

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de **Master**

Filière : Génie des Matériaux

Option : Contrôle de Qualité des matériaux

THEME

**EFFET DU MODE D'INCORPORATION DES FILLERS CALCAIRES
SUR LES PROPRIETES DES BETONS**

**Réalisé par
MALDJI Sid Ali**

**Encadré par
Pr CHAID Rabah**

Remerciements

.Je tiens tout d'abord à remercier dieu le tout puissant et miséricordieux qui m'a donné la force, la volonté et le courage pour achever ce travail.

*Je tiens à remercier mon directeur de recherches, Professeur **CHAID RABAH**, pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.*

Je tiens aussi à remercier monsieur CHEREF ADIL, chef département l'laboratoire de l'Entreprise National des Grandes Ouvrages d'Arts et tout son équipe : BELKADI MORAD, AROUSS MOHAMED, BAHRI et NABIL qui m'accueilli dans son laboratoire et qui m'a donné l'opportunité d'effectuer ce travail, de ses conseil scientifiques, sa grande disponibilité, ses encouragement et de la confiance qu'il m'a accordée.

Je remercier aussi mes enseignants du département génie des matériaux.

Afin de n'oublier personne, mes vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont aidée à la réalisation de ce modeste mémoire

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

Mes chers parents :

*Ma très chère mère qui m'encourage et soutenu pendant mes études
depuis mon enfance*

*Mon chère père qui a tout fait pour m'aider dans mes études
A tous mes sœurs*

Je dédie ce travail aussi :

A mes amis:

Walid LADJ ; Abdeslam BERRABEH ; hamza AIT TAFATI ;

Ismail ; Hamza

*Enfin pour Tous les gens qui m'estiment espérant bien que je n'ai
oublié Personne dans cette courte page.*

الملخص

الاسمنت هو المصدر الرئيسي للأثار البيئية الناتجة عن استخدام الخرسانة و من اجل تحسين هذه الاخيرة من وجهة نظر بيئية و تحسين نوعية الهواء فمن الاحسن الانقاص من كمية استعمال الاسمنت. الاستعمال المتزايد للإضافات الاسمنتية هي طريقة مجربة للحد من التغيرات البيئية و تحسين نوعية الهواء. يدمج حشو حجر الكلس في الكلنكر بهدف صناعة الاسمنت المختلط. الهدف من هذه العمل هو دراسة تأثير مختلف طرق دمج حشو الحجر الكلسي على خواص الخرسانة. **كلمات مفتاحية:** الاسمنت , الخرسانة, اضافة, استبدال, حشو حجر الكلس.

Résumé

Le ciment est la principale source des impacts sur l'environnement de l'utilisation du matériau béton. Afin d'optimiser ce dernier d'un point de vue environnemental, il est nécessaire de réduire son dosage en ciment.

L'utilisation accrue des ajouts cimentaires s'avère une méthode éprouvée pour lutter contre les changements climatique et améliorer la qualité de l'aire. Les fillers calcaires sont incorporés au clinker afin de produire un Ciment Portland Composé.

Ce sujet a pour but d'étudier l'effet des différents modes d'incorporation des filler calcaire sur les propriétés des bétons à l'état frais et durci.

Mots clés : Ciment ; Béton ; Addition ; Substitution ; filler calcaire.

Abstract

Cement is the main source of environmental impacts from the use of concrete material. In order to optimize the latter from an environmental point of view, it is necessary to reduce its cement dosage.

The increased use of cement additives is a proven method to combat climate change and improve the quality of the area. The limestone fillers are incorporated into the clinker to produce a Composite Portland Cement.

The purpose of this study is to investigate the effect of different modes of incorporation of limestone filler on the properties of concrete in the spawning state and in the cured state.

Keywords: Cement, Concrete, addition, substitution, limestone filler.

SOMMAIRE

Contenu

LISTE DES FIGURES	2
LISTE DES TABLEAUX	3
INTRODUCTION GENERALE	4
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	7
1. INTRODUCTION	7
2. LE CIMENT	7
2.1 Les constituants	7
2.2 Propriétés des ciments Portlands	9
2.3 Hydratation des ciments portland	12
2.4 Fabrication du ciment	16
2.5 Classification des ciments.....	16
3. LES AJOUTS CIMENTAIRES	18
3.1 Définition	18
3.2 Classification.....	19
3.3 Principaux ajouts cimentaires.....	20
3.4 Avantages des ajouts cimentaires.....	24
4. LES GRANULATS	24
4.1 Définition	25
4.2 Différents types de granulats	25
4.3 Caractéristiques des granulats.....	25
5 L'EAU DE GACHAGE	29
5.1 Rôle de l'eau de gâchage	30
6 LES ADJUVANTS.....	30
6.1 Définition	31
6.2 Classification des adjuvants.....	31
CONCLUSION	35
CHAPITRE II : PARTIE EXPERIMENTALE	37
1.INTRODUCTION :	37
2. LES CONSTITUANTS :	37
2.1 Le ciment :	37
2.2 Les granulats :	39
2.3 Filler calcaire :	42
2.4 Adjuvant :	43
3. BETONS ETUDIES	44
3.1 Béton Témoin.....	44
3.2 Béton avec filler calcaire :	49
4. RESULTATS D'ESSAIS ET INTERPRETATIONS	50
3.1 Bétons avec rapport Eau/Liant constant ($E/L = 0,4$)	51
3.2 Bétons avec affaissement au cône d'Abrams constant ($A_c = 12 \text{ cm}$)	58
CONCLUSION GENERALE	64

Liste des figures

Chapitre I : synthèse bibliographique.

FIGURE 1 : EVOLUTION DE TEMPS DE PRISE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....	9
FIGURE 2 : DEGAGEMENT DE LA CHALEUR LORS DE L'HYDRATATION DE CIMENT EN FONCTION DU TEMPS.....	10
FIGURE 3 : FLUX THERMIQUE DEGAGE PAR UNE PATE DE CIMENT PORTLAND AU COURS D'HYDRATATION.	13
FIGURE 4 : FIBRE DE C-S-H (MEB 1100 X).	13
FIGURE 5: CRISTAUX DE PORTLANDITE (MEB 7000 X).	14
FIGURE 6 : AIGUILLES D'ETTRINGITE (MEB).....	15
FIGURE 7 : CRISTAUX HEXAGONAUX DE MONOSULFOALUMINATES (MEB 8000 X).....	15
FIGURE 8: RESISTANCE DES CIMENTS EN FILLER CALCAIRE [8].	21
FIGURE 9 : ILLUSTRATION DES FILLER CALCAIRE.....	22
FIGURE 10 : LES DIFFERENTS TYPES DES GRANULATS.....	25
FIGURE 11: COURBES GRANULOMETRIQUES DES GRANULATS.	26
FIGURE 12 : FORME D'UN GRANULAT.	27
FIGURE 13: POURCENTAGE D'AIR ENTRAINEE RECOMMANDE SUIVANT LA GROSSEUR DES GRANULATS.	33
FIGURE 14 : SCHEMA DE L'INFLUENCE COMPAREE D'UN ACCELERATEUR ET D'UN RETARDATEUR DE PRISE SUR L'EVOLUTION DES RESISTANCES.....	34

