1 et 2 : dans ces périodes le retrait chimique et le retrait endogène sont identique. Ils résultent du phénomène de contraction Le Chatelier. Le phénomène de contraction le chatelier avec un rapport E/C faible.
- ✓ Phase 3 : dans cette périodes les réactions d'hydratation ils continuent et le matériau impose une variation volumique, qui localement gênée par les formations solides, donc la vitesse de retrait endogène diminue fortement.
- ✓ Phase 4 : le matériau fait solide poreux commence à s'opposer à la déformation chimique imposée, et le volume gazeux apparaît dans la porosité capillaire initialement saturé en aux afin compenser les contrainte deux à la variation volumique, et ansai l'eau combiner avec les cavités gazeuses traduit par la diminution de l'équilibre

de pression dans les capillaires d'où le phénomène d'auto-dessiccation, donc cette phase implique l'augmentation du volume micropores dans les hydrates [15].

### II.7. Double couche électrique

Le coulis de ciment se compose par deux phases solide et liquide, dans la phase solide possédant une charge de surface en présence d'une solution ionique qui perturbe la phase de liquide au niveau de l'interface, ce dernier crée une région inter-faciale nommée la double couche électrique, cette couche qui correspond à une transition entre le solide et les caractéristiques initiales de liquide.

Lorsqu'un contact entre les grains de ciment et l'eau, il y a des ions au sein de la solution qui libèrent, donc générant une charge à la surface des particules de ciment qui modifie la diffusion des ions de la solution au voisinage de la surface, les co-ions sont repoussés qui créent une force répulsive, et les contre-ions sont attirés qui créent une force attractive pour rapprocher les particules de charge opposées [24], l'interface entre la surface chargée et la solution électrolytique forme une couche autour de la particule afin de neutraliser ce potentiel électrostatique qui est appelée la double couche électrique. Elle peut être séparée en deux parties, la première partie appelée couche compacte ou couche de Stern est plus proche de la surface de la particule, cette couche constitue des ions adsorbés spécifiquement, se déplacent avec la particule et sont des contre-ions. Cette couche est identifiée comme un condensateur dans lequel le potentiel décroît linéairement avec la distance de la surface. La deuxième partie appelée couche diffuse, elle est constituée de Co-ions et contre-ions sont mobiles [25], dans cette couche la distribution des ions est déterminée par l'interaction électrostatique, les co-ions sont soumis à une attraction et répulsion à cause des contre-ions de la couche de Stern et la surface de même signe et par l'agitation thermique [24], le potentiel à l'extérieur de la couche de Stern continue de décroître non-linéaire. Les deux parties sont séparées par le plan de cisaillement dont le potentiel correspond au potentiel zêta est connu sous le nom (Gouy-Chapman-Stern).

L'évolution du potentiel électrostatique en fonction de la distance à la surface dans le modèle de Stern. Dans la figure (13), le potentiel de surface est noté  $\psi_0$ . La décroissance est décrite comme linéaire dans la couche de Stern et exponentielle dans la couche diffuse, jusqu'à atteindre une valeur  $\psi_{DC}$ . Elle continuera à décroître jusqu'à devenir nulle dans la solution [24].

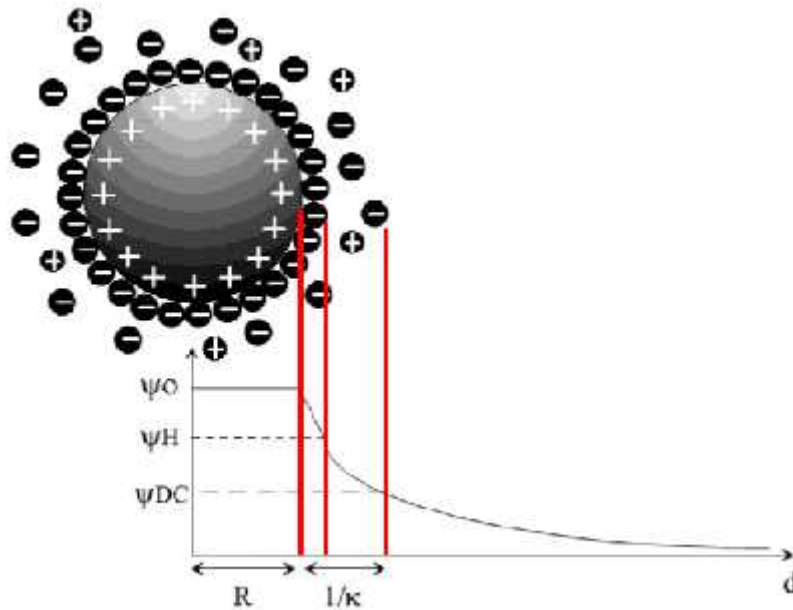


Figure 21 : Représentation schématique de la distribution des ions au voisinage d'une surface chargée positivement et la variation du potentiel électrostatique au voisinage de la distance (modèle de Stern ou de la double couche) [24].

L'évolution de potentiel électrostatique déterminé par l'équation de Poisson-Boltzmann [26], cette équation différentielle non-linéaire est définie par :

$$\Delta \psi = -\rho \exp(-kx) \dots \dots \text{équation (1)}$$

Avec k égal à

$$K = \left( \frac{e^2 \sum_i n_i^0 z_i^2}{\epsilon_0 \epsilon_r K_B T} \right)^{1/2} \dots \dots \text{équation (2)}$$

Longueur de Debye c'est l'inverse du paramètre k qui présente l'extension de la couche diffuse, cette longueur est liée à la force ionique I de la solution définie par :

$$I = \frac{1}{2} \sum_i c_i z_i^2 \dots \dots \text{équation (3)}$$

Où  $c_i$  est la concentration en ions i exprimée en mol/L. Comme  $n_i^0 = c_i N_A$  ( $N_A$  étant le nombre d'Avogadro), donc la longueur de Debye  $k^{-1}$  exprimée par l'équation suivante :

$$K^{-1} = \left( \frac{\epsilon_0 \epsilon_r K_B T}{2 e^2 N_A I} \right)^{1/2} \dots \dots \text{équation (4)}$$

Ce dernier influencé par la concentration des forces ionique, lorsque cette concentration augment, la longueur diminue qui représenté sur la figure suivant.

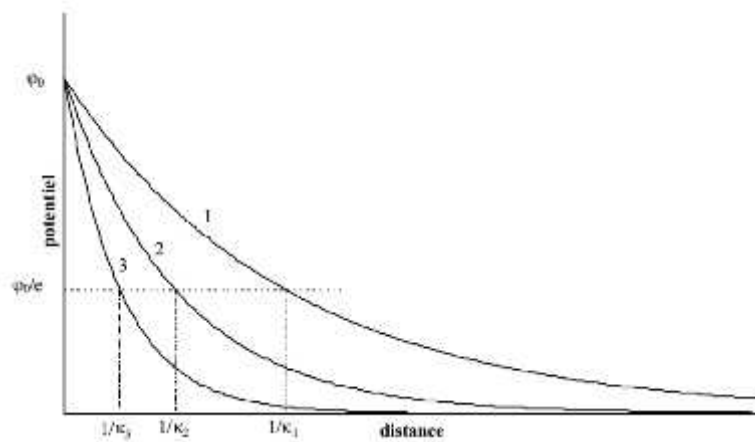


Figure 22 : Effet de la force ionique de la solution sur la taille de la couche diffuse. La courbe 1 correspond à une solution faiblement concentrée, la courbe 3 à la solution la plus concentrée.

### II.8. Potentiel zêta :

Le potentiel zêta noté  $\zeta$  est l'indicateur des interactions de mesure de l'intensité de la répulsion ou de l'attraction électrostatique entre les particules dans la solution à l'extérieur de la double couche ionique de solvatation, qui affecter la stabilité des particules en suspension dépend d'un potentiel d'interaction total, définir dans le plan de cisaillement c'est-à-dire le déplacement entre la couche de stern la plus proche à la surface et la couche de diffuse située à une distance plus grande par rapport au solide. L'augmentation de la concentration des contre-ions situés à la surface des particules, qui former une double couche électrique autour de chaque particule, la première couche de stern qui comportement des ions solidement lié à la surface des particules, et la deuxième couche de liquide qui entoure la particule est plus diffuse indique une distribution ionique déterminée par les forces électriques [27].

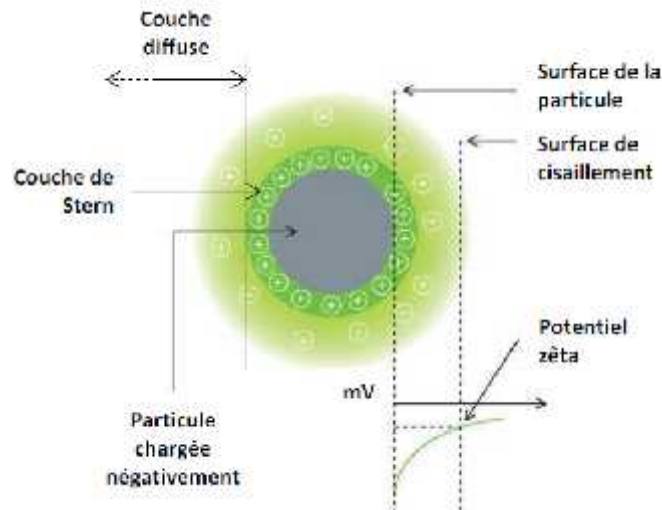


Figure 23 : Présentation schématique du potentiel zêta [24].

Les facteurs qui influencent la valeur de potentiel zêta sont le plus intéressants, assimilés de pH au milieu aqueux, plus influencés sur le potentiel zêta, qui donnent leur valeur sans dire la condition de la mise en suspension des particules [27], tel que le pH élevé la valeur de potentiel zêta est proche à zéro, et aussi la force ionique de la solution est élevée, la double couche plus comprimée et influencée sur l'épaisseur de la double couche et l'adsorption spécifique, lorsque la force est élevée, la valeur de potentiel zêta est diminuée.

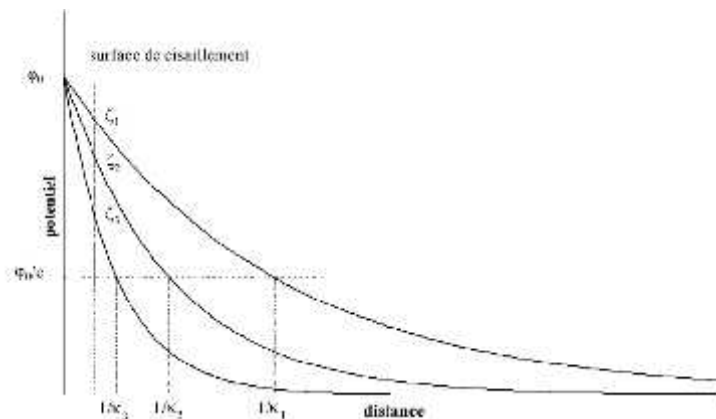


Figure 24 : Influence de la force ionique de la solution sur le potentiel zêta de la particule. La couche de Stern n'est pas représentée dans ce schéma. La courbe 1 correspond à une solution faiblement concentrée, la courbe 3 à la solution la plus concentrée.

L'évolution de potentiel zêta dépend de la composition et la concentration ionique dans la solution électrolytique, est mesurée à partir de la charge de surface. La concentration pour laquelle le potentiel zêta s'annule est appelée point de charge nul, donc le potentiel de la surface est nul et neutralisée la charge de surface de solide, qui correspond

l'inexistence de l'adsorption spécifique, dans ce cas la concentration des ions indifférents augmenté la force ionique qui possède une interaction de tous les ions avec la surface, cette concentration ne modifié pas le point de charge du solide mais abaisser la valeur absolue de potentiel zêta par la compression de la double couche, lorsque l'augmentation de la concentration des ions spécifique adsorbés déplacent le point isoélectrique [24].

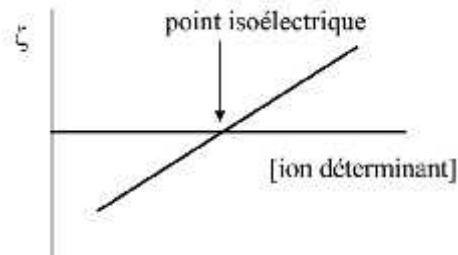


Figure 25 : Evolution schématique du potentiel zêta en fonction de la concentration en ion déterminant le potentiel (ici un cation). En pratique, l'évolution n'est pas linéaire.

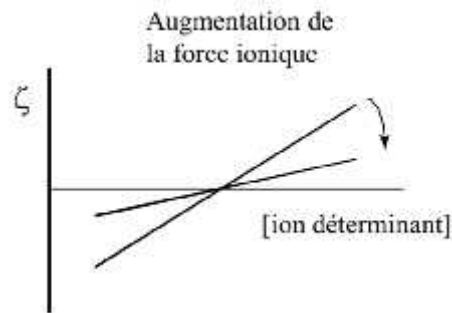


Figure 26: Schéma illustrant l'effet de l'augmentation de la concentration en ions indifférents (force ionique plus élevée).

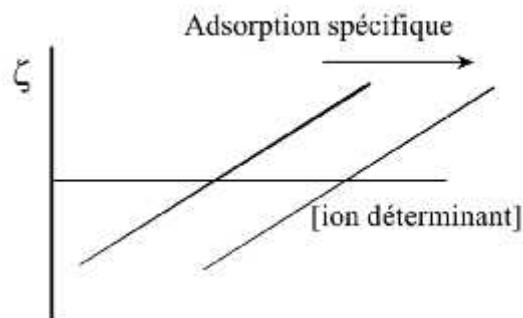


Figure 27: Schéma illustrant l'effet de l'augmentation de la concentration en ion spécifiquement adsorbés (et dans l'hypothèse

**II.8.1. Méthode de mesure :**

La mobilité des particules définies comme le rapport entre la vitesse de particule et les champs électriques E appliqués :  $U = V/E$ .....équation (5)

La mobilité électrophorèse selon Smoluchowski s'écrit :

$$U = \frac{\xi_0}{\eta} \dots \dots \text{équation(6)}$$

Hückel donner d'autre formulation de l'équation qui représenté par la relation suivant :

$$U = \frac{z\xi_0}{2\eta} \dots \dots \text{équation (7)}$$

Henry développé l'équation de Hückel et Smoluchowski qui introduit un facteur de  $f(Ka)$ , ce facteur dépend par la forme de potentiel s'écrit par l'équation suivant :

$$U = \frac{z\xi_0}{2\eta} f(Ka) \dots \dots \text{équation(8)}$$

Hückel propose qu'aucun champ électrique n'applique sur la surface, et Smoluchowski suppose que le champ électrique parallèle à la surface [26].



# Chapitre III

## ETAT DE L'ART

**III.1. Travaux Ali Mardani-Aghabaglou :**

L'objectif de ce travail consiste sur l'étude d'effet de quatre type de super plastifiants ayant même chaîne principale et même structure de polymère mais de poids moléculaire différent et une densité de groupes acide carboxylique de la chaîne latérale différente, avec le rapport E/C =0.4, ils ont utilisé ciment de type CEM II / BM 42.5R, l'influence de ces adjuvants sur les propriétés rhéologiques et la résistance de béton auto plaçant.

Ils ont utilisé différent type d'essais talque Slump-débit, V-entonnoir, la perte crise de trésorerie et boîte-L de BAP, et pour déterminé les paramètres rhéologiques de béton à l'état frais ils ont utilisé le rhéomètre.

Ils ont trouvé qu'il y a relation inverse entre la densité de la chaîne latérale de l'adjuvant de super plastifiants et le temps d'écoulement ainsi la viscosité plastique de mélange de BAP, lorsque la densité de chaîne latérale élevé, le temps d'écoulement et la viscosité diminué.

Ont montré que le dosage de super plastifiant influencé sur la limite d'élasticité apparente, et Aussi montré que la quantité des chaînes latérales du polymère affecté sur l'affaissement [28].

**III.2. Travaux de Safaa MA El-Gamal :**

Ce travaille basé sur l'influence de deux type de super plastifiant le première ligninesulfonate de sodium (LS) et le deuxième de naphtalène sulfonateformaldéhyde (NSF), sur l'hydratation du ciment et les propriétés mécanique des pâtes de ciment Portland, Elle a trouvé que la présence de LS et NSF améliore les propriétés mécaniques de la pâte de ciment pendant toutes les étapes d'hydratation du ciment, aussi diminué le rapport E/C, l'ajout de LS et NSF ne modifie pas les type des produit d'hydratation formée. Elle a montré que le super plastifiant NSF plus efficace par rapport le super plastifiants LS [29].

**III.3. Travaux d'E. Tkaczewska :**

Ce travail étudie l'effet de quatre type de super plastifiant sur les propriétés de ciment mélangé avec cendre volent, il a utilisé deux types de super plastifiants traditionnels la sulfonée mélamine formaldéhyde (SMF) et sulfoné de naphtalène formaldéhyde (SNF) et les deuxièmes types sont super plastifiants de nouvelle génération le poly carboxylate (PC) et de poly carboxylate l'éther (PCE). Il a préparé quatre échantillons du CEM I/AV 42.5R avec différent types de super plastifiants et avec un échantillon de témoin.

Il a montré que l'ajout de poly carboxylate (PC) et de poly carboxylate l'éther (PCE) provoque une diminution la quantité d'eau pour la pâte de ciment obtenir une consistance norme est de 42% pour les PC et 47% pour PCE et pour la présence de sulfoné mélamine formaldéhyde (SMF) et sulfoné de naphtalène formaldéhyde (SNF) dans le ciment mélangé avec cendre volent qui provoque une réduction de la quantité de l'eau pour obtenir une consistance standard.

Il a montré que les quatre types de super plastifiants diminue la chaleur d'hydratation dégagé cependant les super plastifiant de SNF et SMF efficace par rapport le PC et PCP, L'ajoute de super plastifiant dans CEM II /AV 42.5R donne un ciment CEM II /AV 52.5N et d'autre super plastifiant qui mélanger avec le ciment de cendre volent améliorer les propriétés mécaniques [30].

#### **III.4. Travaux de jean baptiste champenois :**

Ils ont travaillé sur l'influence les ions borate de sodium sur l'hydratation du ciment sulfoaluminate de calcium(CSA), contenant 0 à 20% du gypse, cette dernière joue un rôle important sur la cinétique d'hydratation du ciment CSA. Ils ont montré que la présence des ions borate de sodium retardé l'hydratation de ciment CSA [31].