Chapitre II: partite expérimentale

FIGURE 1 : COURBES GRANULOMETRIQUES DES GRANULATS.	41
FIGURE 2: FILLERS CALCAIRE (AVANT ET APRES BROUAGE).	43
FIGURE 3 : ADJUVANT ADVA FLOW 390.....	43
FIGURE 4: ABAQUE PERMETTANT LA DETERMINATION DE C_{OPT}	45
FIGURE 2: COURBES GRANULOMETRIQUES ET DE REFERENCE.....	47
FIGURE 6 : SCHEMA RECAPITULATIF DE LA METHODOLOGIE DU TRAVAIL.	50
FIGURE 7: VARIATION DE L'AFFAISSEMENT AU CONE D'ABRAMS EN FONCTION	52
FIGURE 8: VARIATION DE MASSE VOLUMIQUE A L'ETAT FRAIS EN FONCTION	53
FIGURE 9: VARIATION DE LA MASSE VOLUMIQUE A L'ETAT DURCI EN FONCTION	53
FIGURE 10: VARIATION DE L'ABSORPTION DU BETON EN FONCTION	54
FIGURE 11 : VARIATION DE PROPAGATION DES ONDES ULTRASONIQUE EN FONCTION	55
FIGURE 12: VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION A 28 JOURS EN FONCTION.....	56
FIGURE 13: VARIATION DE LA RESISTANCE A LA FLEXION A 28 JOURS EN FONCTION.....	57
FIGURE 14 : VARIATION DE LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FENDAGE A 28 JOURS.....	57
FIGURE 15 : VARIATION DU RAPPORT E/L EN FONCTION	58
FIGURE 16 : VARIATION DE LA MASSE VOLUMIQUE A L'ETAT FRAIS EN FONCTION	59
FIGURE 17: VARIATION DE LA MASSE VOLUMIQUE A L'ETAT DURCI (A 28J) EN FONCTION	59
FIGURE 18 : VARIATION DE L'ABSORPTION DU BETON EN FONCTION.....	60
FIGURE 19 : VARIATION DE LA VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES ULTRASONIQUES EN FONCTION.....	61
FIGURE 20: VARIATION DE LA RESISTANCE A LA FLEXION A 28 JOURS EN FONCTION.....	61
FIGURE 21: VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION A 28 JOURS EN FONCTION.....	62
FIGURE 22 : VARIATION DE LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FENDAGE EN FONCTION.....	62

Liste des tableaux

Chapitre I : Synthèse bibliographique

TABLEAU 1 : DIFFERENT CLASSE DES CIMENTS COURANTS.	17
TABLEAU 2: CLASSIFICATION DES CIMENTS COURANTS SELON LA RESISTANCE.	18
TABLEAU 3 : CLASSIFICATION DES AJOUTS SELON LEUR REACTIVITE [6].....	19
TABLEAU 4 : LES PRINCIPAUX AVANTAGES DES MATERIAUX CIMENTAIRES.	24
TABLEAU 5: ESV ET ESP DE SABLE.	29
TABLEAU 6 : LIMITES EN % DES CONSTITUANTS DANS L'EAU DE GACHAGE.	30

Chapitre II: partie expérimentale

TABLEAU 1: CARACTERISTIQUES MECANQUES DU CIMENT CEM II/A 52,5 R (MPA).....	37
TABLEAU 2: COMPOSITION CHIMIQUE DU CIMENT CEM II/A 52,5 R.	38
TABLEAU 3 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU CIMENT CEM II/A 52,5 R.	38
TABLEAU 4: COMPOSITION MINERALOGIQUE DU CIMENT CEM II/A 52,5 R.	39
TABLEAU 5 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE SABLE DE KADDARA.	39
TABLEAU 6 : PROPRIETES PHYSIQUE DE SABLE	39
TABLEAU 7: ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES GRAVIERS 3/8	40
TABLEAU 8 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES GRAVIERS 8/15	40
TABLEAU 9 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES GRAVIERS 15/25	40
TABLEAU 10 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES GRAVIERS.	41
TABLEAU 11 : CARACTERISTIQUES MECANQUES DES GRAVIERS.	42
TABLEAU 12 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUE DES FILLERS CALCAIRES.	42
TABLEAU 13: ANALYSE CHIMIQUE DES FILLERS CALCAIRES.	42
TABLEAU 14 : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE L'ADJUVANT ADVAFLOW 390.	43
TABLEAU 15 : COEFFICIENT GRANULAIRE G	45
TABLEAU 16 : CORRECTION DU DOSAGE EN EAU	46
TABLEAU 17 : TERME CORRECTEUR K POUR LA FIXATION DE L'ORDONNEE Y DE LA COURBE DE REFERENCE	46
TABLEAU 18 : LES POURCENTAGES DES GRANULATS	47
TABLEAU 19: VALEURS DU COEFFICIENT DE COMPACITE	48
TABLEAU 20: VOLUME DES GRANULATS POUR 1 M ³ DE BETON.	49
TABLEAU 21 : MASSE DES GRANULATS POUR 1M ³ DE BETON.	49
TABLEAU 22: COMPOSITION DU BETON TEMOIN (POUR 1M ³).	49
TABLEAU 23 : COMPOSITION DES BETONS D'ETUDE AVEC AJOUT DE FILLER CALCAIRE.....	50
TABLEAU 24 : QUALITE DE BETON EN FONCTION DE VITESSE DE PROPAGATION	55

Introduction générale

Le béton aujourd'hui occupe une grande importance dans le domaine de la construction, grâce à sa facilité de mise en œuvre, sa résistance, sa durabilité et ses coûts acceptables.

Le béton est un matériau composite hétérogène multiphasique, résultant d'un mélange intime de différents composants dont les uns sont inertes constituent le squelette de béton, et les autres sont actifs ainsi que d'autres additifs choisis de façon rationnelle.

Plusieurs recherche ont été conduites afin d'améliorer les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton en utilisant des particules fines comme ajouts minéraux. Ces derniers sont actuellement utilisés dans le béton afin de développer ses performances. Ils présentent une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelques fois également au béton. Ils sont souvent meilleur marché que le ciment portland et permettent d'obtenir un ciment composé économique. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la composition du béton.