#### **III.5. Aneta Nowak Michta :**

Elle a travaillé sur l'étude de l'influence des super plastifiants sur la porosité de béton durci effectuée sur différent séries des bétons avec des teneuses variables de super plastifiants. Elle a trouvé une relation inverse entre le taux de super plastifiants et la taille des pores [32].

#### **III.6. Travaux j. plank :**

Ils ont présenté un aperçu sur les compositions de PCE actuelles et les méthodes de synthèse, et ensuit la fonctionnalité de cet adjuvant chimique dans les applications spécifiques pour des ciments à faible tenure en carbone et les bétons [33].

##### **III.6.1. Les types de super plastifiant PCE :**

###### **I.6.1.1. Type de MPEG PCE :**

C'est un premier type de PCE qui fournit par société japonais, nippon shkokubai sous le nom de FC600 synthétisés par deux méthode différentes :

La première méthode : le MPEG PCE obtenu après l'estérification de l'acide méthacrylique avec éthylène glycol en utilisant un catalyseur acide et un azéotropique ou sous vide pour

éliminer l'eau. Cette manière produit un polymère en peigne très homogène avec régulière distribution des chaînes greffées MPEG long de la chaîne du tronc poly anionique.

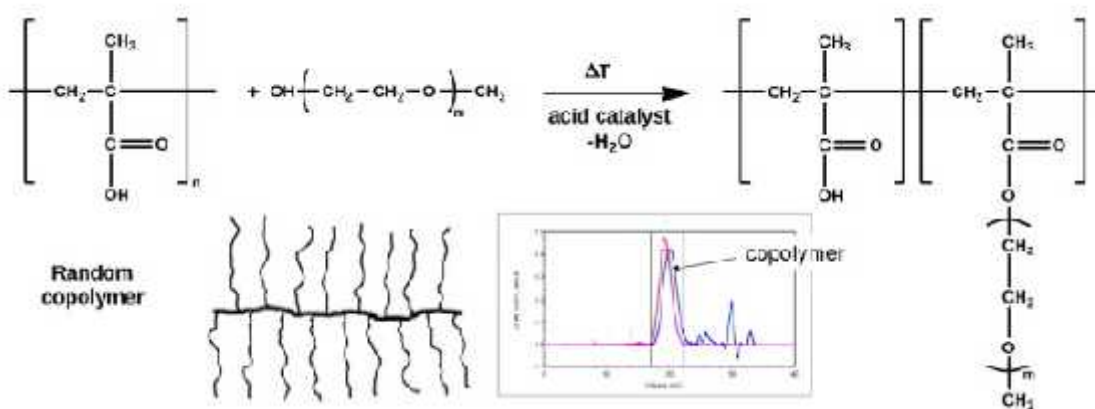


Figure 28 : Estérification (greffage) procédé de synthèse de PCE MPEG de type produisant une très uniforme, copolymère statistique (statistique), comme en témoigne par GPC.

La seconde méthode : plus fréquente pour préparer le MPEG PCE par copolymérisation radicalaire aqueuse d' -méthoxypoly (éthylène glycol) macro monomère d'ester de méthacrylate avec l'acide méthacrylique. Cette réaction est facile à réaliser la caractéristique de la composition et de performance du polymère.

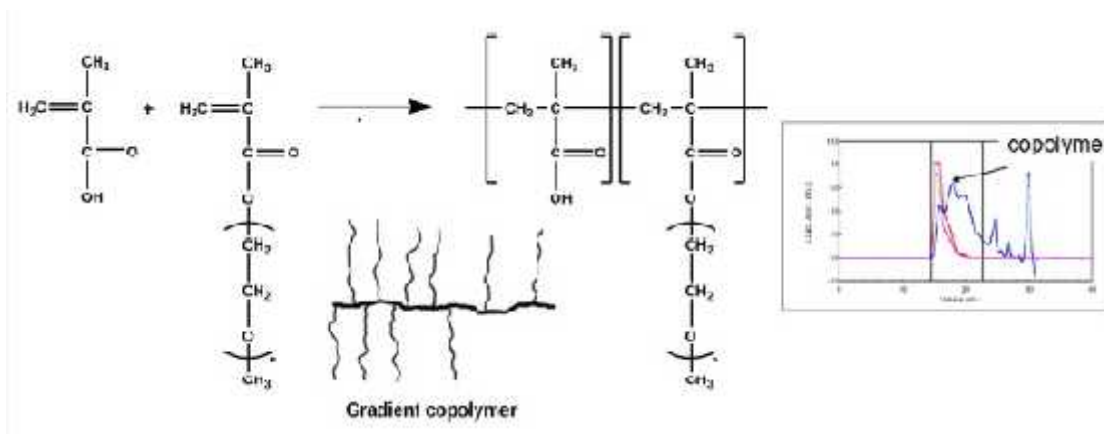


Figure 29 : Libre parcours de copolymérisation radicalaire pour la synthèse de type MPEG PCE production d'un polymère à gradient avec une répartition non homogène de chaînes latérales.

### III.6.1.2. Type d'APEG PCE :

L'APEG PCE préparer par d' -allyl- -méthoxy ou poly -hydroxy (éthylène glycol) éther anhydride et acide maléique ou de l'acide acrylique qui possèdent toujours une séquence strictement alternée de monomères.

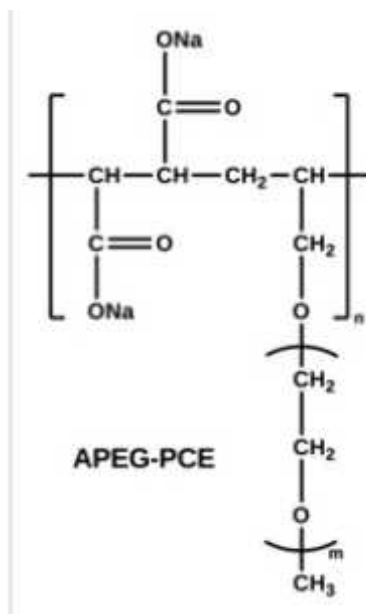


Figure 30 : compositions chimiques de type APEG.

### III.6.1.3. Type de VPEG PCE :

Ce type obtenu par copolymérisation radicalaire aqueuse, par exemple 4-hydroxyde (éthylène glycol), l'éther de vinyle et de poly butyle-anhydride maléique ou l'acide acrylique. Ce type effectue par faible température spécifique est nécessaire.

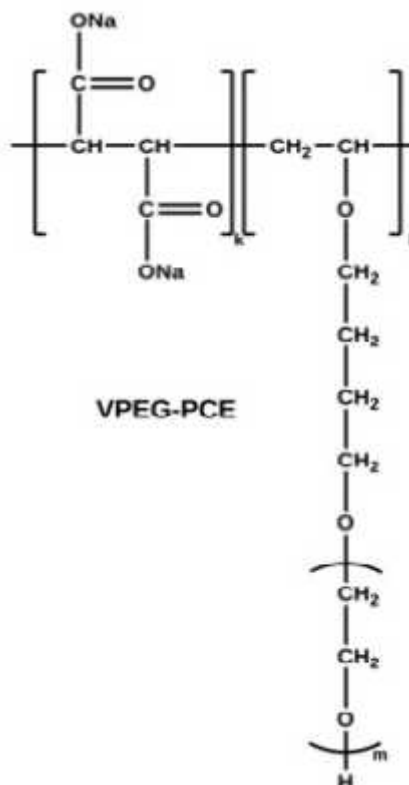


Figure 31 : compositions chimiques de type VPEG.

#### III.6.1.4. Type de HPEG PCE :

-méthallyl- -méthoxy ou poly -hydroxyde (éthylène glycol) est utilisé en tant que macro monomère dans la copolymérisation avec l'acide acrylique. Ce type de PCE qui est facile à polymériser a émergé, il y a quelques années en particulier en Chine.

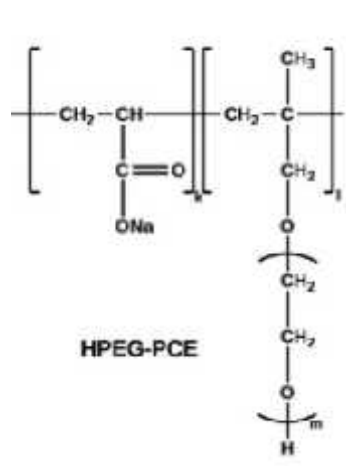


Figure 32 : compositions chimiques de type polymères type PCE HPEG.

L'influence de l'ion fluorure contenant dans l'eau recyclé sur l'efficacité des polymères de PCE et retardateurs la prise dans les ciments mélangés et l'effet de polymère non adsorbé sont étudiés. Dans ce cadre la pâte avec PCE est réduite l'ajoutant en présence les ions de fluoride, mais la quantité de super plastifiant adsorber est élevée.

L'article propose des outils de modélisation nécessaires pour obtenir une compréhension globale des facteurs qui influent sur la microstructure du béton, avec l'objectif final qui réaliser un béton plus durable. Cet article se termine par une étude sur l'avancement des techniques modernes dans l'analyse de microstructure, Cas de la Chine.

#### III.7. Travaux de Yanrong Zhang :

Le travail réalisé par deux type de super plastifiants NSF et PCE afin de voir leur impact sur la fluidité et l'hydratation du ciment.

L'ajout de super plastifiant de NSF amélioré la fluidité et réduire un ralentissement l'hydratation du ciment et ainsi amélioré la dispersion des grains de ciment seulement par répulsion électrostatique, et d'autre part l'ajout de PCE augmenté la fluidité de la pâte de ciment et retarder l'hydratation de ciment et la dispersion par l'effet combinés par la répulsion électrostatique et stérique. D'après Yanrong, Zhanga, Xiagming Kong [18], montre qui la

fluidité de la pâte de ciment avec PCE plus élevé par rapport NSF et la capacité de la dispersion de PCE est plus fort par rapport de NSF.

L'adsorption de NSF sur les grains de ciment former une modèle typique monocouche d'adsorption de Langmuir, sont directement lié à la couverture la surface des grains de ciment, cette adsorption retarder la formation de l'ettringite primaire, et la présence de PCE former une double couche (multicouche) sur la surface des grains de ciment et permet l'augmentation de la fluidité avec la couverture complète de la couche principale et la seconde couche ne contribue pas à l'amélioration la fluidité de ciment, l'adsorption de NSF et PCE conduisant le potentiel zêta pour la pâte de ciment blanc donner un valeur négative de +9mv [18].

### III.8. Travaux El bieta Janowska Renkas :

Cette étude basé sur l'impact de la structure chimique d'un quatre type de super plastifiants de nouvelle génération est dérivés soit l'acide acrylique désigné par le SPA et SPB, caractérisé par une masse molaire inférieure et une chaînes de squelette polyacrylique et nombre de courtes chaînes latérales de polyoxyéthylène élevée, et l'acide maléique désigné par le SPC et SPD, caractérisé par une masse molaire inférieure et une chaînes de squelette polyacryliques un nombre de courtes chaînes latérales de polyoxyéthylène élevée de leur efficacité dans les pâtes de ciment.

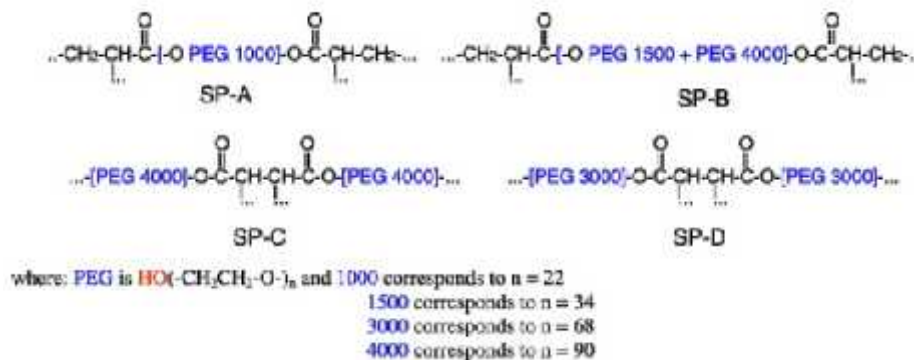


Figure 33. Structure chimique des quatre types de super plastifiants.

L'efficacité de super plastifiant augmente avec son d'hydrophile, défini comme le rapport d'absorbance de la bande de l'éther  $A_{\text{ET}}^{1110}$  ( $\text{STR CH}_2\text{OCH}_2\text{ET}$ ) (Les groupes polyéthylène hydrophiles) de la bande ester  $A_{\text{ES}}^{173040}$  ( $\text{STR C}=\text{O ES}$ ) (les groupes hydrophobes ester  $\text{O}=\text{COC}$ ).

L'efficacité de super plastifiant augmente avec le poids moléculaire du polymère, et ainsi le super plastifiant dérivé de l'acide maléique sont plus efficace par rapport l'acide acrylique [34].

Chapitre IV  
Partie  
expérimentale



## IV. Étude expérimentale : matériaux, méthode expérimentale

### IV.1. Introduction

Le présent travail s'articule sur l'étude de la fonctionnalité des principaux adjuvants incorporés dans le béton, sachant que les agrégats sont des éléments inertes de point de vue chimique, on s'intéresse en premier lieu par l'étude de compatibilité adjuvant-ciment, nous avons commencée par les trois types des ciments les plus utilisées en Algérie, à savoir : CEM I, CEM II et CRS, les adjuvants utilisées sont fournis par la société Sika et englobent les fonctions principales à l'état frais de béton qui sont : accélérateur, et retardateur de prise, plastifiant et superplastifiant. Ces adjuvants portent les noms suivants :

- ) Accélérateur de prise (SIKAPLASTOCRET 160).
- ) Retardateur de prise (PLASTIRETARD).
- ) Plastifiant (SIKAPLAST BV 40<sup>+</sup>).
- ) Superplastifiant (SIKA VISCOCRETE TEMPO 544).

En premier lieu on commence par l'étude des conséquences de ces produits sur la pâte de ciment, commençant par l'étalement au mini cône en fixe le rapport E/C, puis on change ce rapport afin de voir l'effet de ces produits sur la plasticité de ciment, et pour voir la capacité de ces adjuvants pour réduire le rapport précédent tout en gardant le même étalement au mini cône.

L'étape suivante de cette étude basée sur l'étude de comportement rhéologique par viscosimètre afin de déterminer le point de saturation et de voir les conséquences de ces produits sur le modèle de comportement de coulé de ciment.

Une étude est déjà effectuée sur l'effet de ces adjuvants sur la mobilité des particules de ciment par le Zétamètres, dans cette partie nous avons fixés le rapport E/C (0,47), le pourcentage des adjuvants est varié jusqu'à point de saturation déterminé précédemment par le viscosimètre.

L'essai contraction de LECHATELIER est l'étape suivante, ce qui permet de voir le retrait chimique du ciment CEM II, et l'effet des adjuvants sur l'évolution de ce retrait. Afin de comprendre le mécanisme réactionnel des produits, une étude par diffraction des rayons X est réalisée sur des pâtes de ciment témoin et adjuvanté ce qui permet de voir l'évolution des cristaux d'hydratation en fonction de temps et mettre en évidence le rôle de produits utilisés sur cette évolution.

Le dernier stade de cette étude consacré pour la formulation d'un béton par méthode de DRAUX, en utilisant le ciment le plus utilisée en Algérie (CEM II), avec un rapport E/C = 0,47 ce rapport est utilisée et conseillée par la société SIKA qui fabrique des adjuvants, le dosage de ces produits est fixe pour le point de saturation. En premier lieu nous avons commencé par les calculs de formulation selon la modalité de DREUX, cette méthode nécessite des essais de caractérisation des différents matériaux constituants pour un béton de classe 35 MPa.

L'étape suivante consiste à faire des essais rhéologiques sur les adjuvants utilisés afin de déterminer le point de saturation par rapport l'extrait sec, puisque ces produits sont utilisés dans leur état dilué, la quantité de l'eau ajoutée va s'extraire de la quantité d'eau totale. L'élaboration des éprouvettes 7x7x28 s'effectue selon les règles de l'art en présence de vibration au niveau de laboratoire de la société Sika, 21 éprouvettes pour chaque type de béton adjuvanté (y compris les témoins) sont conservées dans l'eau à température de  $21 \pm 1^\circ \text{C}$  selon les conditions exigées par les normes en vigueur.

Après 28 jours (lorsque on atteint 80 % de résistance finale), nous avons réalisé deux types d'essais :

- ) Essai non destructif par ultrason, en comparant les résultats obtenus à celles du contrôle classique, et pour voir l'exactitude de différentes lois de calcul en fonction de modification chimique du béton par les produits chimiques (Adjuvant).
- ) Essai dynamique à haute fréquence en appliquant les différents niveaux de charge (ascendant jusque 40% par pas de 10%).

L'ensemble des résultats obtenus sont analysés et commentés ce qui nous a permet de formuler une image claire sur l'objectif recherché sous forme de conclusions et de recommandations.

Sur la base des résultats trouvées nous avons clôturés notre étude par une conclusion et des recommandations qui permet d'exploiter notre travail, soit sur le domaine de la recherche, soit sur le domaine pratique.

#### **IV.1. Matériaux utilisés :**

##### **IV.1.1. Ciments**

Dans ce travaille on a utilisé trois types de ciment : CEM I, CEM II /B 42.5 N et CRS, fabriquées et commercialisée par Lafarge, les tableaux suivant présente leurs compositions minéralogiques et chimiques selon ces fiches techniques.

**Tableau 1.** Composition minéralogique de CEM I (CLINKER).

Minéraux	Pourcentage
C <sub>3</sub> S	60.61
C <sub>2</sub> S	15.36
C <sub>3</sub> A	6.60
C <sub>4</sub> AF	10

Tableau 2. Composition minéralogique de CEM II (CLINKER).

Minéraux	Pourcentage
C <sub>3</sub> S	58 – 64
C <sub>2</sub> S	12 – 18
C <sub>3</sub> A	6 – 8
C <sub>4</sub> AF	10 – 12

Tableau 3. Composition minéralogique de ciment CRS (CLINKER).

Minéraux	Pourcentage
C <sub>3</sub> A	5
C <sub>4</sub> AF + 2(C <sub>3</sub> A)	20

#### IV.1.2. Les adjuvants :

Les adjuvants utilisés dans ce travail sont des produits employés par sika, on a utilisé quatre types des adjuvants.

**A. SIKA VISCOCRETE TEMPO 544 :** qui est un superplastifiants haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de polycarboxylates modifiés. Conforme à la norme NF EN 934-2.

La notion technique du produit donne les propriétés suivantes

- ) Aspect .....Liquide Marron.
- ) Densité.....1.07±0.01.
- ) PH.....5±1.
- ) Teneur en Na<sub>2</sub>OEq ..... 1%.
- ) Teneur en ions Cl<sup>-</sup>..... 0.1%
- ) Extrait sec .....32±1.2%

✓ **Condition d'application**

Plage d'utilisation recommandée : 0.5 à 3% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Plage d'utilisation usuelle : 0.6 à 1.5% du poids du ciment ou du liant.

**B. SIKAPLAST BV 40+ :** qui sont un plastifiant réducteur d'eau pour haute résistance mécanique non chloré et prêt, à base de polycarboxylates modifiés.

Conforme à la norme NF EN 934-2

La notion technique du produit donne les propriétés suivantes

) Aspect .....	Liquide Marron.
) Densité .....	1.040 ± 0.015
) PH.....	4.7 ± 1
) Teneur en Na <sub>2</sub> O Eq .....	0.5%
) Teneur en ions Cl <sup>-</sup> .....	0.1%
) Extrait sec .....	11.5 ± 1.5

#### **Condition d'application :**

Plage d'utilisation recommandée : 0.3 à 1.5 % du poids du liant selon les performances recherchées.

Dosage usuelle : 0.3 à 1 %.

**C. PLASTIRETARD** qui est un retardateur de prise pouvant être utilisé dans tous les bétons

Employé à certains dosages, il se comporte comme un réducteur d'eau.

Conforme à la norme NF EN 934-2

#### ➤ **Domaines d'application**

➤ Amélioration des résistances mécaniques :

Grâce à une réduction d'eau de 10 à 15%, le PLASTIRETARD augmente les résistances mécaniques béton à long terme de 20 à 30%. Il améliore aussi considérablement la compacité. Il est particulièrement adapté : aux bétons armés et précontraints, aux bétons des réservoirs.

#### ➤ **Bétonnage par temps chaud ou en grande masse :**

L'effet retardateur de prise du PLASTIRETARD permet d'éviter une brusque élévation de la température du béton lors de la prise et rend son emploi indispensable

) Lorsque la température est élevée.

) Pour les bétons en grande masse.

#### ➤ **Reprises de bétonnage :**

Grâce au retard de prise important que peut provoquer le PLASTIRETARD, il est possible d'effectuer des reprises de bétonnage après plusieurs heures d'interruption sans autre précaution particulière que la protection contre la dessiccation.

➤ **Transports de longue durée du béton :**

L'utilisation de PLASTIRETARD permet de transporter sans problème tous les bétons sur de grandes distances quelles que soient les conditions (températures, risques d'embouteillage).

La notion technique du produit donne les propriétés suivantes.

) Aspect .....	Jaune légèrement trouble.
) Densité .....	1.175 ±0.015.
) PH.....	8.5 à 10.5.
) Teneur en Na <sub>2</sub> O Eq .....	<6.0 %.
) Teneur en ions Cl <sup>-</sup> .....	<0.1 %.
) Extrait sec .....	29.5 à 32.6 %.

➤ **Condition d'application :**

Plage d'utilisation recommandée : 0.2 à 0.5 % du poids du ciment (soit 0.17 à 0.43 litre pour 100kg de ciment) suivant l'effet recherché.

**D. PLASTOCRETE 160R** : est un plastifiant de synthèse non coloré qui permet une meilleure hydratation du ciment par son effet de défloculation. Il provoque une augmentation des résistances mécaniques dès les jeunes âges et diminue l'absorption capillaire.

➤ **Domaines d'application**

**1. Optimisation du dosage en ciment**

Par son effet de défloculation, le PLASTOCRETE 160 permet une hydratation plus complète des grains de ciment, qui entraîne un gain de résistance.

**2. Réduction des délais de manipulation**

L'effet accélérateur de durcissement du PLASTOCRETE 160 permet d'obtenir plus rapidement les résistances minimales nécessaires au décoffrage. Ceci est particulièrement intéressant dans les cas suivants :

- ) Chantiers de bâtiment : décoffrage le lendemain du coulage même par temps frais.
- ) Préfabrication légère : diminution des délais de manipulation des pièces.

**3. Diminution de la capillarité :**

L'emploi du PLASTOCRETE 160 dans un béton conduit à une diminution de la capillarité. Il est donc particulièrement intéressant pour les bétons de masse enterrés.

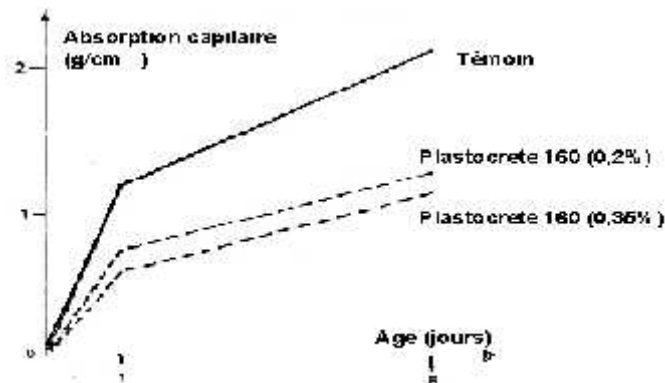


Figure 34. Evolution de l'absorption capillaire sur éprouvettes à 7 jours d'âges (selon NF EN 934-2 tab.9).

### Absorption capillaire sur mortier

La notion technique du produit donne les propriétés suivantes.

- ] Aspect .....Liquide brun.
- ] Densité .....1.02 ±0.01.
- ] PH..... 10 ± 1.
- ] Teneur en ions Cl<sup>-</sup>.....<1g /l.
- ] Extrait sec .....08.5 ± 1 %.

#### ➤ Condition d'application

Plage d'utilisation recommandée :de 0.20 à0.35 % du poids du liant ou du ciment (soit environ 0.é à 0.34 litre pour 100 kg de ciment).

#### ✓ Dosage des adjuvants :

On détermine le dosage des adjuvants extrait sec par la formulation suivante :

$$A_{5i} = (C \cdot p) / 100$$

Avec :

$A_{5i}$  : Quantité d'adjuvant sec.

C : dosage en ciment (200g).

P : pourcentage d'adjuvant.

### IV.2. Effet de dosage des adjuvants

Dans ce cas nous avons étudié l'influence des différent type et dosage des adjuvants sur la rhéologie de coulis du ciment a été évalué par le mini cône, les résultats suivant représenté l'évolution de l'étalement pour différent dosage des adjuvants et le rapport E/C = 0.47.

### IV.2.1. Étalement au mini cône

Pour déterminer l'étalement nous avons utilisé un mini cône qui placé sur une plaque d'étalement, puis il remplit de coulis de ciment et ensuite soulevé le cône, le coulis sort en formant une galette qui s'élargit sous l'effet de la gravité, la maniabilité de coulis consiste en mesure la valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de coulis. L'essai de l'étalement dans ce travail effectuée par deux étapes, la première consiste à fixer un rapport E/C=0.47 avec un différent dosage d'adjuvant pour chaque type, pour la deuxième étape, le rapport E/C est variée et le dosage d'adjuvant a été fixé au point dite de saturation déterminée précédemment.



Figure 35. Détermination de l'étalement

Les résultats pour chaque type du ciment sont mentionnés dans le tableau ci-après

Tableau 4. Evolution de l'étalement pour CEM I

Type de pâte de ciment	Adjuvant (%)	Etalement (mm)	E/C
Pâte de ciment témoin	0	12.5	0.47
Pâte avec super plastifiant	0.5	31.5	0.47
	1	33.5	0.47
	1.5	33	0.47
Pâte de ciment avec plastifiant	0.3	34.5	0.47
	0.4	32.5	0.47
	0.5	32.75	0.47
	0.8	32.75	0.47
	1	31.25	0.47
	1.5	31	0.47
Pâte de ciment avec retardateur de prise	0.2	18	0.47
	0.3	19.5	0.47
	0.5	17.5	0.47
Pâte de ciment avec accélérateur de prise	0.2	19	0.47
	0.25	19	0.47
	0.3	20	0.47
	0.35	20	0.47

Tableau 5. Evolution de l'étalement Pour CEM II /B 42.5N :

type de pâte de ciment	Pourcentage des adjuvants	L'étalement en (mm)	E/C
Pâte de ciment témoin	0	17.5	0.47
Pâte de ciment avec superplastifiant	0.5	31.5	0.47
	1	36	0.47
	1.5	33.5	0.47
Pâte de ciment avec plastifiant	0.3	30	0.47
	0.4	31.5	0.47
	0.5	30.75	0.47
	0.8	32.75	0.47
	1	34	0.47
	1.5	34.25	0.47
Pâte de ciment avec retardateur de prise	0.2	23	0.47
	0.3	23	0.47
	0.5	23	0.47
Pâte de ciment avec accélérateur de prise	0.2	18.25	0.47
	0.25	20.75	0.47
	0.3	22	0.47
	0.35	23	0.47

Tableau 6. Evolution de l'étalement Pour CRS

Type de pâte de ciment	Pourcentage des adjuvants	Etalement (mm)	E/C
Pâte de ciment témoin	0	9.5	0.47
Pâte de ciment avec super plastifiant	0.5	33	0.47
	1	34	0.47
	1.5	33.25	0.47
Pâte de ciment avec plastifiant	0.3	35.5	0.47
	0.4	30	0.47
	0.5	31.75	0.47
	0.8	31.5	0.47
	1	32	0.47
	1.5	29.5	0.47
Pâte de ciment avec retardateur de prise	0.2	15	0.47
	0.3	15	0.47
	0.5	15	0.47
Pâte de ciment avec accélérateur de prise	0.2	16	0.47
	0.25	16	0.47
	0.3	16	0.47
	0.35	16	0.47

Les résultats trouvés sont présentés graphiquement comme indique les figures ci-après



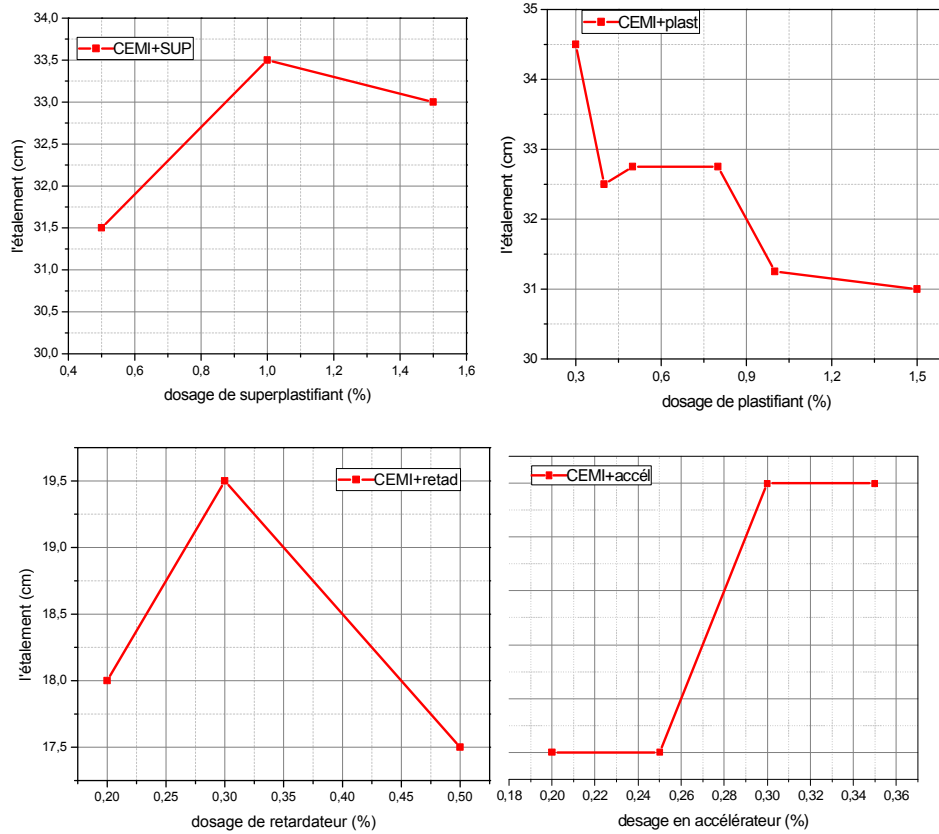


Figure 36. Évolution de l'étalement en fonction des adjuvants pour CEM I

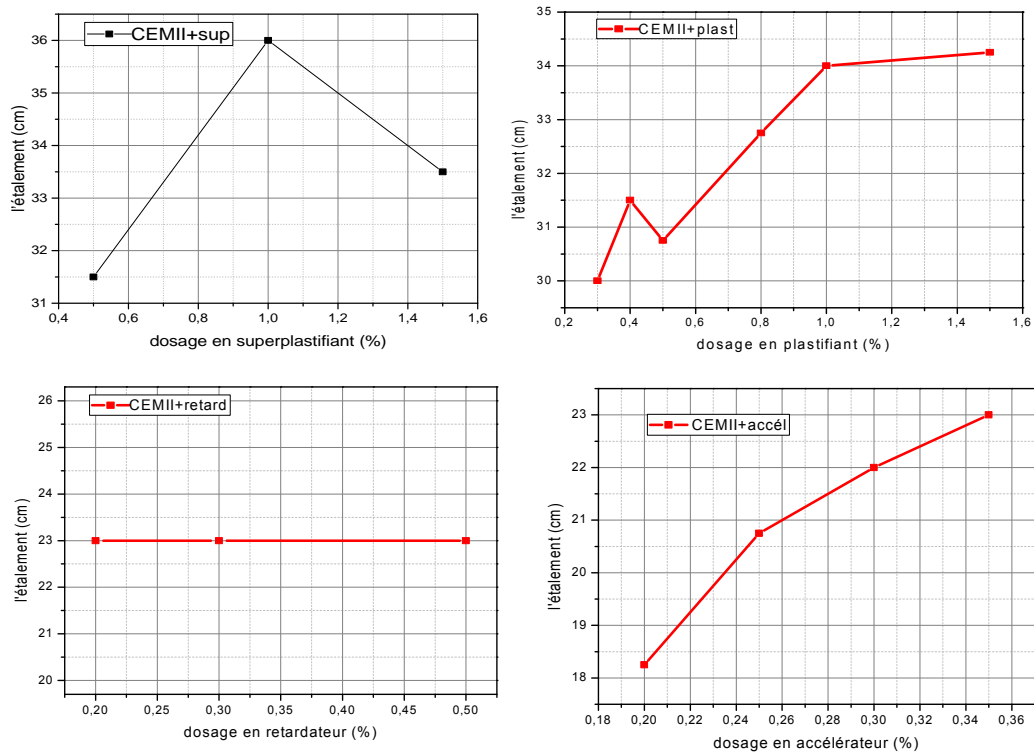
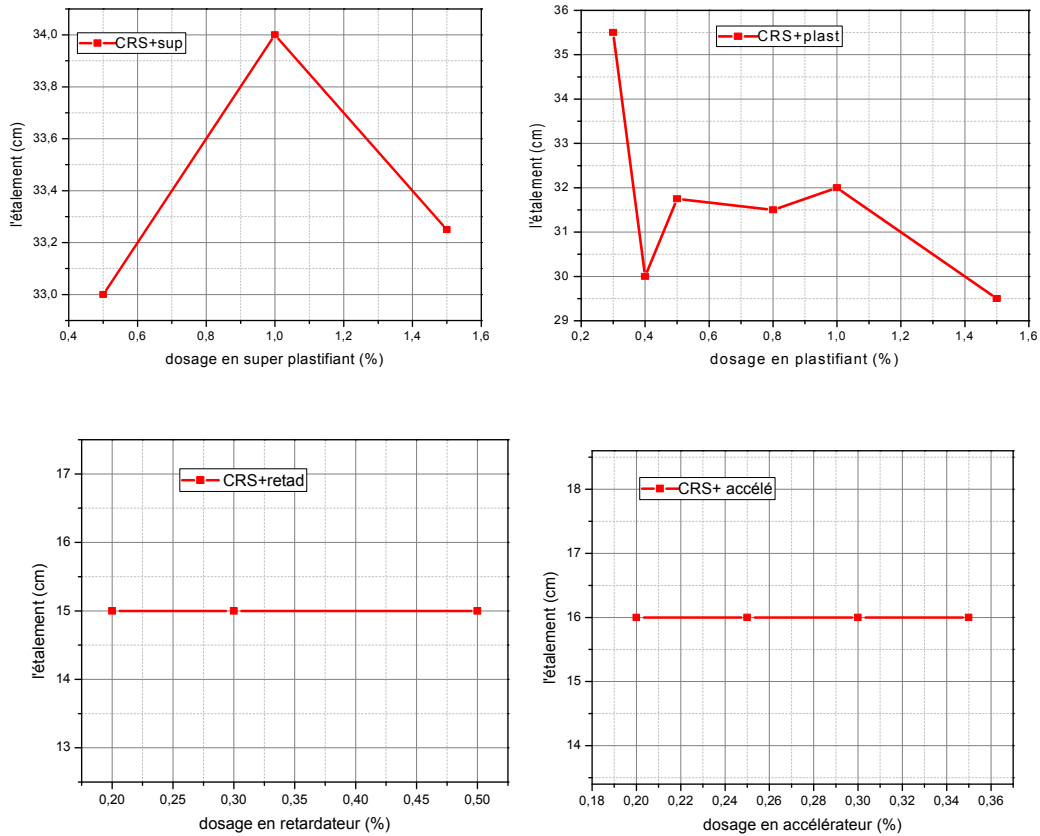


Figure 37. Evolution de l'étalement en fonction des adjuvants pour CEM II



**Figure 38.**: évolution de l'étalement en fonction des adjuvants pour CRS

Les figures précédentes présentent l'étalement en fonction du dosage des adjuvants pour un rapport E/C=0,47. Pour CEM I, le superplastifiant provoque une valeur d'étalement maximum (33,5cm) pour un dosage de 1%, puis cette valeur est diminuée pour un dosage de 1,5, en constatant que le point est autour de 1%. Concernant le plastifiant, un dosage de 0,3 % donne une valeur d'étalement de 34,5cm : c'est la valeur maximale, en comparant avec le superplastifiant nous remarquons que le plastifiant est plus réactif pour une valeur inférieure à celle du superplastifiant se la montre que si le dernier est moins compatible avec ce type de ciment (CEMI) par rapport au plastifiant.