Parmi ces ajouts on trouve les fillers calcaire, ce sont des ajouts cimentaires inertes, mais qui peuvent se révéler d'une grande efficacité dans l'utilisation pour les bétons de masse par l'effet filler, ils peuvent en effet améliorer la compacité du squelette granulaire de béton, et par leur relative inertie chimique, ils peuvent contribuer à diminuer sensiblement la température dans les bétons de masse.

Cette étude a pour but d'étudier l'effet d'un ajout minéral inerte sur les propriétés du béton, incorporé avec différents mode : substitution et addition : pondérale ou volumétrique, par rapport la masse de ciment. On utilise comme ajout les fillers calcaire, à raison de 10 % de la masse de ciment. Cette étude est basée sur deux paramètres intrinsèques du béton : affaissement et rapport E/L

Cette étude concerne les propriétés de béton à l'état frais (masse volumique, affaissement) et à l'état durci (Masse volumique, résistances mécaniques). Par rapport aux paramètres de béton susnommés.

Ce mémoire est composé de deux chapitres, qui sont comme suit :

- Le premier chapitre présente une analyse bibliographique sur les composants de béton, le ciment, les ajouts cimentaires, granulats, l'eau de gâchage, leurs caractéristique et leurs influences sur les propriétés des bétons.
- Le deuxième chapitre traite l'ensemble des matériaux utilisés dans l'élaboration des différents bétons de notre étude, les résultats des essais servent à leur identification. Cependant, la formulation de nos bétons est déterminée par la méthode de Dreux Gorisse. Ce chapitre concerne aussi à la présentation et la discussion des résultats des essais obtenus.
- On termine avec une conclusion générale mettant en relief les principaux résultats obtenue dans cette étude et éventuellement des perspectives.

SYNTHESE

BIBLIOGRAPHIQUE

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION

La formulation des bétons qui, pendant très longtemps, a reposée sur une simple association ternaire ciment, eau et granulats, s'est progressivement compliquée au point qu'un béton actuel comporte de façon courante cinq constituants : ciment, eau, granulats, additions minérales et adjuvants. Cet accroissement du nombre de constituants est, d'un point de vue pratique, très avantageux car il conduit, généralement, à l'amélioration très significative des performances mécaniques, physiques et durabilités des bétons.

L'incorporation des ajouts cimentaires est maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du béton telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc. ces ajouts cimentaires affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement liée au développement de la résistance, la durabilité des matériaux durcis.

Pour profiter pleinement de ces avantages et ainsi choisir la meilleure solution permettant d'optimiser la formulation, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de ces nouveaux composants et leurs actions sur les propriétés des bétons.

2. LE CIMENT

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau, c'est une poudre finement broyée, lorsqu'elle est mélangée avec l'eau faire prise, durci et conserve ses propriétés dans l'air et dans l'eau, ce durcissement progressive est dû à l'hydratation de certaines composants minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

La proportion de chaux et de silice réactive devant être moins de 50 % de la masse de ciment.

2.1 LES CONSTITUANTS

Le ciment est constitué par mélange et broyage :

- De clinker qui est une roche de synthèse élaborée à haute température dans le four à ciment et constitué, au plan chimique, de silicates et d'aluminates de calcium.
- De gypse (sulfates de calcium CaSO_4), qui joue un rôle de régulateur de prise.
- D'additifs éventuels, qui confèrent au ciment des propriétés particulières.

2.1.1 *Le clinker*

C'est un constituant obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieur à 1450 C° , d'un mélange approprié 80 % de calcaire et 20 % d'argile, le ciment Portland contient 04 constituants principaux :

✓ Silicate tricalcique	(C_3S)	(40 - 65 % du clinker)
✓ Silicate bicalcique	(C_2S)	(08 - 35 % du clinker)
✓ Aluminate tricalcique	(C_3A)	(1 - 13 % du clinker)
✓ Alumino-ferrite tétracalcique	(C_4AF)	(3 - 14 % du clinker)

2.1.2 *Les constituants secondaires*

Le ciment portland est composé de clinker auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute des constituants secondaires associé au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques.

Les constituants les plus utilisés sont :

- Pouzzolanes
- Cendre volantes
- Fumée de silice.
- Calcaire.
- Laitier de haut-fourneau.
- Additifs :

Les additifs sont des constituants ajoutés pour améliorer les propriétés du ciment. les plus couramment utilisés sont les agents de mouture. la quantité de ces additifs ne dépasse pas 0.5 % en masse dans tous les ciments à l'exception des composés chlorés pour quelque ciment composé de laitier. Ces additifs ne doivent pas la corrosion des armatures ou influencer les propriétés du ciment, du béton ou du mortier fabriqué avec ce ciment. [1].

2.2 PROPRIETES DES CEMENTS PORTLANDS

2.2.1 La finesse de mouture

La finesse du ciment joue un rôle essentiel dans la compacité de l'empilement, c'est pourtant beaucoup plus en terme de développement des performances mécanique, qui dépendent très étroitement de la finesse, que le cimentier ajuste ce paramètre, il s'agit alors de trouver un compromis entre un ciment à la fois performant et économique. [2].

2.2.2 La prise

Les constituants anhydres donnent en présence d'eau, naissance à des silicates, des aluminates de calcium hydraté et de la chaux hydraté dite portlandite formant un gel micro cristallin, à l'origine du phénomène dite la prise.

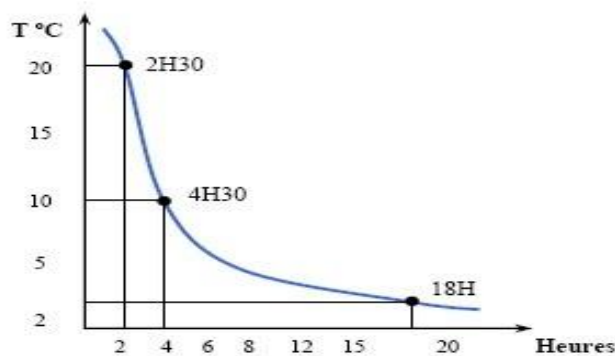


Figure 1 : Evolution de temps de prise en fonction de la température

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

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

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

- ✓ 1h 30 pour les ciments de classe 35 et 45.

✓ 1 h pour les ciments des classe 52.5 et HP.

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

2.2.3 La fausse prise

Dans la composition des ciments rentre en générale un peu de gypse (sulfate de calcium) hydraté à deux molécules d'eau : $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, si les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la fausse prise.