En ce qui concerne les retardateurs de prise, un étalement maximal de 19,5cm est marqué pour un dosage de 0,3%, cette valeur d'étalement est supérieure à celle du témoin ce qui montre l'effet secondaire des retardateurs sur la viscosité du ciment, cette fonction secondaire est aussi remarquée pour les accélérateurs de prise pour un dosage entre 0,3% et 0,35 %.

Dans le cas de CEM II une meilleure valeur d'étalement de 36 cm est marquée pour un dosage de 1% de superplastifiant, ce qui montre que ce produit est mieux que le plastifiant car ce dernier provoque un étalement de 31,5cm pour un dosage de 0,4 % puis elle se

dégrade à 30.7 pour un dosage de 0.5% puis elle augmente pour les dosages supérieurs, cet écart peut être révisé au point de saturation qui est estimé à 0.4%, l'augmentation pour des valeurs supérieures peut être expliquée par le phénomène de ressuage.

Les résultats de l'étalement de retardateur de prise montrent que ce dernier n'a aucune influence sur l'étalement contrairement aux accélérateurs de prise qui ont des valeurs d'étalement proportionnelles au taux de dosage par conséquent cette expérience de mini-cône ne permet pas de déterminer le point de saturation.

Concernant le CRS les plastifiants sont plus réactifs et plus compatibles pour un dosage de 0.3% qui correspond à un étalement de 35.5cm, le point de saturation pour le superplastifiant est marqué par un dosage de 1% qui donne un étalement de 34cm, les retardateurs et accélérateurs sont inertes vis-à-vis de la fluidification du ciment, en conséquence ce critère n'a pas été utilisé pour déterminer le point de saturation.

#### IV.2.2. Effet du rapport E/C :

Dans ce cas nous avons étudié l'influence de différents rapports E/C sur le comportement rhéologique, les résultats sont représentés dans les figures suivantes :

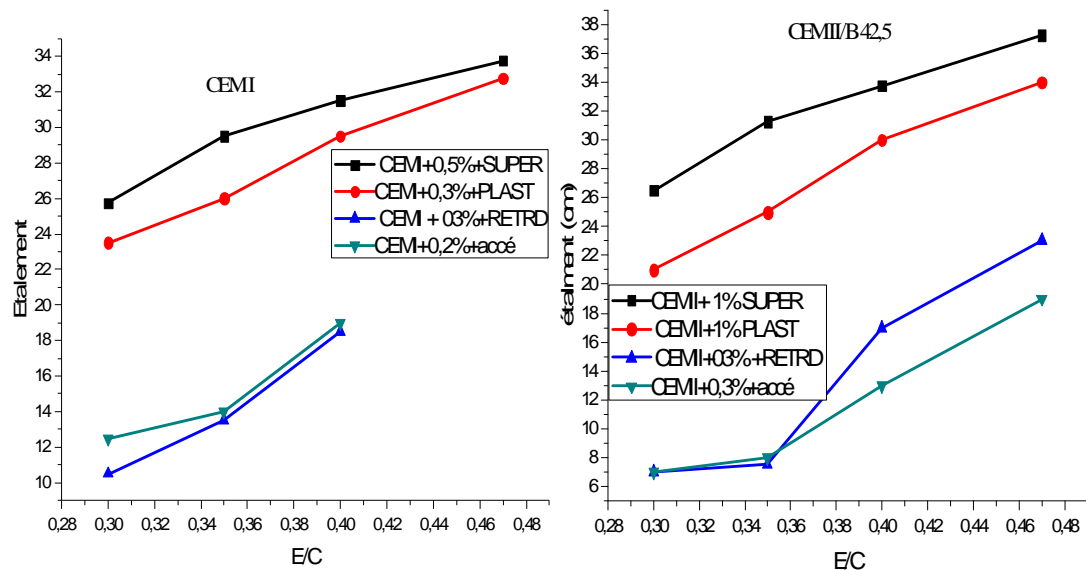


Figure 39. L'évolution de l'étalement en fonction de rapport E/C.

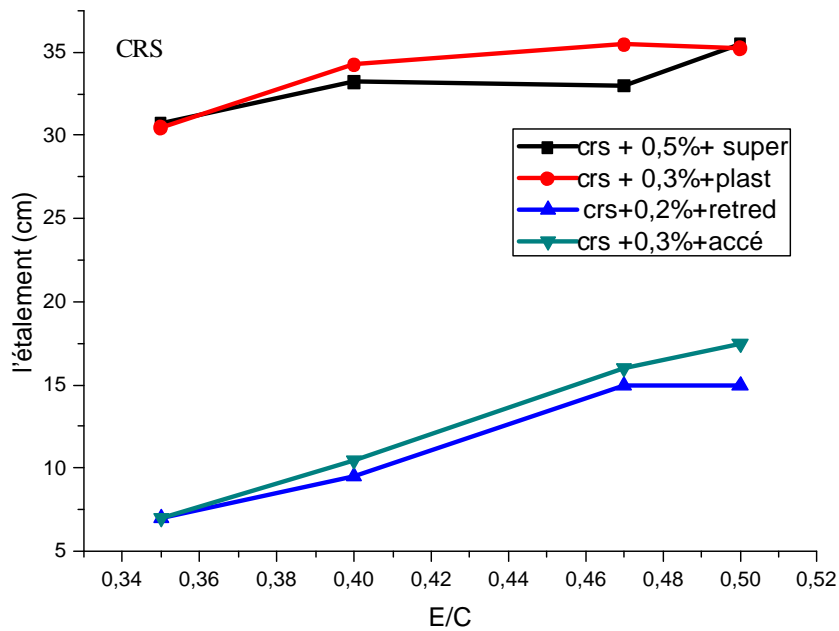


Figure 40. L'évolution de l'étalement en fonction de rapport E/C.

### IV.3. Rhéologie d'un coulis de ciment

#### IV.3.1. Point de saturation

##### IV.3.1.1. Matériaux et matérielle utilisé

Pour un meilleur comportement rhéologique, il faut déterminer le pourcentage optimal des adjuvants qui introduit dans le coulis de ciment. Les essais rhéologiques ont été réalisés par un viscosimètre VT550 d'un système géométrie SV-DIN, le matériau placé dans un cylindre extérieur creux fixé et le cisaille est imposée par rotation du cylindre pleine à l'intérieur. Le résultat de cisaillement d'une suspension cimentaire est déterminé la viscosité et la contrainte seuil.



Figure 41. : viscosimètre VT550

On a varié le dosage des adjuvants jusqu'à le coulis déveine newtonien, c'est une viscosité plastique constant en fonction du gradient de vitesse, ce dosage n'influencé pas sur la propriété rhéologique du coulis de ciment, le point de saturation en adjuvant avec un rapport E/C=0.47 déterminé pour CEMI, CEMII/B42.5N et CRS, les résultats représentés sur les figures suivant

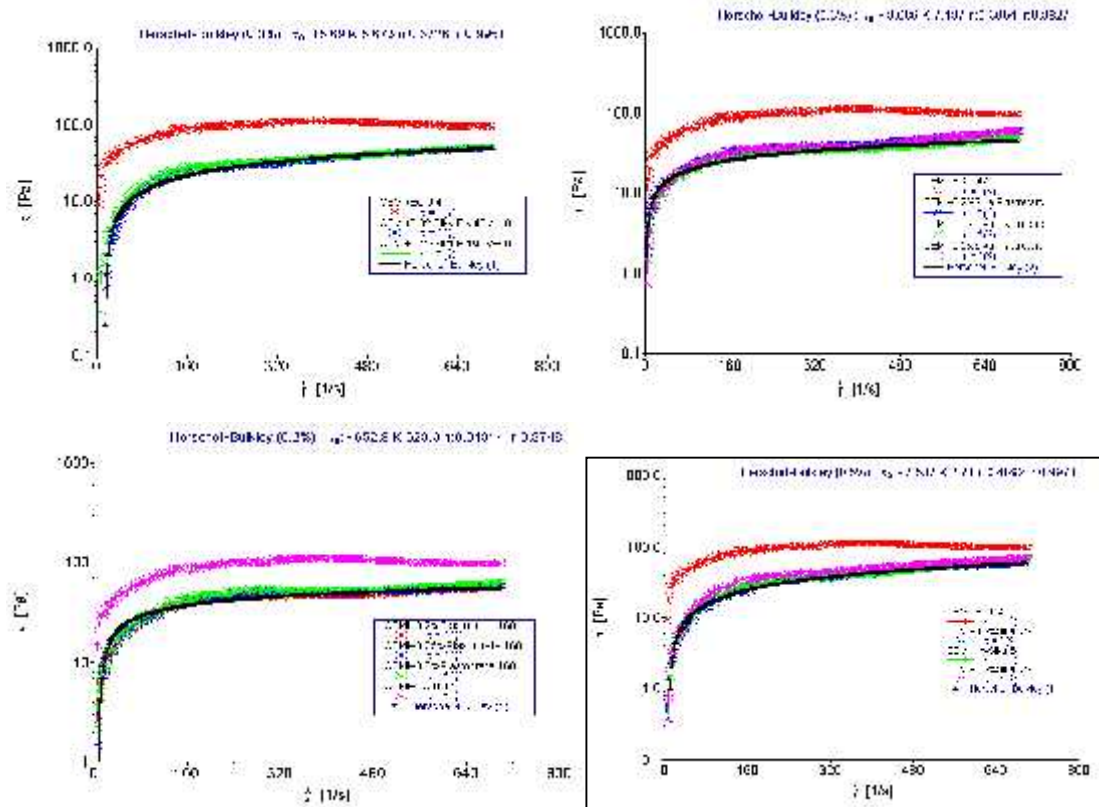


Figure 42. Evolution de la contraint de cisaillement en fonction de % adjuvant pour CEM I

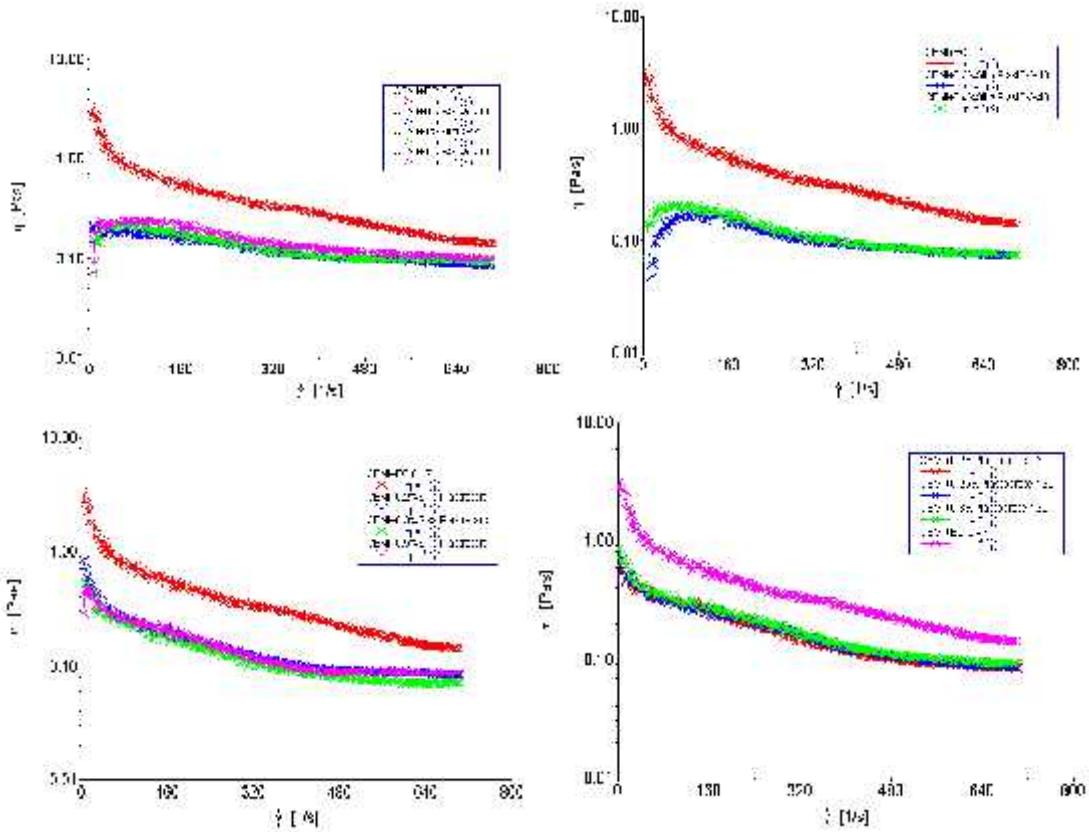


Figure 43. Evolution de la viscosité en fonction de % d'adjuvant pour CEM I

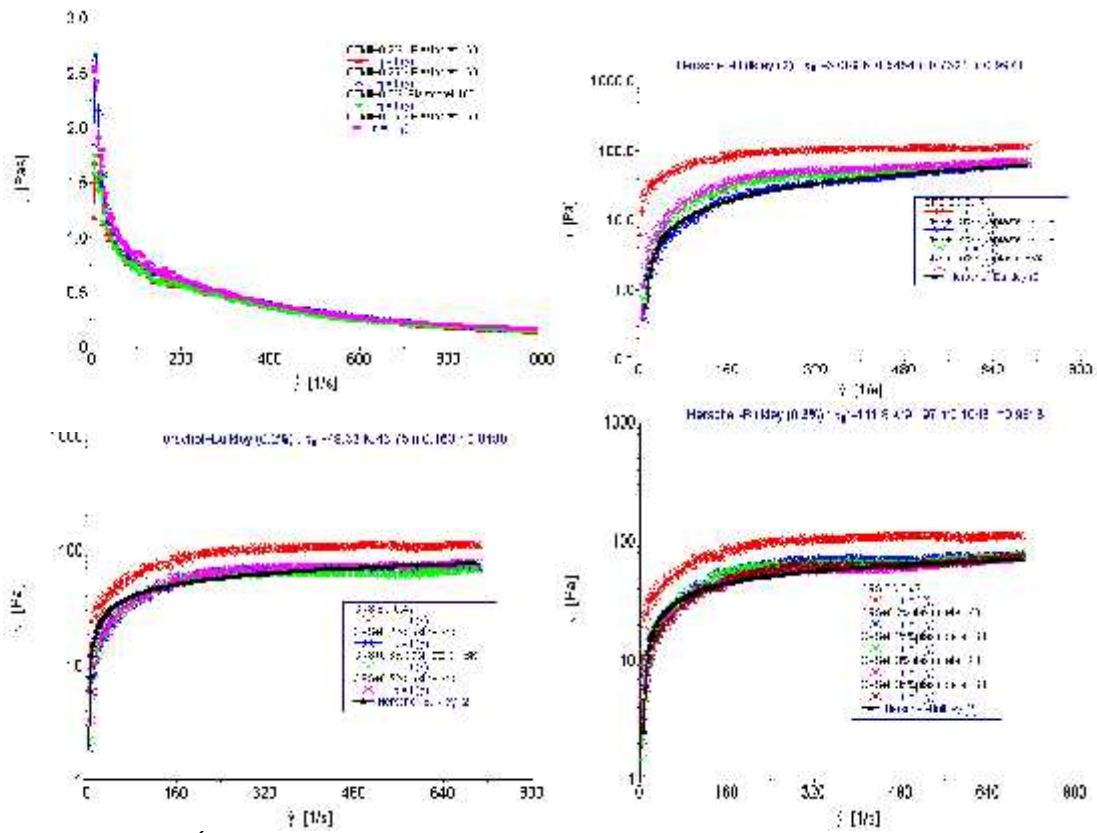


Figure 44. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de % d'adjuvant pour CRS

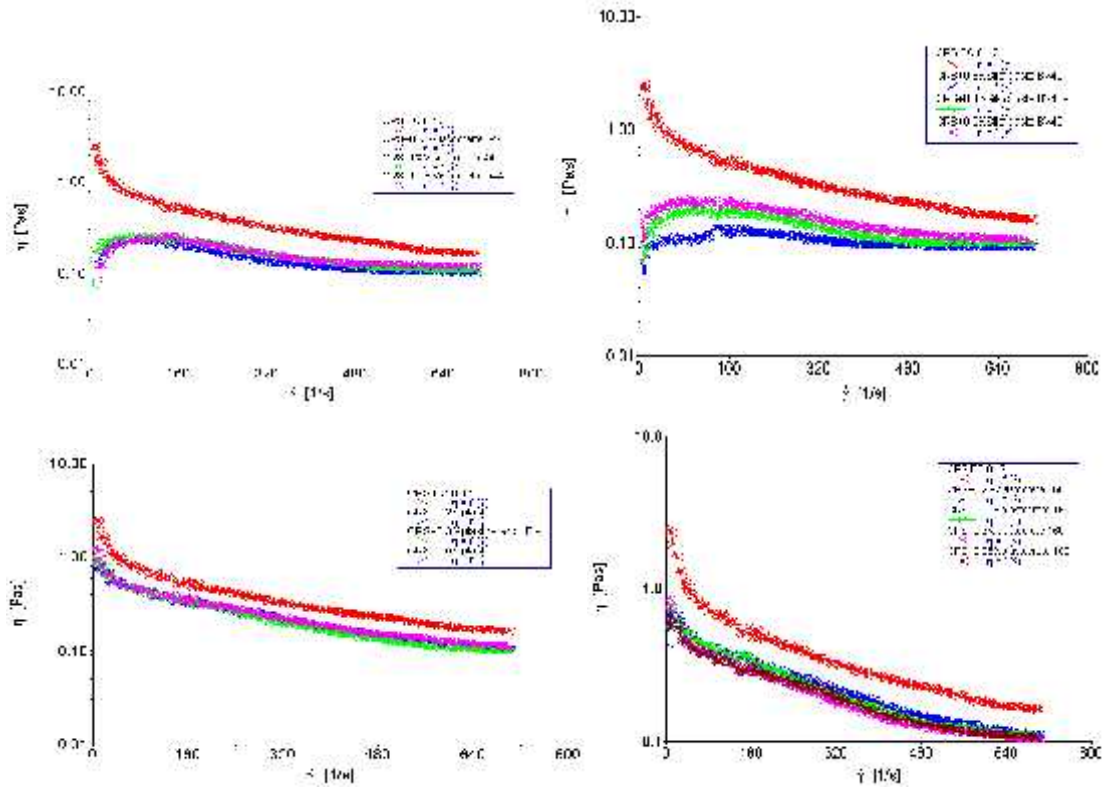


Figure 45. Evolution de la viscosité en fonction de % d'adjuvant pour CRS

➤ CEM II :