Dans ce cas, il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage, les ciments les plus sensibles sont ceux à très fine mouture ou à assez fort pourcentage de gypse. [2].

2.2.4 Chaleur d'hydratation

La dissolution des différents constituants est exothermique et selon leurs pourcentage relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en C_3A que l'on cherchera à utiliser par temps froid ou en préfabrication, alors qu'on aura intérêt à les éviter par temps chaud, suivant les ciments, cette chaleur est compris à 12 heures, approximativement entre 65 j/g, par exemple pour certains CHF-CEMIII/B et 300j/g pour certaine CPA-CEM I. la finesse de mouture à également une action sur l'exothermie.[2]

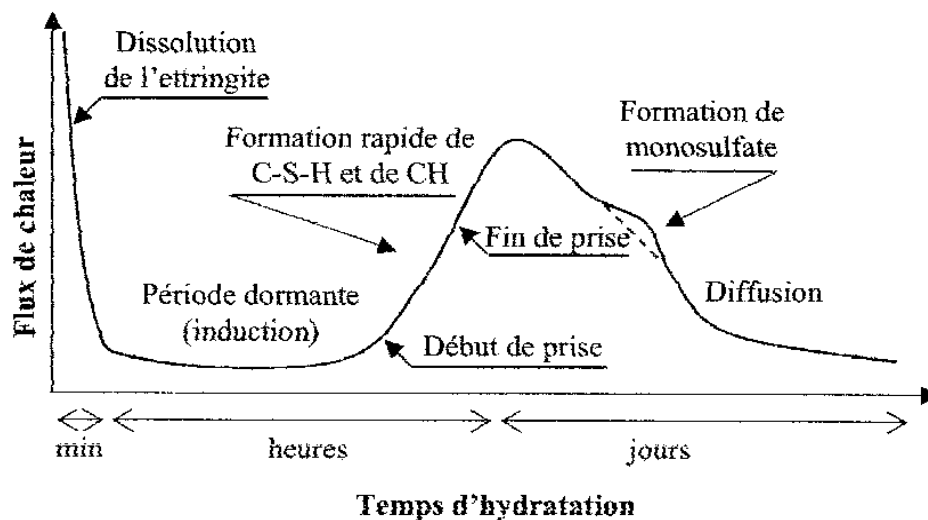


Figure 2 : dégagement de la chaleur lors de l'hydratation de ciment en fonction du temps.

2.2.5 Le durcissement

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

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température, ce qui conduit notamment en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au bout de quelques heures.

2.2.6 Résistance mécanique

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortiers normalisés, à 28 jours d'âge en flexion et compression des éprouvettes 4x4x16 cm, la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment, elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa.

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme NF EN 195-1. Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales [2].

2.2.7 Retrait

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

La norme impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

- 800 µm/m pour les ciments Portland CPA-CEM I et CPJ-CEM II de la classe 32.5.
- 1000 µm/m pour des types de ciments identiques mais des classes 3.5R- 42.5 et 42.5R

2.2.8 Expansion

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium qui peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie libres.

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

La stabilité se détermine par l'essai Le Chatelier qui consiste à mesurer l'écartement de deux aiguilles solidaires d'un moule rempli de la pâte de ciment à tester, et conservé dans de

l'eau bouillante. Les valeurs de l'expansion mesurée doit être inférieure à 10 mm pour tous les type de ciments courants.

Le pourcentage maximale de magnésie est limité, sa valeur, spécifié par la norme, doit être au plus égale à 5 % pour les CPA-CEM I ainsi que pour le clinker [2].

2.3 HYDRATATION DES CIMENTS PORTLAND

Le ciment est un liant hydraulique, il se combine à l'eau en pour donner les hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique, c'est par un système de dissolution-précipitation que le ciment se transforme d'un état de suspension vers un solide poreux.

L'avancement des réactions d'hydratation conduit à une évolution des propriétés mécanique et à la création d'un réseau poreux résiduel. La résistance mécanique d'un béton durci augment en fonction du processus d'hydratation.

L'évolution des réactions d'hydratations dépend de plusieurs paramètres, tels que la finesse de mouture, la composition, l'ajout secondaire (laitier de haut fourneau, pouzzolanes.....etc.). Le rapport eau/ciment, température, la technique de malaxage et la présence des sels soluble dans les fissures, la contribution de ces facteurs si elle n'est pas contrôlée peut dérouler le cantique dans le sens de la dégradation des matériaux [4].

2.3.1 *Théorie d'hydratation*

L'hydratation des ciments est une somme de processus chimique qui conduisent à la transformation des phases anhydres en différentes phases hydraté. Cette transformation chimique s'accompagne d'un ensemble de processus physiques qui participent à la construction de la microstructure de la pâte de ciment, de point de vue théorique, il ya deux théorie principales :

D'après la théorie colloïdale, il se produisait d'abord une dissolution provoquant un gonflement des grains et l'apparition d'une solution très concentrée en chaux. Cette solution agirait sur les silicates pour donner un gel de silicates et de chaux. Le gel durcirait et deviendrait imperméable, et l'hydratation continuerait à l'intérieur des grains de ciment protégés par cette enveloppe colloïdale.

D'après LE CHATELIER : les constituants anhydre du ciment portland. Mis en présence d'eau, donnant naissance à une solution sursaturée. Les composants anhydres se dissoudrait, puis les hydrates formés, peu soluble, précipiterait sous formes des microcristaux, ce qui remettrait une nouvelle dissolution d'éléments anhydres les réactions se poursuivraient

jusqu'à la mise en solution de la totalité du ciment le durcissement serait dû à la multiplication et à l'adhérence des cristaux formés [5].

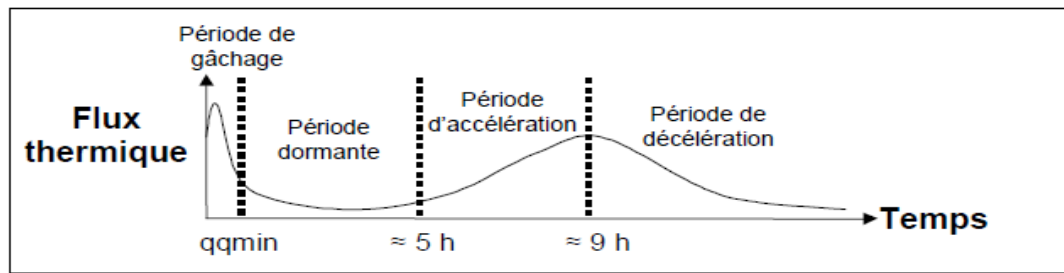


Figure 3 : Flux thermique dégagé par une pâte de ciment portland au cours d'hydratation.