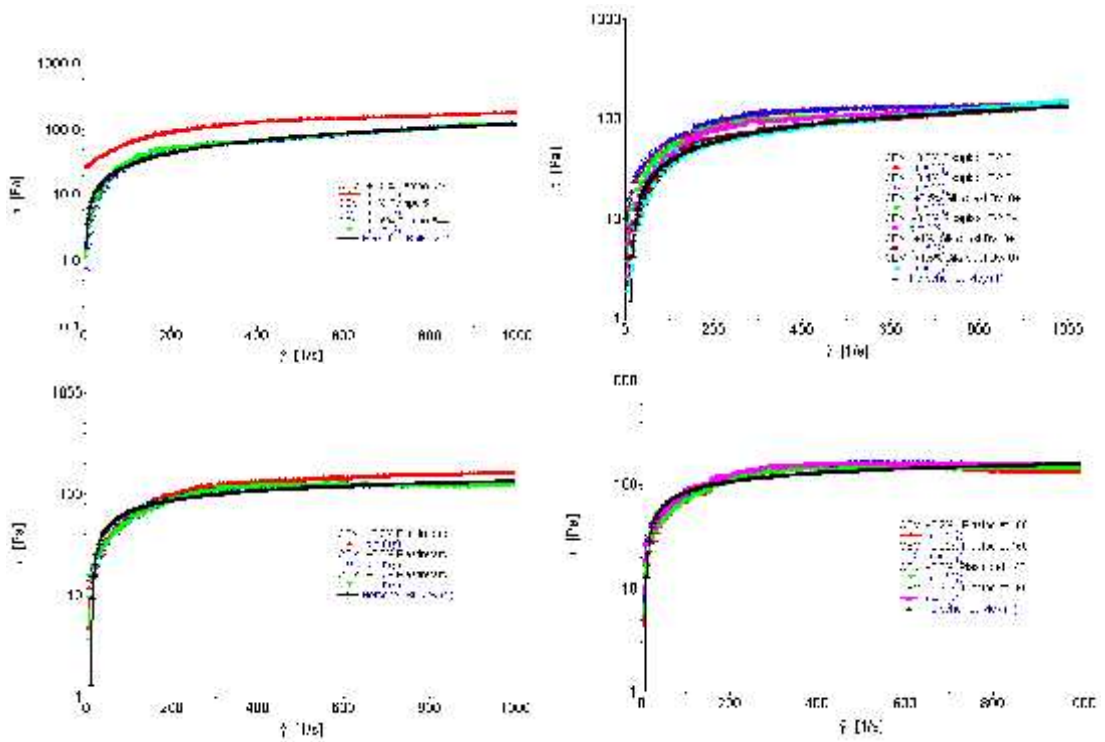
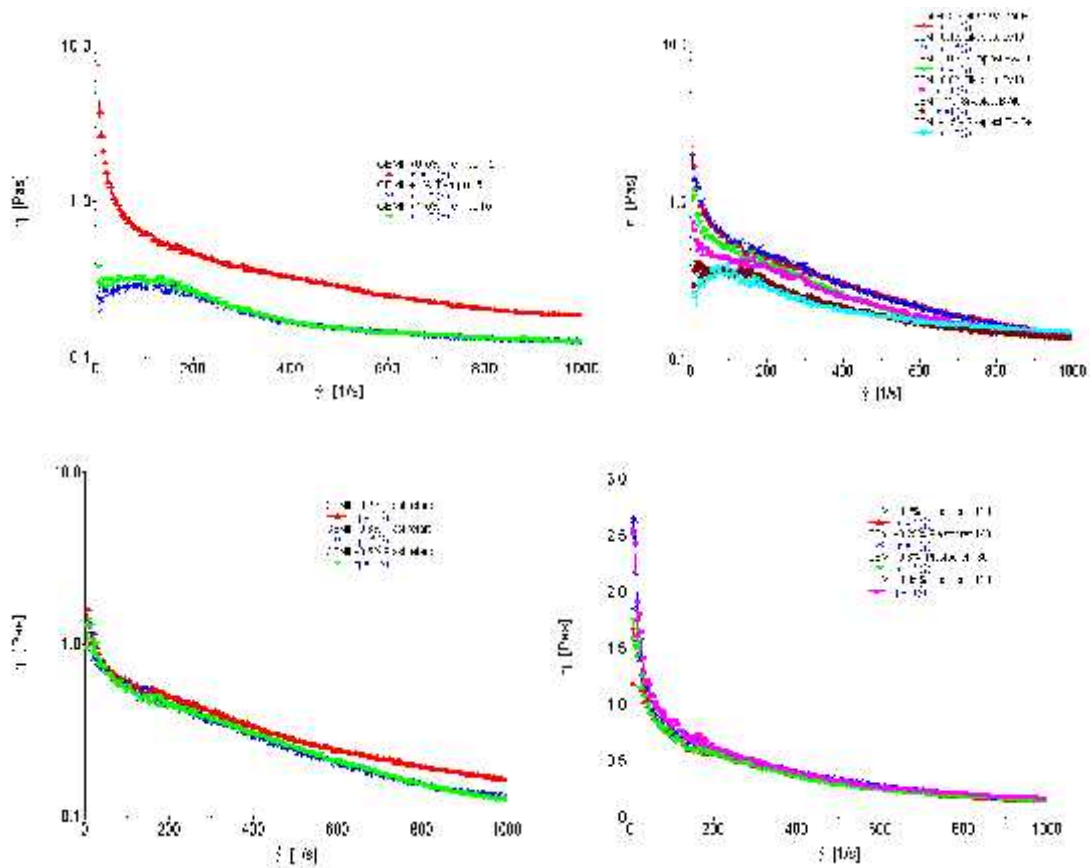


Figure 46. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de % d'adjuvant pour CEM II



**Figure 47.** Évolution de la viscosité en fonction de % d'adjuvant pour CEM II

Les figures précédentes représentent l'évolution de la viscosité, également la diminution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement en présence de différent type de dosage des adjuvants.

On remarque que l'augmentation le dosage des adjuvants conduit une diminution de la contrainte de cisaillement, leur augmentation devient plus l'écoulement de coulis presque newtonien grâce à l'effet dispersant, dans certaine dosage le coulis s'écoule sans moindre effort ce dosage est appelé point de saturation qui provoqué la diminution du seuil de cisaillement.

Également plus le pourcentage des adjuvants augment plus la viscosité diminue défini par l'effet dispersant des adjuvants, jusqu'à certain dosage rendre la viscosité constante, c'est le point de saturation.

D'après les résultats, on remarque que le dosage ou bien le point de saturation en super plastifiant, plastifiant, retardateur et l'accélérateur pour CEMI et CRS sont lié selon les compositions chimiques et minéralogiques différent. Le pourcentage en adjuvant



augment plus le seuil d'écoulement très faible (l'écoulement presque newtonien) avec l'augmentation du taux.

Tableau 7. Point de saturation.

Point de saturation Types d'adjuvants	%(CEMI)	%(CEMII)	(CRS)
Superplastifiant TEMPO 544	0.5	1	0.5
Plastifiant SIKAPLAST BV 40 <sup>+</sup>	0.3	1	0.3
Retardateur de prise PLASTIRETARD	0.3	0.3	0.2
Accélérateur de prise SIKA PLASTOCRET 160	0.2	0.3	0.3

### IV.3. Potentiel zêta

Le potentiel zêta est la mesure de l'intensité de la répulsion ou de l'attraction électrostatique ou électrique entre les particules, il est le paramètre essentiel utilisé dans l'étude de stabilité des suspensions colloïdales dans un liquide.

Le zétasizer est une appaillage travaillé sur l'analyse innovant de haut précision pour mesuré la valeur de potentiel zêta, totalement concerné à la caractérisation de la charge de particule et de colloïdale et l'outil idéal pour l'étude de stabilité de suspension colloïdale et les propriétés électrophorétique des particules, ces résultats donnés sous format Excel.

Dans notre travaille on a utilisé trois type de ciment CEMI, CEMII/B42.5 N et CRS avec quatre type d'adjuvant qui ajudé dans le coulis de ciment par différent dosage, pour mesure le potentiel zêta on a préparé deux type de solutions, la première solution c'est le témoin et le deuxième solution adjuvanté pour chaque type de ciment, ces solutions consistent par un 0.1g de coulis de ciment avec 100ml de l'eau distillé qui injecté dans le zétasizer représenté sur les figure suivant.



Figure 48. Appaillage de mesure zétasizer

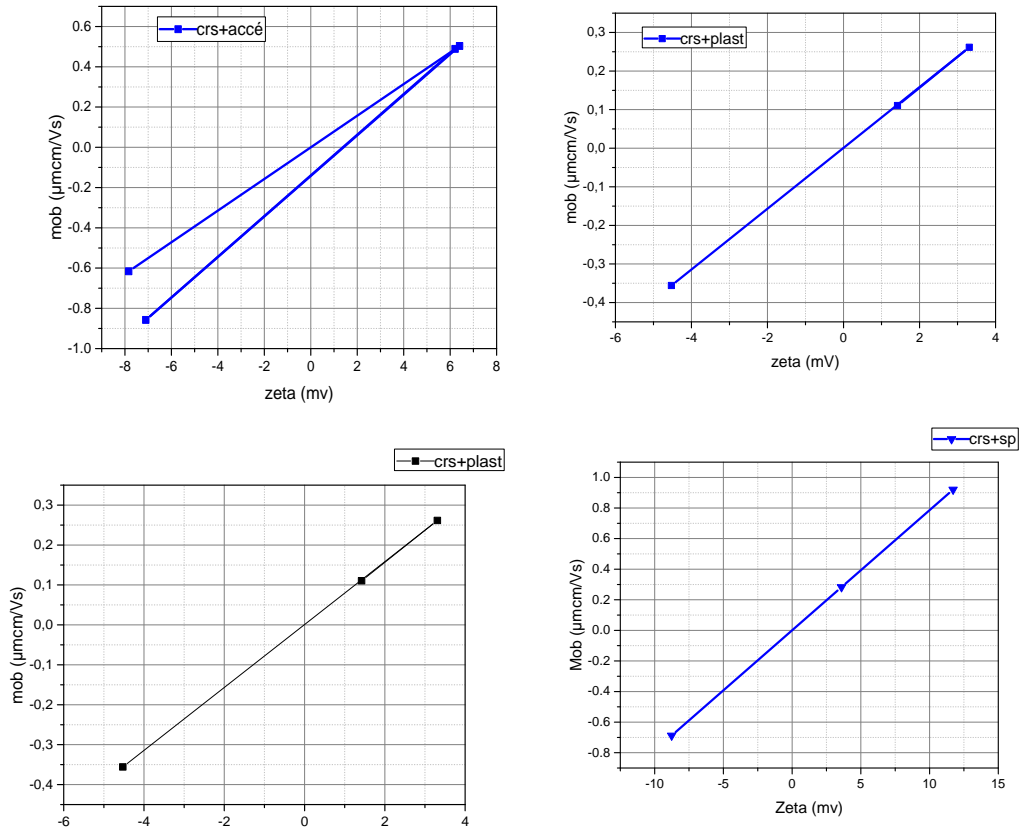
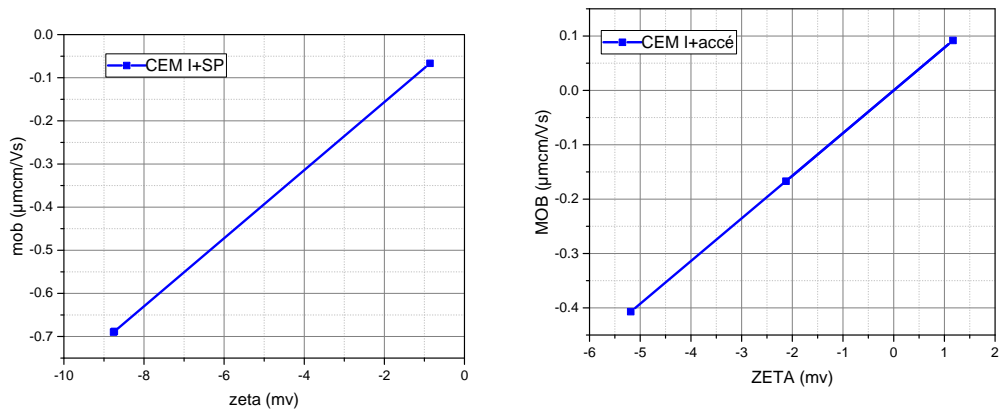


Figure 49.: variation du potentiel zeta en fonction du dosage des adjuvants.



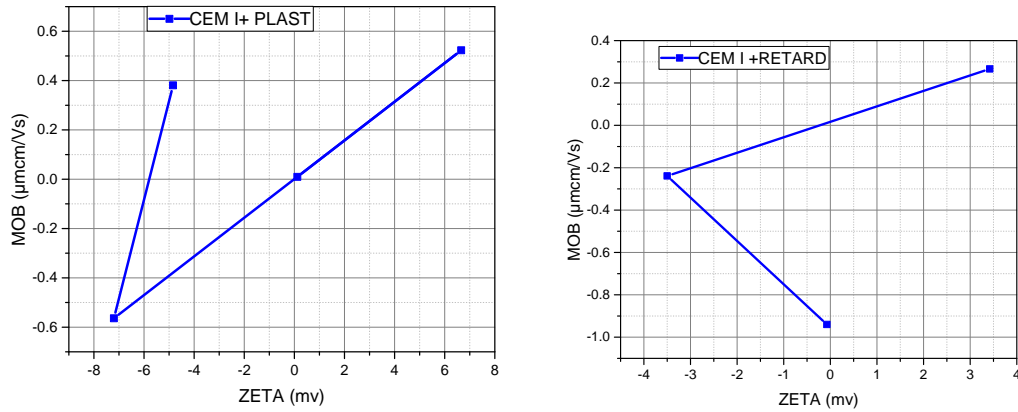


Figure 50.: variation de potentiel zêta en fonction de dosage des adjuvants

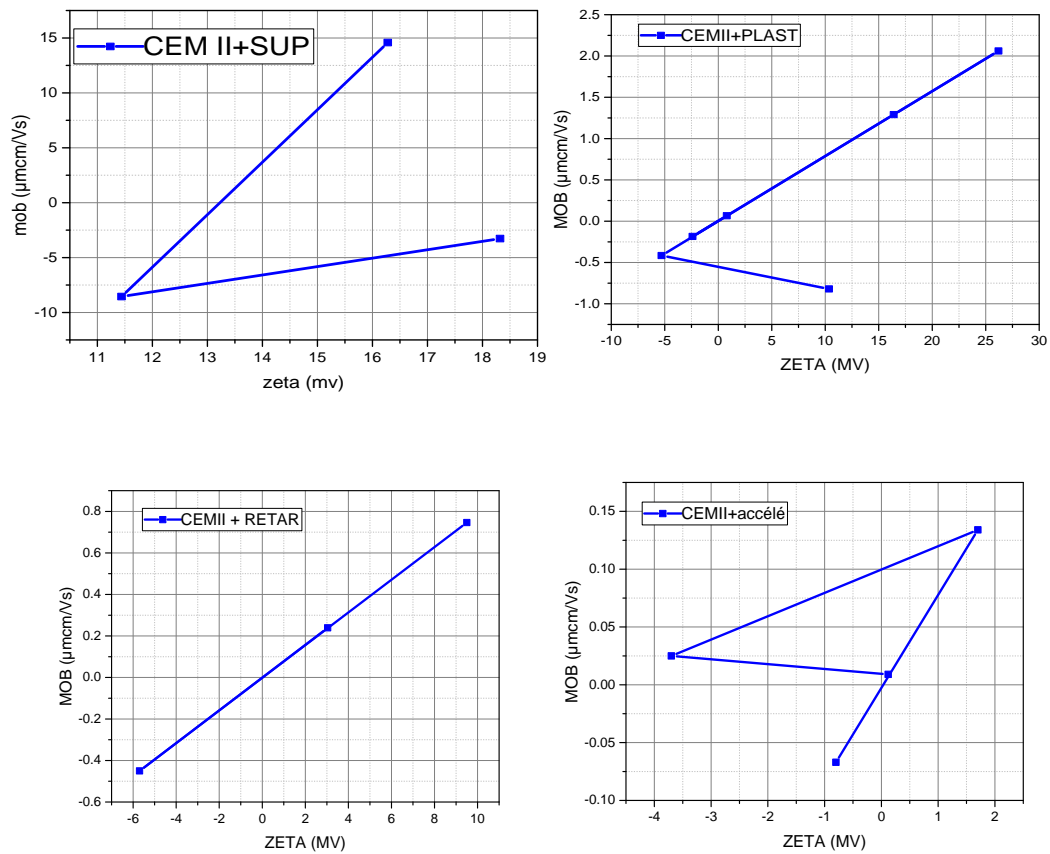


Figure 51.: variation de potentiel zêta en fonction de dosage des adjuvants.

#### IV.4. Contraction le chatelier

Le potentiel total de contraction des pâtes, due différentiel négatif entre le volume absolu des produits de l'hydratation et la somme des volumes d'eau anhydre réagissant. Dans notre travaille on a suivi la contraction le chatelier par la méthode dilatométrique, on a introduit le ciment dans un tube et remplir par de l'eau distillé et scellé avec un

bouchon enferment une pipette graduée, puis on ajoute une goutte de liquide de paraffine au-dessus de l'eau pour éviter l'évaporation de l'eau à température ambiante. La réduction d'eau correspond au changement de volume absolu dans l'échantillon. Les résultats de cet essai basé sur l'influence des adjuvants sur l'évolution de retrait chimique des coulis de ciment entre 24h à 7 jours représenté par figure suivant

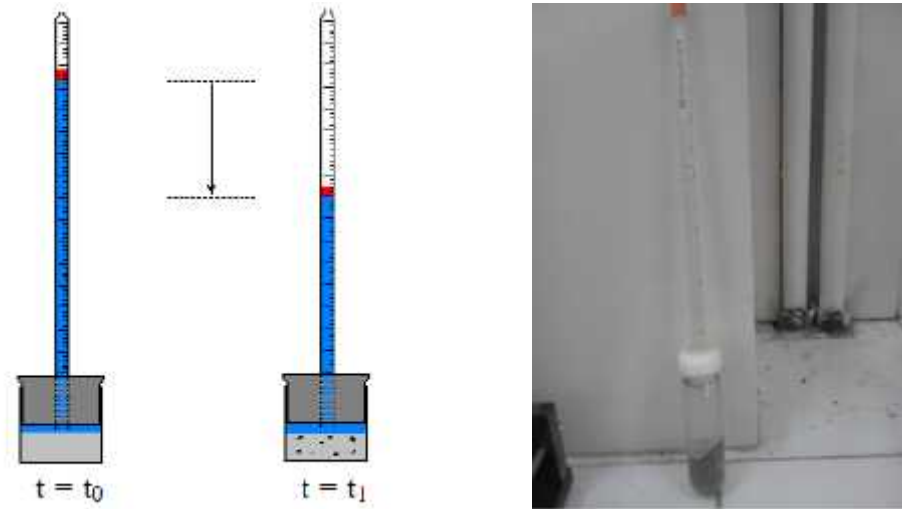


Figure 52.: : Mesure du retrait chimique par la méthode dilatométrique.