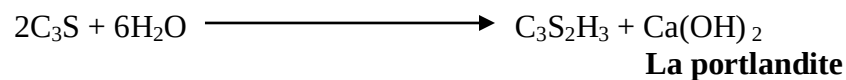
2.3.2 Hydratation des phases de ciment

a) Hydratation du silicate tri calcique C_3S

Le C_3S est la phase la plus importante de ciment. La chaleur dégagée par cette phase est l'une des plus élevées.

La majeure partie de son hydratation se passe dans les 28 premiers jours. La réaction complète peut prendre jusqu'à 1 année.

L'hydratation des silicates conduit à 2 types d'hydrates :



- La portlandite participe aux résistances à très jeune âge.
- Les C-S-H peuvent cristalliser, ce sont les hydrates les plus importants.
- Le C-S-H est le produit d'hydratation qui développe la résistance de la pâte de ciment.
- Une partie des ions $(SO_4)^{2-}$ provenant du gypse utilisé dans le ciment rentre dans la structure du C-S-H et permet d'améliorer sa résistance

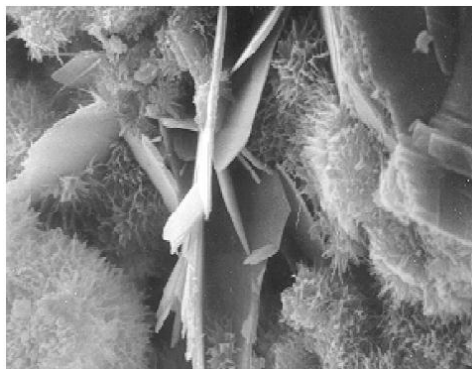


Figure 4 : fibre de C-S-H (MEB 1100 x).

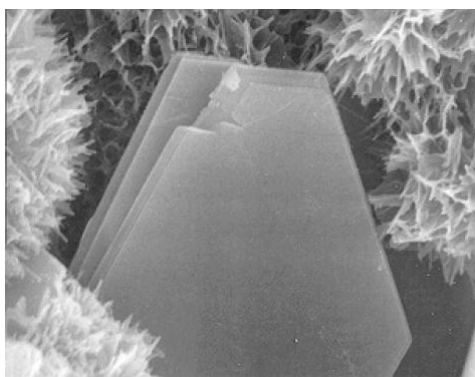


Figure 5: cristaux de portlandite (MEB 7000 x).

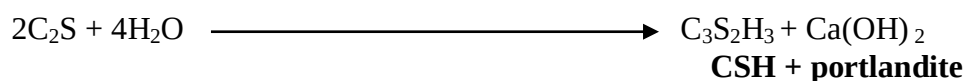
b) Hydratation des C_2S :

Le produit d'hydratation de C_2S , est de Silicate de calcium hydratés (C-S-H) et l'hydroxyde de calcium ou portlandite $Ca(OH)_2$.

La formule de C-S-H donné dans l'équation est approximative, la quantité de CH produite dans ce cas est plus faible d'un tiers que dans le cas du C_3S . La vitesse d'hydratation de (beta)- C_2S est beaucoup plus faible que de celle du C_3S .

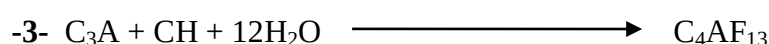
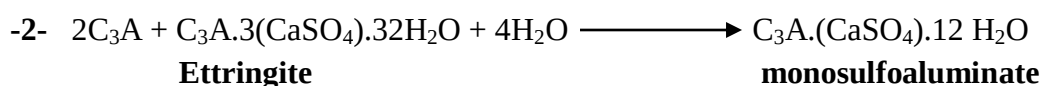
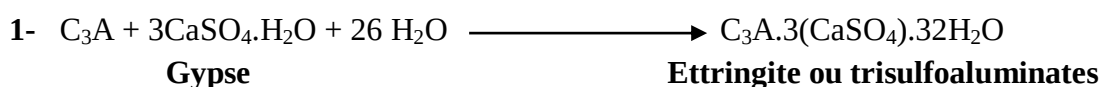
La faible quantité de $Ca(OH)_2$ va favoriser le développement des meilleurs résistances que dans le cas du C_3S . La (beta)- C_2S va surtout participer au développement des résistances après 28 jours.

Comme c'est dans le cas de C_3S , une partie des ions SO_4^{2-} provenant du gypse utilisé dans le ciment rentre dans la structure du C-S-H et permet d'améliorer sa résistance.



c) Hydratation des C_3A :

L'hydratation des aluminates, du C_3A en particulier, obéit à la séquence des réactions suivantes, dont l'ordre 1, 2,3 :



L'effet régulateur de prise du gypse est lié au fait que :

- 2- ne démarre que quand tout le gypse est consommé dans -1-
- 3- ne démarre que quand l'ettringite est consommée dans -2-

✓ **Mécanisme d'hydratation de C_3A :**

La formation de l'ettringite diminue l'hydratation du C_3A en formant une barrière de diffusion (période dormante) autour de C_3A , de façon analogue à celle qui est formée autour des grains de C_3S par le C-S-H.

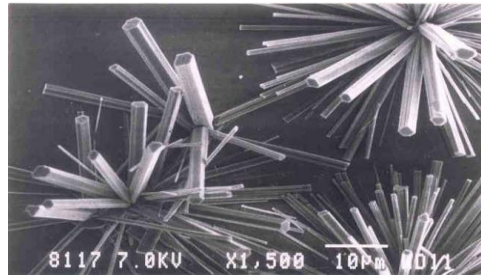


Figure 6 : Aiguilles d'ettringite (MEB)

Cette barrière une fois brisée lors de la formation du monosulfoaluminate, permet au C_3A de réagir plus rapidement. Par ailleurs si la teneur en C_3A est supérieure à celle qui est nécessaire à la formation de l'ettringite, alors il y a la formation du C_4AF

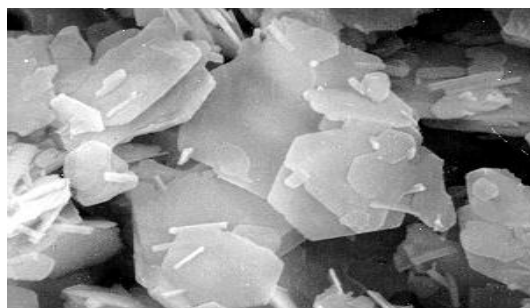
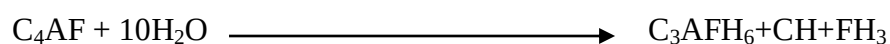
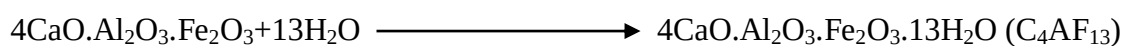


Figure 7 : Cristaux hexagonaux de monosulfoaluminates (MEB 8000 x)

En l'absence de sulfate de calcium, l'hydratation conduit rapidement à la formation des cristaux.

d) Hydratation des alumino-ferrite de calcium :

L'hydratation de C_4AF se déroule suivant la réaction :



e) Hydratation des autres phases du clinker :

CaO et MgO libre s'hydratent en donnant la portlandite Ca(OH)_2 et la brucite Mg(OH)_2 , ces oxydes dans le clinker s'hydratent très lentement ce qui est à l'origine de la variation volumique de la pierre durci dans les échéances ultérieures (10 ans) de durcissement.