Tableau 8. Variation de retrait chimique.

Variation (ml)	initial	à 24h	à 7 jour
témoin	0	0,4	0,9
Ciment avec super plastifiant	0	0,7	1,2
Ciment avec plastifiants	0	1,1	1,6
Ciment avec retardateur	0	0,8	1,2
Ciment avec accélérateur	0	0,6	0,9

D'après les résultats obtenues on a observé que l'évolution de retrait chimique est élevé pendant 24h relié par le degré d'hydratation , on remarque que le retrait chimique des coulis du ciment adjuvanté de leur essai de contraction le chatelier se trouve plus contrairement à celles de la pâte de référence (témoin), aussi on remarque que le volume absolue de retrait chimique d'un coulis du ciment adjuvanté par le plastifiant diminue plus par rapport les autre des coulis adjuvanté par le superplastifiant et retardateur, peut être expliqué que le retrait chimique est un conséquence directe à l'hydratation du ciment qui continue jusqu'à la prise, la quantité d'eau qui déversement dans ces échantillon n'influencé pas sur le retrait chimique, donc le volume des hydrate inferieur volume des produit de hydratation.

## IV.5. Formulation de béton

### IV.5. 1. Caractérisation de matières premières utilisées

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

#### IV.5. 1.1. Sable

Les sables utilisés sont, le sable grossi de Bouzzegza et le sable fin de Boussaâda.

Une série d'analyses permet de déterminer les propriétés physiques et granulométriques des fractions de sable comme indique le tableau ci-dessous.

##### a. Sable de Bouzzegza

Tableau 9. Caractéristiques physiques

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparent	1.4	g/cm <sup>3</sup>
Masse volumique absolue	2.5	g/cm <sup>3</sup>
Teneur en eau	0.3	%
ESV	80	%
ESP	79	%

Tableau 10. Analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 15 860.

Tamis(mm)	Refus(g)	Refus%	Tamisat%	M <sub>f</sub>
6.3	0	0	100	4
4	105	10.5	89.5	
2	420	42.5	57.5	
1	700	70	30	
0.5	860	86	14	
0.25	945	94.5	5.5	
0.125	980	98	2	
0.063	990	99	1	

Masse d'échantillon : M=1000g

$$\text{Module de finesse : } M_f = \frac{\sum \text{refus sur tamis } 4,2,1,0.5,0.25,0.125}{100}$$

On remarque que le sable de Bouzzegza a un module de finesse élevé (4), d'où la nécessité d'ajouter un sable de correction.

**b. Sable de Boussaâda**

Tableau 11. Caractéristiques physiques

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparent	1.5	g /cm
Masse volumique absolue	2.5	g/cm
Teneur en eau	0.32	%
ESV	78	%
ESP	76	%
Absorption	0.9	%

**IV.6. 1.2. Gravier****a. Gravier 8/15 de SETIF**

Tableau 12. Caractéristiques physiques

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparente	1.15	g/cm
Masse volumique absolue	2.52	g/cm
Teneur en eau	0	%
Absorption	1	%

Tableau 13. Analyse granulométrique NF EN 15 860.

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus (%)	Tamisat (%)
16	800	13.33	86.67
12.5	2595	43.25	56.75
10	4065	67.75	32.25
8	5215	86.91	13.09
6.3	5800	96.66	3.34
4	5960	99.33	0.66

Masse de l'échantillon=6000g.

**b. Gravier 15/25 de SETIF**

Tableau 14. Caractéristiques physiques.

Caractéristique	Résultats	Unité
Masse volumique apparente	1.13	g/cm
Masse volumique absolue	2.63	g/cm
Teneur en eau	0	%
Absorption	0.5	%

Tableau 15. Analyse granulométrique NF EN 15 860.

Tamis (mm)	Refus(g)	Refus(%)	Tamisat(%)
31.5	0	0	0
25	230	2.5	97.5
20	3360	37.33	62.67
16	7400	82.22	17.78
12.5	8695	96.61	3.39

Masse de l'échantillon=9000g.

#### IV.5. 1. 3. Ciment

On a utilisé le ciment MATINE CPJ-CEM II /B 42.5 N (NA 442),

#### IV.5. 1.4. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage de béton et l'eau potable de la ville Eucalyptus.

#### IV.5. 2. Formulation et caractérisation du béton selon la méthode DREUX-GORISSE

L'objectif de cette méthode est de déterminer en fonction de maniabilité et la résistance définie par le cahier de charges, la nature et la quantité de matériaux nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton (eau E, sable S, gravillon g et gravier G en Kg/m<sup>3</sup>)  
Les étapes de formulation basées sur la résistance visée et l'affaissement au cône d'Abrams.

#### ❖ Résistance visée :

Par sécurité, la résistance visée doit être majorée de 15% par rapport à la résistance que l'on souhaite. Ainsi, la résistance visée doit être obtenue comme suit

$$f'_{28} = f_{28} + 0.15 f_{28}, \text{ soit : } f'_{28} = 1,15 f_{28}$$

La résistance désirée pour un béton témoin à 28 jours est :  $f_{28} = 35 \text{ MPa}$

La résistance visée est donnée par :  $f'_{28} = 1.15 f_{28}$ .

Soit :  $f'_{28} = 1.15 \cdot 35 = 40.25 \text{ MPa}$ .

#### ❖ Dosage en ciment et eau

La formule ci-dessous permet le calcul de la résistance à la compression visée, à 28 jours, Soit

$$f'_{28} = f_{28} \cdot G (C/E - 0.5)$$

$$\text{Avec : } C/E = [ f'_{28} / ( f_{28} \cdot G ) ] + 0.5$$

$f'_{28}$  = résistance visée à 28 jours.

$f_{28}$  = classe vraie de ciment en MPa.

G = coefficient granulaire.

C = dosage en ciment (Kg de ciment/m<sup>3</sup> de béton).

E = dosage en eau potable (Kg d'eau/m<sup>3</sup> de béton ou litre d'eau/m<sup>3</sup> de béton).

#### ❖ Coefficient granulaire G

G est un coefficient granulaire sans dimension dont la valeur est choisie dans le tableau suivant établi par **DREUX-GORISSE**.

Tableau 16. Coefficient granulat G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D<sub>max</sub>

Qualité des granulats	Dimension D <sub>max</sub> des granulats		
	Fins (D 12.5 mm)	Moyen (20 D <sub>max</sub> 31.5 mm)	Gros (D <sub>max</sub> 50 mm)
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Les granulats utilisés ont un diamètre entre 20mm et 31.5mm, ce qui donne un coefficient granulaire G = 0.50, avec une bonne qualité.

Donc le rapport C/E =  $[40.25 / (50 \times 0.5)] + 0.5 = 2.11$

#### ❖ Dosage en ciment par 1m<sup>3</sup> de béton et la quantité d'eau

Connaissant le rapport C/E et l'affaissement au cône d'Abrams souhaité A :

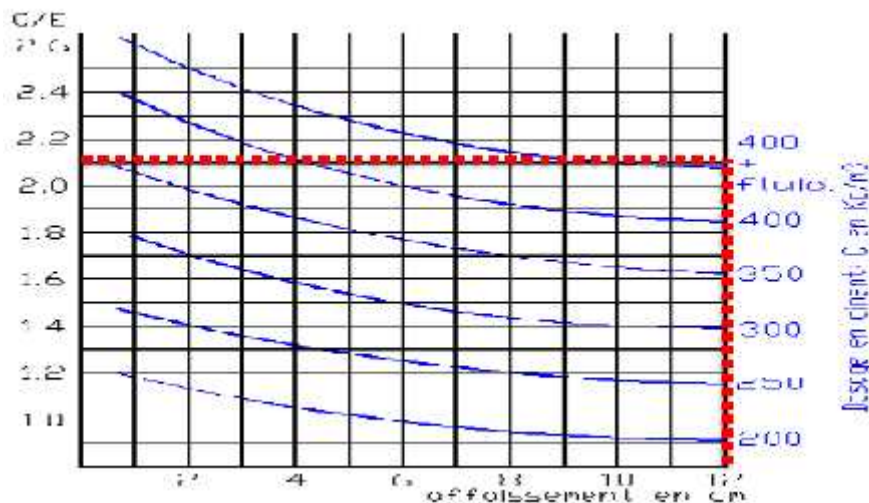


Figure 53: Abaque permettant la détermination de C<sub>opt</sub>.



$C/E = 2.11$   
 $A = 12$

} L'abaque donne la valeur du dosage en ciment 400Kg

$C/E = 2.11$   
 $C = 400$

} En déduit la valeur de E qui est :  $E = 189.6$  Kg

Nous avons calculé Les dosages des granulats à partir d'un logiciel, les résultats obtenus son motionné dans le tableau suivant.

Tableau 17. Composition de  $1\text{m}^3$  de béton

Compositions (Kg) de $1\text{m}^3$ de béton	
Ciment	400
Sable Boussaâda	268
Sable Bouzzegza	502
Gravier 8/15	550
Gravier 15/25	388
Eau	189.6

#### IV.6. 3. Dosages des adjuvants pour $1\text{m}^3$ :

$C = 400$  Kg

) Dosage de superplastifiant 1% :

$$A_{\text{sec}} = (400 \times 1) / 100 = 4 \text{ kg}$$

) Dosage de plastifiant 1%

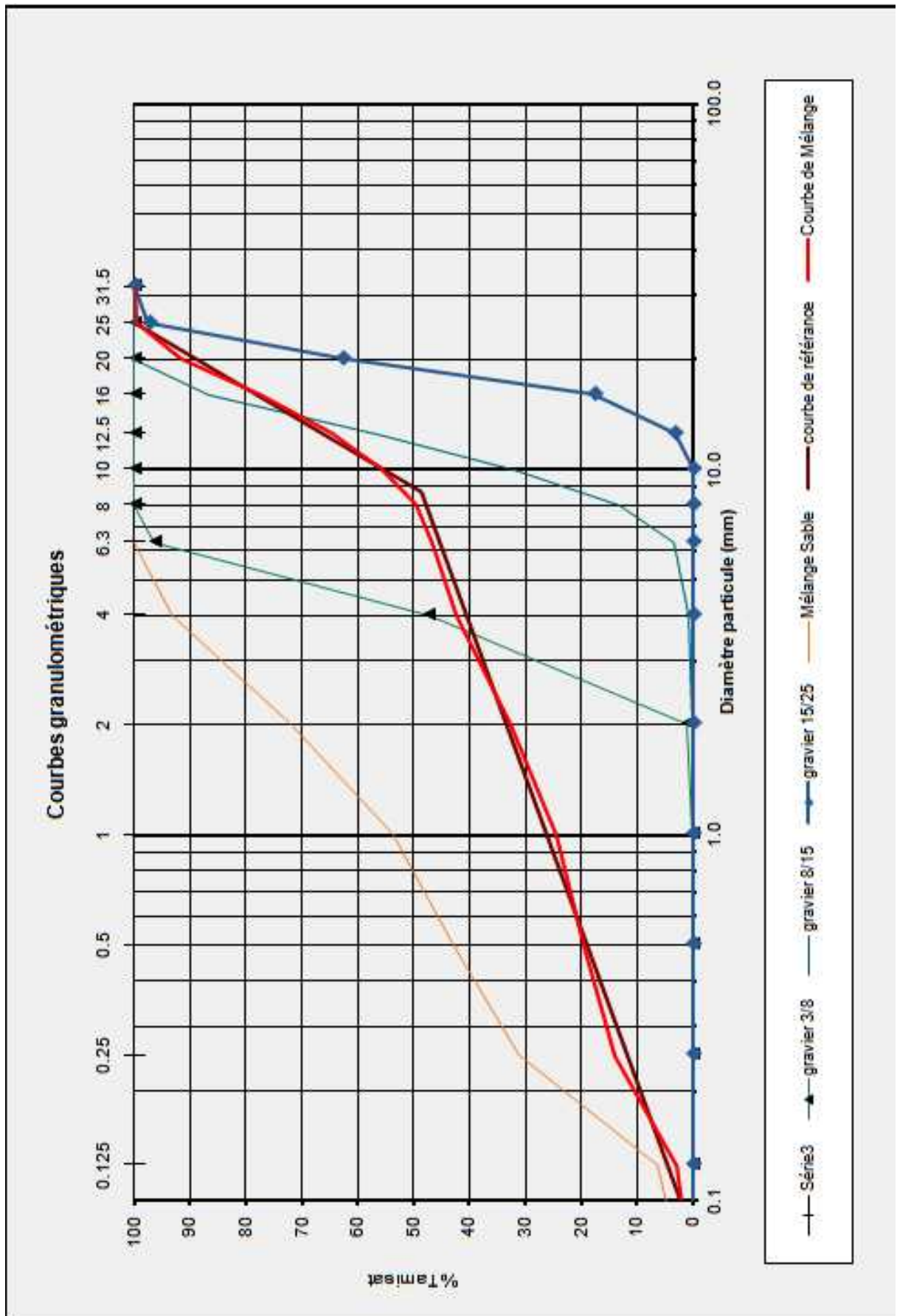
$$A_{\text{sec}} = (400 \times 1) / 100 = 4 \text{ kg}$$

) Dosage de retardateur de prise 0.3%

$$A_{\text{sec}} = (400 \times 0.3) / 100 = 1.2 \text{ kg}$$

) Dosage d'accélérateur de prise 0.3%

$$A_{\text{sec}} = (400 \times 0.3) / 100 = 1.2 \text{ kg}$$



## IV.6. Caractérisation du béton

### IV.6. 1. Caractérisation du béton à l'état frais

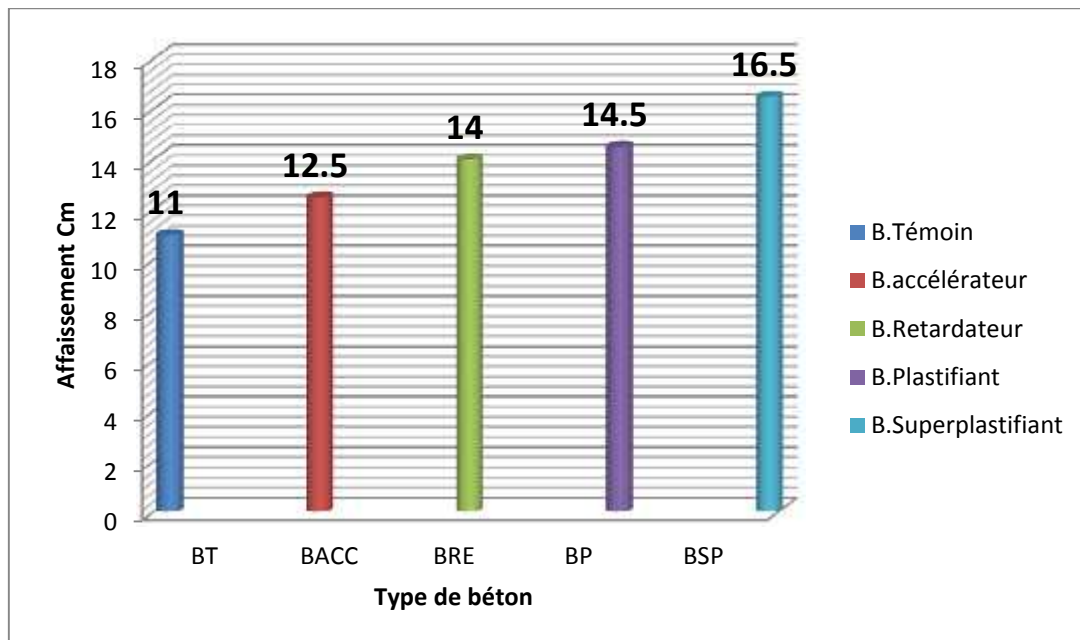
#### a. Affaissement au cône d'Abrams

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

Tableau 18. Rapport d'E/C et de l'affaissement

Type de béton	E/C	Affaissement
Béton témoin BT	0.47	11
Béton avec viscocretetompon544 BSP	0.47	16.5
Béton avec sikaplast BV 40+ BP	0.47	14.5
Béton avec plastiretard BRE	0.47	14
Béton avec plastocrète 160 BACC	0.47	12.5

Afin de mieux comprendre ce phénomène les résultats obtenus sont présenté sous forme d'histogramme dans la figure suivante :



**Figure 54:** Evolution de l'affaissement au cône d'Abrams des bétons en fonction de types d'adjuvants

D'après l'histogramme on constate que l'affaissement est plus important quand il s'agit d'un béton adjuvanté par des réducteurs d'eau qu'au béton adjuvanté par des modificateurs de prise et de durcissement.

Ces deux types d'adjuvants (réducteur d'eau et modificateur de prise) ont un effet positif sur l'augmentation de l'affaissement par rapport au béton non adjuvanté (témoin).

Pour les réducteurs d'eau :

On a utilisé deux types d'adjuvants :

- ) Un plastifiant réducteur d'eau.
- ) Un superplastifiant haut réducteur d'eau.

On a constaté que l'affaissement est plus important dans le cas d'un béton avec un superplastifiant qu'au béton avec un plastifiant ; ceci est due à la puissance de réduction des forces attractives d'interaction entre les particules de ciment, ainsi ces particules deviennent très négatives et n'ont plus tendances à s'agglomérer ce qui contribue à une grande mobilité des particules et l'eau libéré du système floculé devient disponible et lubrifie le béton ce qui fait croître sa maniabilité.

Pour les modificateurs de prise et du durcissement :

On a utilisé deux adjuvants :

- ) Un accélérateur de prise.
- ) Un retardateur de prise.

On constate que l'affaissement du béton est plus important avec un retardateur de prise qu'au béton avec un accélérateur de prise.