2.4 FABRICATION DU CIMENT

La matière première composée de calcaire et d'argile est extraite de carrière, ceci vient s'ajouter d'autre matière telles que du laitier, de la pyrite, des pouzzolanes....etc. en fonction du type de ciment fabriqué

La matière première est finement broyée, dosée et mélangée avant d'être introduite dans un four rotatif. Circulant en sens inverse des gazes de combustion, le mélange subit les changements suivants :

- A 700 °C, le mélange déshydraté.
- A 1100 °C, le calcaire est décarbonaté.
- Au-dessous de 1200 °C, les réactions entre composants commencent à se produire, la première formation de la phase liquide aura lieu, cette dernière s'avère essentielle en ce qui concerne les réactions de clinkerisation.
- A température finale d'environ 1450 C°, la formation des quatre principaux minéraux du clinker à savoir C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF sera terminée. Le clinker est ensuite refroidi et stocké. Après un dernier broyage, pendant lequel on ajoute du gypse et éventuellement d'autres additifs, il prend la forme connue sous le nom : clinker portland.

2.5 CLASSIFICATION DES CEMENTS

2.5.1 Classification selon la composition

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents type de ciments définis par la norme. Le tableau 1 donne la liste des différents types de ciment courants normalisés avec indication pour chacun d'eux, de leur désignation propre et de pourcentages respectifs de constituants qu'ils comportent [2].

Les différentes classes des ciments courants sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1 : différent classe des ciments courants.

Désignation	Type de Ciment	Teneur en clinker	Teneur en % De l'un des constituants suivants : laitier-pouzzolanes-cendre-calcaire-schiste fumées de silice	Teneur en constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment portland	95 à 100 %		0 à 5%
CPJ-CEM II/A	Ciment portland composé	80 à 94 %	De 6 a 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas ou le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limité a 10%. De 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessous	
CPJ-CEM II/B		65 à 79 %		
CHF-CEM III /A	Ciment de haut-fourneau	35 à 64%	36 à 65% de laitier haut-fourneau	0 à 5%
CHF-CEM III /B		20 à 34%	66 à 80% de laitier de haut-fourneau	0 à 5%
CLK-CEM III /C		5 à 19%	81 à 95 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5%
CPZ-CEM IV /A	Ciment pouzzolanique	65 à 90%	18 à 35% de pouzzolane cendre siliceuses ou fumées de silice, ces derniers étant limitées à 10%.	0 à 5%
CPZ-CEM IV /B		45 à 60%	36 à 55% comme ci-dessous	0 à 5%
CLC-CEM V /A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64%	18 à 30% de laitier de haut-fourneau et 18 à 30% de cendre siliceuses ou de pouzzolane	0 à 5%
CLC-CEM V /B		20 à 39%	31 à 50% de chacun des 2 constituants comme ci-dessous	0 à 5%

2.5.2 Classification selon la résistance mécanique

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en MPa à 28 jours, la norme spécifiant une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont dans le tableau suivant [2] :

Tableau 2: Classification des ciments courants selon la résistance.

Classe des résistance	Résistance à 2 jours	Résistance minimale 28 jours	Résistance maximale 28 jours
32,5		$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5R	$\geq 13,5$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
42,5	$\geq 12,5$	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5R	≥ 20	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
52,5	≥ 20	$\geq 52,5$	-
52,5R	≥ 30	$\geq 52,5$	-

3. LES AJOUTS CIMENTAIRES

On peut fabriquer des bétons en utilisant seulement du ciment portland. Cependant la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts minéraux lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance et durabilité [6].

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau. Le rôle propre du superplastifiant est essentiellement la défloculation (grâce à sa propriété dispersante), ce qui engendre des grappes d'ultrafines qui se forment lors du gâchage et leur permet ainsi de jouer leur rôle granulaire [7].

3.1 DEFINITION

Les ajouts cimentaires sont des matières naturelles, artificielles, sous-produits d'autres industries, résidus industriels ou déchet industriels polluant. Ils sont ajoutés au mélange de matières premières avant le broyage, soit la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leurs pourcentage dans la masse varient suivant le but de l'addition et le rôle

qu'elle peut jouer, ainsi, on trouve des ajouts en faible teneurs moyennes ou même en fortes teneurs.

3.2 CLASSIFICATION

Les ajouts sont classés : en actif, ou en inertes, les actifs sont chimiquement actifs et entrent en réaction avec l'hydroxyde de calcium en formant des hydrosilicates de calcium. Le rôle de ces ajouts est double :

- L'effet filler (ou remplissage) pour lequel par leur finesse s'insèrent entre les grains de ciment et diminuent le rapport E/C.
- L'effet pouzzolanique correspond à l'association partielle ou totale des ultras fins avec l'eau ou la chaux libérée par le ciment [8].

Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau suivant :

Tableau 3 : classification des ajouts selon leur réactivité [6].

TYPE	REACTIVITE	MATERIAUX
Hydraulique	Fortement réactif	Ciment spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique latent		Laitier granule-cendre volantes riche en calcium (calcique)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement réactif	Cendre volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, trasse phonolithe, terres a diatomées)
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Filler (farine calcaire...) fibres, pigments Colorants, matières expansives, dispersions synthétiques

3.3 PRINCIPAUX AJOUTS CIMENTAIRES

3.3.1 *Filler calcaire*

Les normes s'accordent pour définir comme « fines » les éléments passant à travers un tamis de 80µm. On adopte aussi le terme « filler » pour désigner les éléments bruts de concassage inférieurs à 80µm. Il s'agit donc de produits fins obtenus par fragmentation pouvant d'ailleurs contenir des éléments de pollution.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90 % de carbonates de calcium [9].

Selon la norme NF P18-508 ; les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenue par broyage et /ou sélection, provenant de gisement de roche calcaire pouvant être dolomitique, massives ou meubles, d'origine sédimentaire carbonatées, elles sont principalement constituées de carbonate de calcium CaCO_3 et de MgCO_3 , elles sont rayable par le canif, et leur densité varie entre 2,4 et 2,9.

Le calcaire est formé par du carbonate de calcium, fait effervescence à froid, avec les acides, suivant leur origine les calcaires subdivise en :

- ✓ Les calcaires détriques.
- ✓ Les calcaires d'origine chimiques.
- ✓ Calcaire dolomitique et dolomite.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés au **CPA** peuvent jouer plusieurs rôles :

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (béton ouvrable retenant mieux l'eau)
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C_3S et de C_3A .
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et les granulats.

a) *Influence des filler calcaires sur les propriétés des bétons.*

La substitution du ciment par du filler a tendance à retarder l'âge de la première fissure, cet effet est particulièrement sensible pour la pâte à 20% de substitution en filler, le filler calcaire réagissant très peu, la quantité d'eau disponible pour l'hydratation du ciment est plus importante lorsque ce dernier est partiellement remplacé par du filler [10].

b) Influence des filler calcaire sur la résistance des bétons.

Plusieurs auteurs, ont conclue que l'ajout des fines calcaires aux mortiers et aux bétons, engendre une chute des résistances qui n'est pas très importante lorsque la teneur en fine n'excède pas 20% (figure 8).

On note également que la cinétique dévolution de la résistance à la flexion aux jeunes âges des ciments avec ajout calcaire est plus élevée que celle du ciment témoin, avec une tendance asymptotique des ciments renfermant plus de 2 % des fines lorsqu'on approche de l'âge de 28 jours [8].

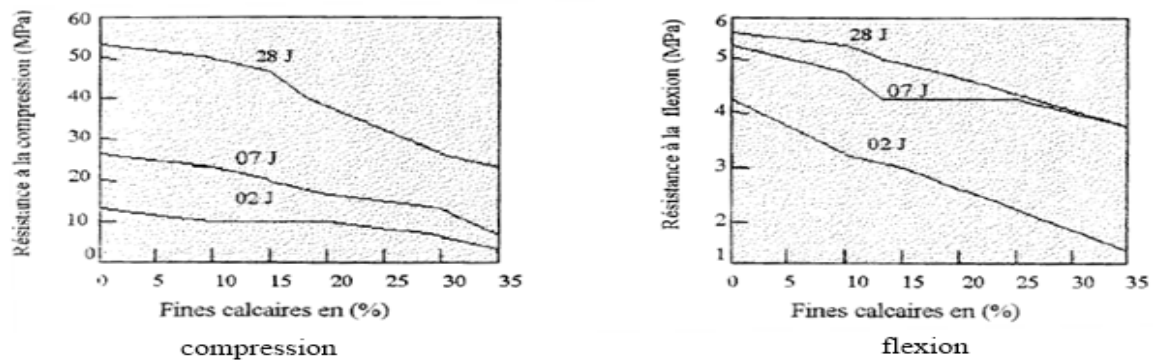


Figure 8: résistance des ciments en filler calcaire [8].

c) Influence des filler calcaire sur le béton à l'état frais.

La rhéologie des pâtes, des mortiers et des bétons dépend de la qualité du filler et de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura une réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe, surtout pour des rapports E/C < 0,40. Il est important de signaler que la présence de fines d'argile dans le filler peut augmenter la demande en eau.

L'ouvrabilité du béton augmente avec la finesse du filler calcaire jusqu'à 500 m²/kg. Au-delà de cette limite, il peut y avoir des problèmes de maniabilité.

Il est à noter que la présence du filler calcaire peut augmenter le retrait plastique du béton frais et permet de densifier la matrice du mortier.

Le filler calcaire peut également contribuer au contrôle du temps de prise par la formation de Carboaluminate de calcium (structure similaire à celle du monosulfoaluminate).

d) Influence des filler calcaire sur le béton à l'état durci.

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de l'ajout des fillers calcaires sur les performances mécaniques des bétons. Les fillers calcaires contribuent à la formation de monocarboaluminate et à la modification de la microstructure. L'addition du CaCO₃ accélère

L'hydratation du C₃S au jeune âge par modification de la surface de ce dernier et de son effet de nucléation.

La contribution aux gains de résistances apportés par le filler calcaire est due principalement à la réduction de la demande en eau et une meilleure utilisation du potentiel hydraulique du clinker. A jeune âge on assiste à une diminution de la porosité initiale.

La présence du filler calcaire augmente le retrait durant les 24 premières heures. Le retrait augmente aussi avec la finesse du filler, sauf dans le cas d'une granulométrie optimisée.

L'addition du filler calcaire diminue la résistance à l'eau de mer puisque le monocarboaluminate n'est pas stable chimiquement. La résistance aux cycles de gel-dégel n'est généralement pas affectée, sauf pour des taux de remplacement supérieurs à 15% [11].

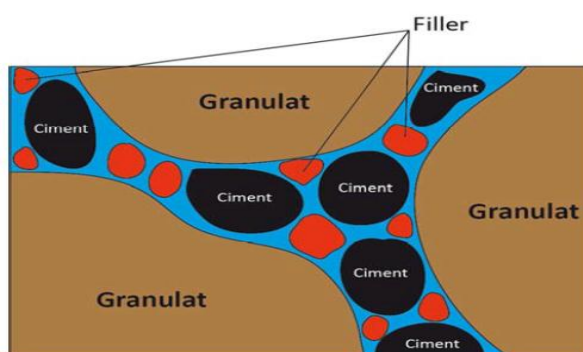


Figure 9 : illustration des filler calcaire.

3.3.2 Fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie de l'électrometallurgie et du silicium, de ces alliages ferro-siliceux (FeSi _ CaSi...).

Le silicium est obtenu par la réduction du quartz, en présence du carbone, le tout est porté à 2000 °C dans des fours à arcs électrique, les fumées contiennent du monoxyde de silicium (SiO₂) sous forme gazeuse qui s'oxyde à l'air et se condense presque immédiatement en particules extrêmement fines, la quantité de fumée de silice est récoltée au moyen des sacs filtres, à raison d'environ 300 kg par tonne d'alliage.

Le fumé de silice se compose principalement par un très grand nombre de fines particules, de diamètre moyen de 0,1µ, ces particules sont lisses, sphériques et glacées, la teneur en silice varie de 70 à 80 % et celui de CaO < 1,2 %, leur surface spécifique est d'ordre de 200 à 250000 cm²/g.

3.3.3 Pouzzolane

Est un matériau siliceux ou silico-alumineux qui possède ou pas de valeur hydraulique, finement broyé en présence de l'eau à des températures ambiante, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) pour former des composés possédant des propriétés

hydrauliques. La silice doit être amorphe (vitreux) étant donné que la silice cristalline a une très faible réactivité. Elle est composée de trois constituants principaux : silice, alumine et oxyde de fer.