Cette amélioration de l'ouvrabilité est liée aux effets secondaires de plastiretard (retardateur de prise) qui a comme rôle de plastifiant réducteur d'eau selon la notion technique de ce produit qui mentionne un pouvoir dispersif des grains de ciment ainsi on a une meilleure défloculation ; il ya une modification électronique de la surface de ciment.

### b. Masse volumiques

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

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

M : la masse du béton.

V : le volume de l'éprouvette.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 19. Variation de la masse volumique à l'état frais de différents bétons

Type de béton	Résultats	Unités
Béton témoin	2438	Kg /m <sup>3</sup>
Béton avec plastiretard	2430	Kg /m <sup>3</sup>
Béton avec plastocrete 160	2434	Kg /m <sup>3</sup>
Béton avec viscocrete tempo 544	2419	Kg /m <sup>3</sup>
Béton avec BV 40 <sup>+</sup>	2422	Kg /m <sup>3</sup>

Les résultats notent des valeurs presque identiques de la masse volumique du béton témoin (non adjuvanté) à celles des bétons avec les différents types d'adjuvants (retardateur de prise, accélérateur de prise, plastifiant et superplastifiant).

On remarque aussi une légère diminution pour le béton avec des réducteurs d'eau (plastifiant et superplastifiant), cela est dû aux rôles de ses produits (défloculation des grains de ciment) ce qui engendre des aires occlus au sein de béton.

#### IV.6. 2. Caractérisation de béton à l'état durci

Afin de mieux comprendre l'influence des différents adjuvants sur les comportements mécaniques à l'état durci, on a procédé aux essais mécaniques suivants :

- ) Contrôle non destructif par ultrason.
- ) Evolution de la résistance à la flexion.
- ) Evolution de la résistance à la compression.

) La résistance à la fatigue.

#### IV.6. 2. 1. Contrôle non destructif par ultrason

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

Pour déterminer la vitesse longitudinale, on a utilisé l'appareil (TICO) Figure IV-14. L'appareil elle est munie de deux palpeurs de fréquence 54 kHz destinés pour le contrôle du béton. Cet appareil nous indique le temps (T) de propagation des ondes à travers l'éprouvette de longueur (L) et donne la vitesse de propagation (v) selon l'équation suivante :

$$V = \frac{S}{T} 10^6$$

V : vitesse de propagation.

S : distance entre les têtes en mètre.

T : temps en microseconde.

Cette méthode consiste à presser les deux têtes sur les faces de l'éprouvette nettoyées, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transmission du son.

Avant de commencer le contrôle de nos éprouvettes le TICO doit être étalonné avec l'étalon montré ci-dessus.



**Figure 55:**étalonnage de l'appareil ultrason(TICO).



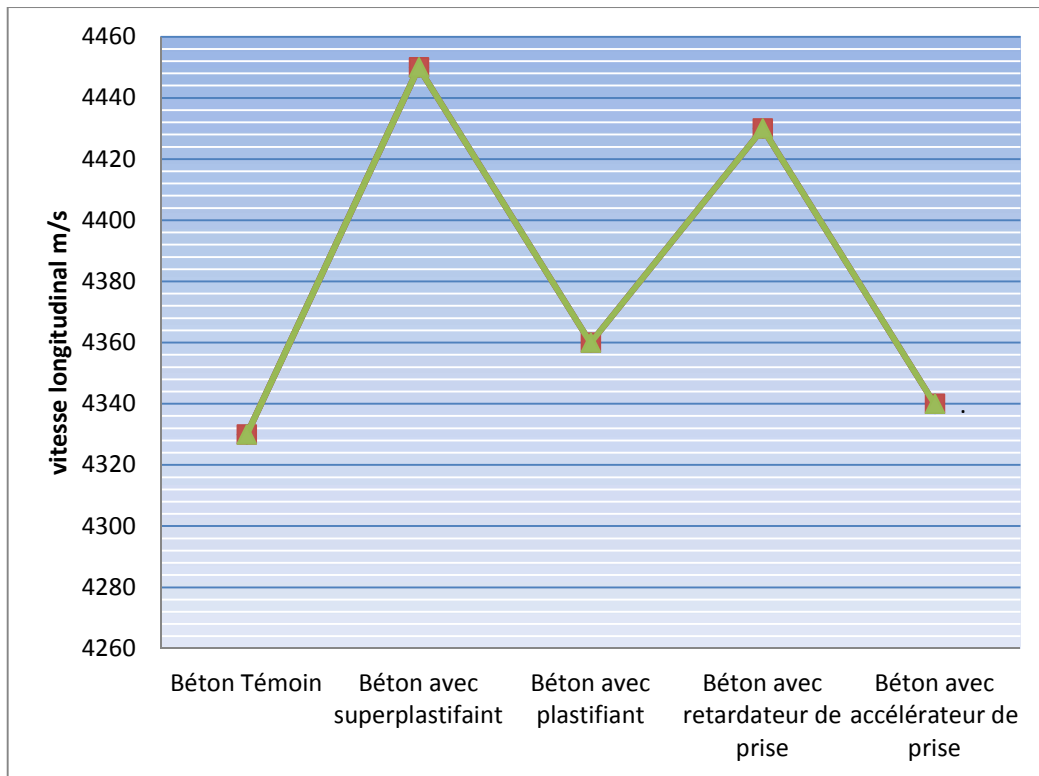
**Figure 56:** appareil d'ultrason (TICO).

**a. Essai de vitesse longitudinale**

Les résultats obtenus sont mentionnés sur le tableau suivant :

Tableau 20. Vitesse longitudinal de propagation de son

Type de béton	Résultats	Unités
Béton témoin	4330	m /s
Béton avec superplastifiant SIKAVISCOCRETE TEMPO 544	4450	m /s
Béton avec plastifiant SIKAPLAST BV 40 <sup>+</sup>	4360	m /s
Béton avec retardateur de prise PLASTIRETARD	4430	m /s
Béton avec accélérateur de prise SIKA PLASTOCRET 160	4340	m /s



**Figure 57:** Evolution de la vitesse longitudinale en fonction des types d'adjuvants.

#### ➤ Interprétation

La vitesse de propagation longitudinale est supérieure à 3660 m/s pour toutes les éprouvettes avec les différents types d'adjuvants, ce qui confirme que le béton est de bonne qualité c à d ; le béton est bien compacté et n'engendre pas de ségrégation à l'intérieur, cette dernière influe négativement sur la vitesse de propagation longitudinale et la qualité du béton.

On note que la vitesse de propagation longitudinale est maximale avec le béton adjuvanté par superplastifiant suivent par ordre décroissant :

- ) Béton avec retardateur de prise
- ) Béton avec un plastifiant
- ) Béton avec un accélérateur de prise
- ) Béton témoin

Selon la vitesse du son dans les bétons élaborés on a pu classer les bétons de bonne qualité.



### IV.6. 2. 2. Résistance à la flexion

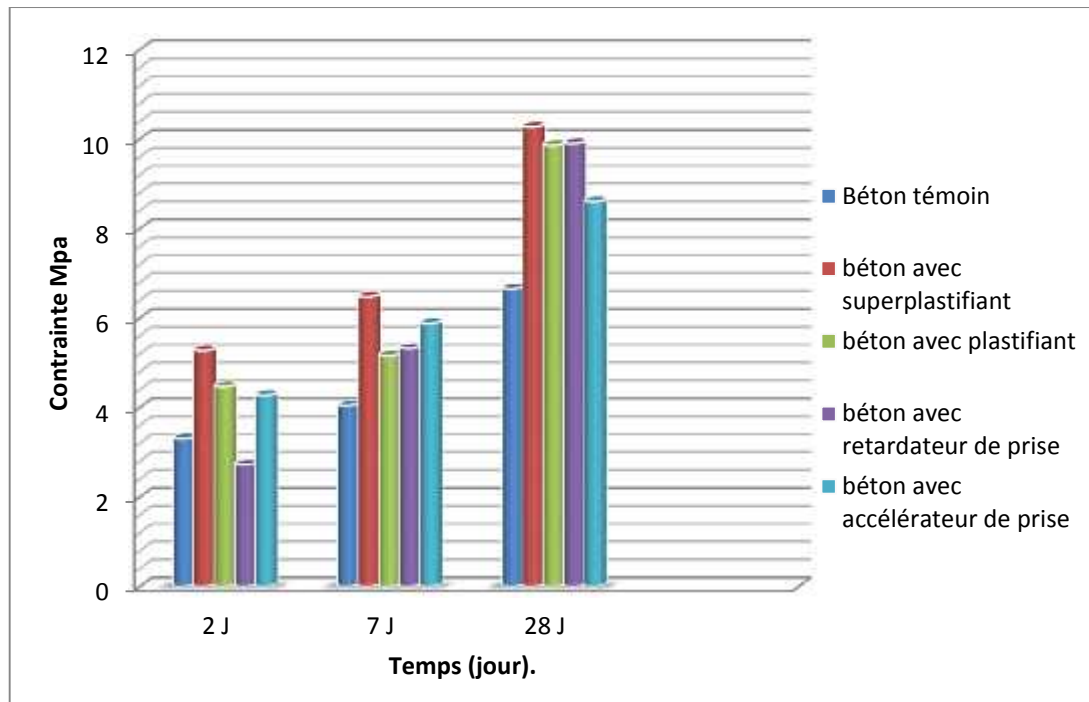
Les essais de flexion sont effectués sur des éprouvettes prismatiques  $7 \times 7 \times 28$  cm selon la norme NF EN 12390-5 sur la machine TONY TECHNIQUE 100KN pilotée par un ordinateur.



**Figure 58:** Essai de traction par flexion

Tableau 21. Résultats de l'essai de traction par flexion

Type de béton	Résistance à la flexion (Mpa)		
	2jours	7jours	28 jours
Béton témoin	3.3	4.04	6.65
Béton avec superplastifiant	5.27	6.48	10.27
Béton avec plastifiant	4.47	5.16	9.86
Béton avec retardateur de prise	2.72	5.32	9.9
Béton avec accélérateur de prise	4.27	5.88	8.6



**Figure 59:** Evolution des résistances mécaniques à la flexion en fonction d'âge.

### ➤ **Interprétation**

A 2 jours le béton à base d'adjuvant retardateur de prise présente des résistances à la flexion plus faible qu'aux autres bétons avec d'autres d'adjuvants, le béton avec un super plastifiant a donné le meilleur résultat.

Ces résultats confirment la sensibilité des grains de ciment vis-à-vis l'action et le rôle de chaque adjuvant et son influence sur le comportement mécanique du béton.

Le ciment joue le rôle d'une matrice qui assure la liaison entre les agrégats.

A 7 jours on remarque une augmentation de la résistance à la flexion du béton avec un retardateur de prise comparativement au béton témoin, ainsi qu'aux bétons avec un plastifiant, cette augmentation est traduite par la durée limite de l'effet retard de cet adjuvant, et son second rôle de plastifiant qui assure la dispersion des grains de ciment ce qui influe positivement sur l'augmentation de la résistance à la flexion.

On note que la résistance à la flexion est maximale dans le cas d'un béton avec un superplastifiant suivent par ordre décroissant : accélérateur de prise, retardateur de prise, plastifiant et le béton témoin.

La durée de vie limite de l'effet retard confirme les faibles résultats obtenus à jeune âge.

L'évolution des résistances à la flexion n'est pas continue jusqu'à l'âge de 28 jours, on note une augmentation de la résistance à la flexion des bétons avec plastifiant et retardateur de prise par rapport au accélérateur de prise.

#### IV.6. 2. 3. Résistance à la compression

Les essais de compression sont effectués sur bâti de compression de type TONI TECHNIQUE pilotée par un ordinateur équipé du logiciel test expert, doté d'un capteur de force de 3000KN. Celle-ci est reliée à une machine d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané de la force et du déplacement. La vitesse de l'essai est de 10 mm /min.

L'essai de compression est effectué sur des demi-prismes  $7 \times 7 \times 28$ .



Figure 60: Essai de compression

Tableau 22. Résultats d'essais de compression

Type de béton	Résistance à la compression		
	2 jours	7 jours	28 jours
Béton témoin	22.4	32.73	40.55
Béton avec superplastifiant	30	44.19	55.02
Béton avec plastifiant	25.96	40.04	45.85
Béton avec accélérateur de prise	24.55	40.45	42.90
Béton avec retardateur de prise	13.5	40.37	49.5

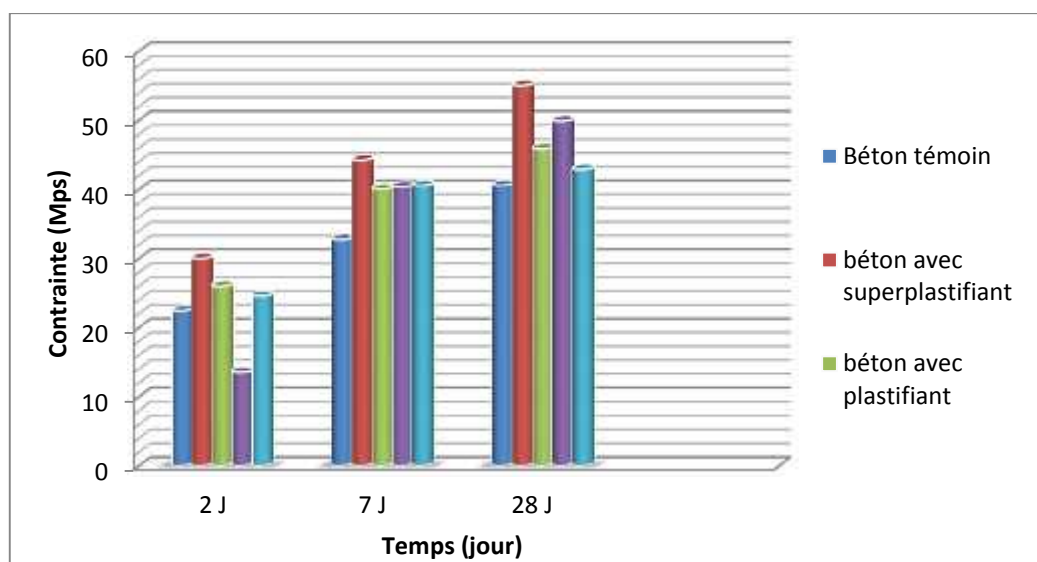


Figure 61: Evolution des résistances mécaniques à la compression en fonction d'âge.

### ➤ Interprétation

On remarque que l'évolution des résistances à la compression des éprouvettes avec les différents types d'adjuvants est identique à celle de la résistance à la flexion, ce qui confirme le rôle de chaque adjuvant est son influence sur les propriétés mécaniques du béton à l'état durci.

#### IV.6. 2. 4. Comparaison entre le contrôle destructif et non destructif

Pour voir les limites de contrôle non destructif vis-à-vis le type de béton, ce stade consiste à faire une comparaison entre les résultats obtenus par les essais de compression et celles obtenues indirectement par ultrason.

La résistance à la compression peut être calculée à travers la vitesse des ondes ultrasonore en appliquant plusieurs lois expérimentales, les lois exponentielles sont très souvent utilisées.

La résistance à la compression selon la loi exponentielle est :

$$RC = a e^{(bv)}$$

Où « a » et « b » sont deux paramètres expérimentaux variés d'un auteur à l'autre, le tableau suivant présente les résultats obtenus en fonction des paramètres « a » et « b ».

Tableau 23. Valeur de la résistance en fonction de « a » et « b ».

Valeur « a »	Valeur « b »	Témoïn	Béton +super plastifiant	Béton + plastifiant	Béton + accélérateur	Béton + retardateur
0,001200	0.00227	22.28	29.25	23.85	27.96	22.79
0,014100	0.00170	22.188	27.20	23.35	26.30	22.56
0,060000	0.00144	<b>30.628</b>	36.40	<b>31.98</b>	<b>35.34</b>	31.07
2,901000	0.00060	38.988	41.89	<b>39.69</b>	41.39	<b>39.21</b>
0,031600	0.00130	8.80	10.28	9.15	10.02	8.91
0,158330	0.00140	67.96	80.39	70.87	78.17	68.92
0,001200	0.00227	22.28	29.25	23.85	27.96	22.79
*0,11370	1.33770	37.26	<b>43.75</b>	<b>38.80</b>	42.60	<b>37.77</b>
*0,429600	0.96890	<b>28.51</b>	32.03	29.36	<b>31.42</b>	28.80
*0,06940	1.35470	24.48	28.80	25.50	28.03	24.82
Valeur expérimentale		<b>32.18</b>	<b>47.63</b>	<b>36.39</b>	<b>34.04</b>	<b>42.86</b>

\* : valeurs de vitesse en Km/s.

Selon les références bibliographiques pour que le modèle soit agréé, la bifurcation de la valeur expérimentale ne doit dépasser 5 MPa.

Le déplacement des ondes ultrason à travers le béton est influencé par plusieurs paramètres étudiés largement dans les littérateurs qui principalement liés par les dimensions, distribution, origine et étendue granulaire des agrégats, ainsi le rapport E/C.

Dans notre travail, ces paramètres sont uniques pour tous les bétons formulés, la seule modification est l'utilisation des adjuvants, par contre, dans la comparaison avec les résultats expérimentaux on constate que les paramètres « a » et « b » ne sont pas stables

pour tous les types. Puisque ces paramètres sont liés directement par l'atténuation du béton on peut dire que ces produits qui ont un rôle chimique influent certes, sur l'homogénéité et distribution de squelette solide, et par suite sur les propriétés mécaniques de béton.

#### IV.6. 2. 5. Essai de résistance à la fatigue par flexion

L'essai dynamique consiste à appliquer des sollicitations vibratoires à haute fréquence jusqu'à la rupture avec une amplitude de 10% de la force statique, sur le béton avec les différents types d'adjuvants, L'objectif de cette partie est d'appliquer des sollicitations vibratoires avec différents niveaux allant de 40 à 80 % pour obtenir les nombres de cycle pour chaque sollicitation.

##### IV.6. 2. 5. 1. Appareil d'essai dynamique et de fatigue 5 - 550 KN | Vibrophore

Le VIBROPHORE est une machine électromécanique pour l'essai de fatigue à haute fréquence (30-300 Hz), des matériaux ou des composants par l'application des charges sinusoïdales alternatives en utilisant le principe de résonance avec une amplitude variable et charge moyenne, ce qui permet l'obtention de courbe S/n, tout en économisant l'énergie.

Parmi les avantages de cette technique, on cite :

- ) Sortie élevée de l'échantillon due aux fréquences élevées et temps court d'essai.
- ) Consommation d'énergie extrêmement basse due à la résonance conduisant (2% du coût de même essai sur la machine servo-hydraulique).
- ) Installation simple, aucun paquet de puissance additionnel nécessaire (par exemple l'hydraulique, l'eau de refroidissement).
- ) Système pratiquement exempt d'entretien par le manque de pièces de port.
- ) Mesure de force de précision par le calibrage.
- ) Précision d'essai élevée par la commande adaptative.
- ) Commande moyenne rapide et précise de charge par la commande servo.

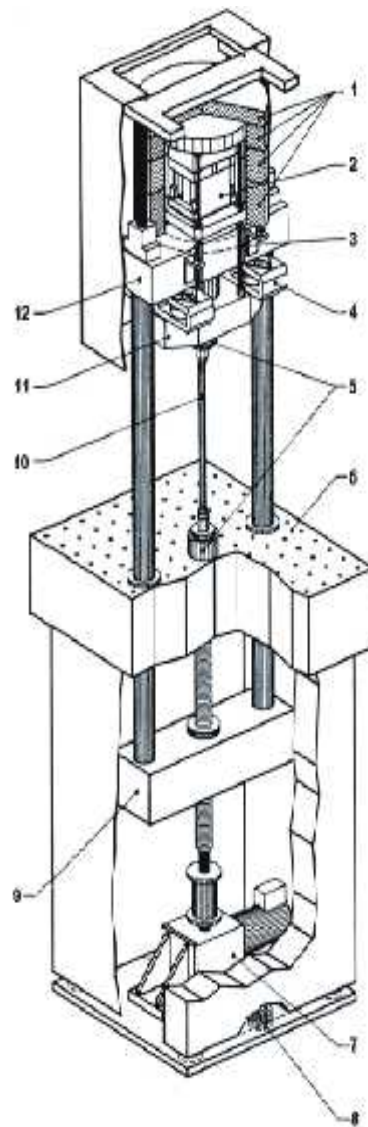
Les caractéristiques techniques du vibrophore utilisées sont citées sur le tableau suivant

Tableau 24. Caractéristiques techniques de vibrophore

Vibrophore HFP 150	
$F_{\max}$	$\pm 150\text{kN}$
Amplitude max	$\pm 75\text{kN}$
Range de fréquence	30-300 Hz

**Constituants de VIBROPHORE** : est constitué de plusieurs pièces qui sont les suivantes :

1. la masse d'excitation variable
2. Système magnétique d'excitations
3. Ressorts de raccordement
4. Ressorts de charge initiale
5. Fournies de cellules
6. Table de trachines
7. Commande statique
8. Ressort anti vibration
9. Plateau inférieur
10. Éprouvette
11. Plateau d'oscillation
12. Plateau supérieur



**Figure 62:** La machine VIBROPHORE.



**Figure 63:** Essai de fatigue par flexion.

#### **IV.6. 2. 5. 2. Protocole d'essai de la fatigue**

Le Protocole d'essai consiste à appliquer des niveaux de sollicitations de 80, 70, 60,50 et 40% de la résistance en flexion avec une amplitude de 10% jusqu'à la rupture. Le logiciel de pilotage testXpet 12.1 permet de donner les différents paramètres de l'essai de fatigue : fréquence de résonance et ses variations, variation des charges statiques et dynamiques, rapport « r » et nombre de cycles.

Au début de l'essai de fatigue la machine applique un balayage de fréquence jusqu'à l'obtention de fréquence de résonance ; dans ce cas, le déphasage entre le système masse-ressort et l'éprouvette, est nul.

La figure montre des illustrations des paramètres de variation de fréquence, force statique et force dynamique au cours de l'essai.

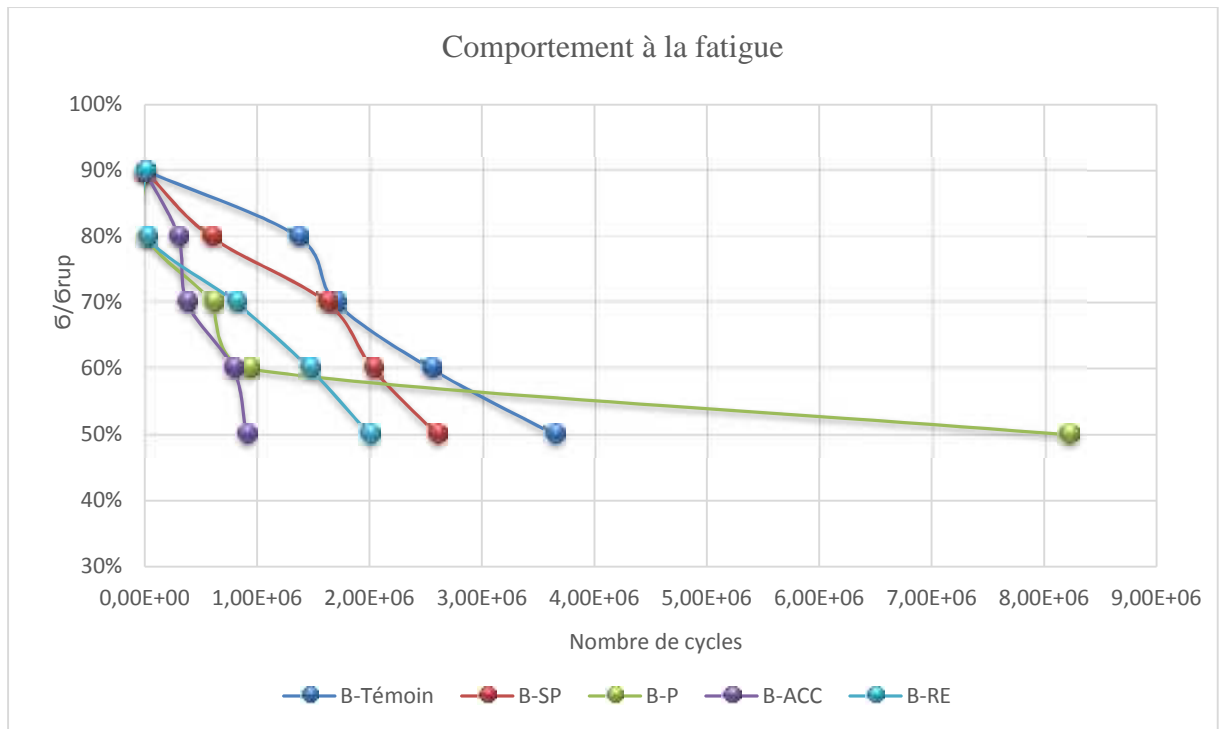
Le tableau donne en détail le protocole d'essai et les résultats obtenus



Tableau 25. Protocole d'essai de fatigue pour les différents bétons .

Type de béton	Niveau de sollicitation	Nombre des cycles	F stat (N)	F dyn (N)	Fréquence en (Hz)	Remarque
Béton témoin	40%	3646894	2898.6	724.6	97	rupture
	50%	2546757	3623.3	724.6	91	rupture
	60%	1699835	4347.9	724.6	93	rupture
	70%	1360771	5072.6	724.6	92	rupture
	80%	5462	5797.3	724.6	96	rupture
Béton avec superplastifiant	40%	2598566	4109.3	1027.3	92	Sans rupture
	50%	2029459	5136.6	1027.3	97	rupture
	60%	1622495	6100.9	1027.3	103	rupture
	70%	588592	7191.3	1027.3	97	rupture
	80%	0	8218.1	1027.3	0	rupture
Béton avec plastifiant	40%	8216403	3874	968.5	90	rupture
	50%	926944	4842	968.5	91	rupture
	60%	602906	5811	968.5	97	rupture
	70%	12647	6779.5	968.5	94	rupture
	80%	0	7748	968.5	0	rupture
Béton avec accélérateur de prise	40%	903000	3632	908	76	rupture
	50%	787509	4540	908	91	rupture
	60%	375000	5448	908	91	rupture
	70%	297577	6356	908	97	rupture
	80%	0	7264	908	0	rupture
Béton avec retardateur de prise	40%	2003420	3578.6	894.6	85	rupture
	50%	1468328	4473.3	894.6	85	rupture
	60%	811604	5367.9	894.6	95	rupture
	70%	19588	6262.6	894.6	94	rupture
	80%	0	7157.3	894.6	0	rupture

Les résultats obtenus sont présentés graphiquement comme suite :



**Figure 64:**Comportement à la fatigue par flexion.

Le protocole d'essai consiste à appliquer des différents niveaux de charge par rapport à la force ultime de flexion, sachant que cette valeur varie d'un type à l'autre, mais en générale, l'amélioration est marquée sur tous les bétons adjuventé, de ce faite, un niveau de sollicitation de 90% pour le béton avec superplastifiant est supérieur de la résistance à la flexion de béton témoin, par rapport au comportement à la fatigue de ce dernier on constate les remarques suivantes : Tous les bétons adjuventés présentent un nombre de cycle inférieur à celle de béton témoins pour niveau de charge (à l'exception de niveau 50% pour le béton avec plastifiant) ; Le béton avec accélérateur de prise présente des nombre de cycle très faible par rapport aux autres au-delà de 70%. Le béton avec retardateur de prise présent une évolution presque linéaire ce qui permet de trouver une relation linéaire liée entre le nombre de cycle et le niveau de sollicitation.

## V. Conclusion et recommandation

### Conclusion générale

Ce travail a été réalisé au niveau de laboratoire de la société SIKA et l'unité de recherche URMPE de l'université de bouverdes. IL s'intéresse à l'étude de l'influence des adjuvants qui sont très souvent utilisés pour améliorer les performances mécaniques du béton.

Le béton est formulé selon les modalités de DREUX-GORISSE, afin de clarifier l'effet des adjuvants, nous avons fixé les paramètres des granulats, rapport E/C (0.47).

Pour chaque type de béton, nous avons confectionné 21 éprouvette prismatique, des séries d'essais à l'état frais et à l'état durci sont effectuées et nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- ) Les adjuvants utilisés de prévenance Sika n'ont pas d'influence sur la masse volumique du béton.
- ) Ces adjuvants augmentent l'affaissement au cône d'Abrams, cette amélioration est un effet secondaire pour les retardateurs et accélérateurs de prise.
- ) A l'état durci, les produits utilisés améliorent la résistance mécanique à la compression et à la flexion, ce qui montre l'amélioration et la fonction de la matrice cimentaire qui assure le transfert des efforts vers l'ossature granulaire.
- ) Le retardateur de prise a un effet à court terme, ce qui donne une résistance faible à jeune âge, par son pouvoir dispersion.
- ) La vitesse des ultrasons montre que ce béton est de bonne qualité et confirme l'amélioration fournie par les adjuvants.
- ) Les paramètres pour calculer la résistance mécanique par la loi exponentielle ne sont pas stables d'un passage de type de béton à l'autre.
- ) Puisque les paramètres de formulation sont fixes, cette instabilité montre une modification de la matrice causée par action des adjuvants utilisés, se qui influe sur l'atténuation du béton.
- ) En ce qui concerne le comportement dynamique par flexion, le retardateur de prise donne une conséquence linéaire liée entre le nombre de cycles et le niveau de charge.
- ) Les valeurs de l'amplitude et le niveau de charge des bétons adjuvantés qui sont supérieurs à celle du témoin influent négativement sur le nombre de cycles.

### **Recommandation**

Les spécialistes en béton considèrent que l'effet des adjuvants est un effet chimique, qui permet d'améliorer les propriétés physico-chimiques du béton à l'état frais. Cette étude permet de mettre en évidence que ces produits influent sur le comportement statique et dynamique du béton, et même les paramètres de compressibilité qui sont directement liés par la décélération des ondes ultrasonores à travers le béton, ces résultats nécessitent une continuité de l'étude afin de voir l'effet des adjuvants sur la structure hydratée du ciment.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] **les adjuvants** : définitions et opportunités d'utilisation, organisée par : erce – ctc-est – granitex ,2004.
- [2] **EL-BACHIR Yasmina** : « Effet des différents adjuvants sur la performance du béton », », mémoire de master de l'université Mohamed Boudiaf, Oran, 2014.
- [3] **AMOURI Chahinez** : « contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (caractérisation, performances, durabilité), thèse doctorat de l'université mentouri Constantine, 2009.
- [4] **HAIFI MOHAMED REDHA**, « formulation des bétons autoplaçants » mémoire de magister de l'université mentouri Constantine, 2011.
- [5] **François PERCHE**, « adsorption de polycarboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciments », thèse doctorat de l'université de Rouen, France, THÈSE NO 3041, 2004
- [6] **Hanane BAHRI**, « étude des traitements de surface des nano poudres de verre milieux cimentaires », mémoire de master de l'université Sherbrooke, Canada, 2015.
- [7] **Edwige Nicolas** : « compatibilités et incompatibilités liants cimentaires/superplastifiants », thèse doctorat docteur de l'université Henri Poincaré, juin 2010.
- [8] **Alexandre Pierre** : « Rhéologie de suspensions concentrées de sulfate de calcium », thèse doctorat de l'université Bretagne, 2013.
- [9] **Y. BENNA** : les adjuvants pour bétons, formulation, mise en œuvre et contrôle des bétons.
- [10] **synad**
- [11] **LAKHDARI Selma** : « effets des adjuvants fluidifiants sur les caractéristiques physico-mécaniques et rhéologiques des mortiers a base des sables des carrières », mémoire de master de l'université Mohamed Khider – Biskra, 2015.
- [12] **Fatima-Zohra DAKHMOUCHE CHABIL** : « Carbonatation de bétons adjuvantes à base de ressources locales algériennes », thèse doctorat de l'université d'Orléans et de l'Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [13] **BENKECHKACHE GHOFRANE** : « contribution a l'étude des mécanismes lies au retrait et fluage (déformations différées) des bétons », thèse doctorat de l'université mentouri Constantine, 2012.
- [14] **DJELIL Mohammed** : « étude bibliographique et numérique des phénomènes de transport dans le béton », mémoire de magister de l'université BEKR BELKAID – TLEMCEN, 2012.
- [15] **MONSEF BOURISSAI** : « Comportement thermo-chimio-hydro-mécanique d'un ciment pétrolier au très jeune âge en conditions de prise HP/HT. Approche expérimentale et analyse par changement d'échelle », thèse doctorat de l'université PARIS-EST, 2010.

[16] **TOUZOUTI KAMILA** : « introduction aux nano ciments et nano béton », mémoire de magister de l'université MOULOUD MAMERI DE TIZI – OUZOU.

[17] **Jean-Philippe Gagnon** « influence d'un super plastifiant sur l'énergie d'activation lors de l'hydratation d'un coulis de ciment », mémoire de magister de l'université Sherbrooke, Québec, Canada, mai 1996.

[18] **Yanrong Zhang , Xiangming Kong** : les corrélations de la capacité de dispersion de la NSF et PCE types de super plastifiant et leurs impacts sur l'hydratation du ciment avec l'adsorption dans les pâtes de ciment frais , and Concrete Research, Volume 69 , Mars 2015, Pages 19.

[19] **Sylvie Pourchet, Cedric Comparet, A. Nonat, Philippe Maitresse** : influence of three types of superplasticizers on tricalciumaluminate hydration in presence of gypsum,

[20] **Didouche Zahia, Ezziane Karim, Merzoug Fatiha, Setti Fatima** : cinétique d'hydratation d'un ciment en presence des adjuvants, Laboratoire Géomatériaux, Université Hassiba Benbouali CHLEF, Algérie.

[21] **SAMIRA LAOUR** « compatibilité ciment –super plastifiant dans les bétons » mémoire de magister, 2012.

[22] **MOUSSA BAALBAKI** « influence des interactions du couple ciment /adjuvant dispersant sur les propriétés des bétons » thèse doctorat de l'université Sherbrooke, Canada, 1998.

[23] **MARWEN BOUASKER** « étude numérique et expérimentale du retrait endogène au très jeune âge des pâtes de ciment avec et sans inclusion », thèse doctorat de l'université Nantes, N° 0367306, 2007.

[24] **Gilles PLUSQUELLEC** : « analyse in situ de suspensions de silicate de calcium hydraté : application aux interactions ioniques à la surface des particules », thèse de doctorat de l'université de bourgogne, 2014.

[25] **Hélène VIALIS-TERRISSE** : « interaction des silicates de calcium hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins Analogie avec les argiles », thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne, 2000.

[26] **pierre henocq** « modélisation des interactions ioniques à la surface des silicates de calcium hydratés », thèse doctorat, de l'université Laval ,2005.

[27] **mallorie tourbin** : « caractérisation et comportement de suspensions concentrées de nanoparticules sous écoulement : application aux processus d'agrégation et de rupture », thèse de doctorat, École doctorale : Transferts, Dynamique des Fluides, Énergétique et Procédés, N° d'ordre : 2434,2006.

[28] **ALI MARDANI AGHABAGLOU** : « Effet de différents types de super plastifiant sur, les propriétés rhéologiques et frais résistance du béton auto plaçant », Construction et matériaux de construction, volume 47, Octobre 2013, Pages 1020-1025.

[29] **SAFAA MA EL GAMAL, FAWZIA M. AL NOWAISER, ASMAA O. AL Baity** : « Effet de superplastifiants sur la cinétique d'hydratation et les propriétés mécaniques des pâtes de ciment Portland », Journal de la Recherche avancée, volume 3, numéro 2, Avril 2012, Pages 119-124.

[30] **E. Tkaczewska** : « Effet du type super plastifiant sur les propriétés du ciment de cendres volantes mélangées », Construction and Building Materials volum70, 2014, Pages 388–393

[31] **JEAN BAPTISTE CHAMPENOIS** « Influence de borate de sodium sur l'hydratation au début de l'âge du ciment de calcium », Cement and Concrete Research, volume 70, Avril 2015, Pages 83-93.

[32] **ANETA NOWAKMICHTA** : « Influence de Superplastifiant sur les structures de la porosité dans le Béton durci », Volume 108, 2015, Pages 262-269.

[33] **J. Plank, E. Sakai b, Miao CW c, C. Yu d, e, JX Hong** : « Chimie des adjuvants chimiques, ces applications et leur impact sur la microstructure et la durabilité du béton », Cement and Concrete Research, Volume 78, partie A, Décembre 2015, Pages 81-99.

[34] **El bieta Janowska Renkas** : « L'influence de la structure chimique de poly carboxyliques super plastifiants sur leur efficacité dans des pâtes de ciment », Volume 108, 2015, Pages 575-83.