Les ajouts pouzzolaniques actifs sont classés selon leurs provenances en trois groupes :

- Pouzzolane naturelle d'origine volcanique (cendre volcanique, tufs).
- Pouzzolane naturelle d'origine organique : (diatomites, tripolies, gliège).
- Pouzzolane artificielle (déchets industriels).

La pouzzolane d'un aspect rugueux est caverneuse, de porosité fermée, la pouzzolane a une capillarité très faible, sa densité apparente varie de 0,75 à 0,95, très résistante au feu et aux chocs thermiques, elle fond à 1140 °C.

Dans le ciment portland pouzzolanique, deux processus ont lieu pendant son durcissement :

- 1- Hydratation des minéraux faisant partie du clinker.
- 2- Interaction de l'adjuvant minéral actif (la pouzzolane) avec l'hydroxyde de calcium qui se dégage lors de la prise du clinker [12].

3.3.4 Laitier de haut-fourneau

Le laitier granulé de haut-fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue de composition convenable provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut-fourneau, selon la norme ENV 197-1.

Le laitier de haut-fourneau est un liant hydraulique latent, c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il a subi une activation convenable. Le laitier vérifié (amorphe) présente une structure riche en énergie grâce à la trempe le laitier conserve une énergie de cristallisation non dissipée, qui lui permet d'être hydraulique. Sa réactivité liée à son taux de vérification, plus le laitier est vitreux plus il est actif

Pour le laitier il faut :

- ✓ Masse vitreuse > 2/3 de la masse totale
- ✓ $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2) > 2/3$ de la masse de constituants.
- ✓ $[(\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2] > 1$ [13].

3.3.5 Cendres volantes

Les cendres volantes ; est l'ajout cimentaire le plus fréquemment utilisé dans le béton, selon la norme NF 450 c'est un résidu finement divisé de nature vitreuse résultant de la combustion du charbon pulvérisé et évacué de la chambre de combustion d'un four par les gaz

qui s'en échappent à des températures de l'ordre de 1550°C , la plupart des cendres volantes sur le marché sont un sous-produit des centrales thermiques.

La dimension des particules de cendres volantes est comprise entre moins de $1\mu\text{m}$ et plus de $100\mu\text{m}$, avec une dimension caractéristique de moins de $20\mu\text{m}$. La surface spécifique est généralement comprise entre 300 et $500\text{ m}^2/\text{kg}$, bien que certaines cendres volantes aient des surfaces spécifique aussi faible que $200\text{ m}^2/\text{kg}$ et aussi élevées que $600\text{ m}^2/\text{kg}$

La cendre volante est constituée surtout de silicates de verre contenant de la silice, de l'alumine, du fer et de calcium. Les composants mineurs sont le magnésium, le soufre, le sodium, le potassium et le carbone, des composants cristallins sont présents en petites quantités [14].

Les cendres volantes se divisent en 3 catégories :

- ✓ Les cendres silico-alumineuses (cendre de houille)
- ✓ Les cendres sulfocalcique (cendre de lignite)
- ✓ Des cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines.

3.4 AVANTAGES DES AJOUTS CIMENTAIRES

L'introduction des ajouts cimentaires dans le béton a plusieurs avantages économiques, techniques et écologiques. Le tableau suivant résume les avantages essentiels matériaux cimentaire.

Tableau 4 : les principaux avantages des matériaux cimentaires.

Avantages techniques	Avantages économiques	Avantages écologiques
- Améliore la maniabilité - réduit la demande en eau - Amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton - Diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton	- Leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation. - Réduit le prix du béton pour le coût du combustible.	- Diminution de l'émission du CO_2 par l'industrie cimentière - Elimination des sous-produits de la nature

4. LES GRANULATS

L'ensemble des matériaux inertes (sable, gravier) qui composent le béton sont dénommés aussi les granulats, dans la composition des bétons il faut autant que possible pour des raisons économique [3].

Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton, mais, selon leurs propriétés, ils affecteront la durabilité et les performances structurales du béton [15].

4.1 DEFINITION

C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm dont l'origine peut être naturel, artificiel ou provenant de recyclage, ces matériaux sont quelquefois appelés agrégats : réunion des substances divers formant un tout non homogène [2].

4.2 DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS

4.2.1 Granulats Naturel

D'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massive, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).

4.2.2 Granulats Artificiel

D'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermique ou autres.

4.2.3 Granulats Recyclé

Obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

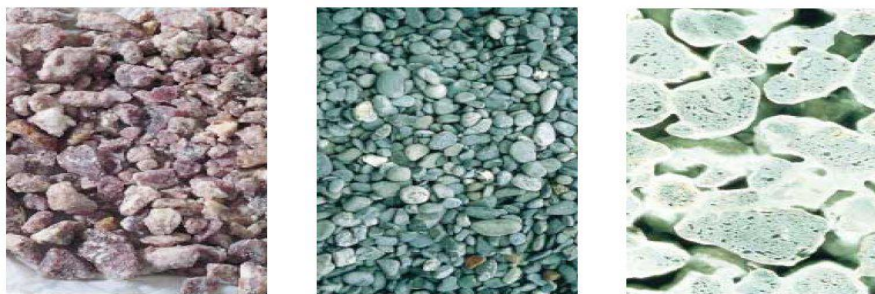


Figure 10 : Les différents types des granulats.

4.3 CARACTERISTIQUES DES GRANULATS

4.3.1 Granulométrie

La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un granulat. Elle consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à maille carrées de dimensions d'ouverture décroissantes et à peser le refus sur chaque tamis [15].

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisats sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique, la suite des valeurs de D est une progression géométrique de raison $\sqrt[10]{10} \sim 1,25$ [2].

4.3.2 Classe granulaire

Les granulats sont classés en fraction en fonction de leur grosseur déterminée par criblage sur les tamis à maille carrée dont les dimensions intérieures sont exprimées en millimètres. Le terme « granulat d/D » est réservé pour les granulats dont la dimension s'étend de :

d : pour les petites dimensions.

D : pour les plus grosses dimensions.

La norme XP P 18-540 précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles :

Filler : $D < 2$ mm et ayant au moins 70% de grains passant au tamis 0,63 mm.

Sablon : $D \leq 1$ mm et avec au moins de 70% de grains passant au tamis 0,63 mm.

Sable : $1 \text{ mm} < D < 6,3$ mm.

Grave : $D > 6,3$ mm

Gravillon : $d \geq 1$ mm et $d \leq 125$ mm.

Ballast : $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm

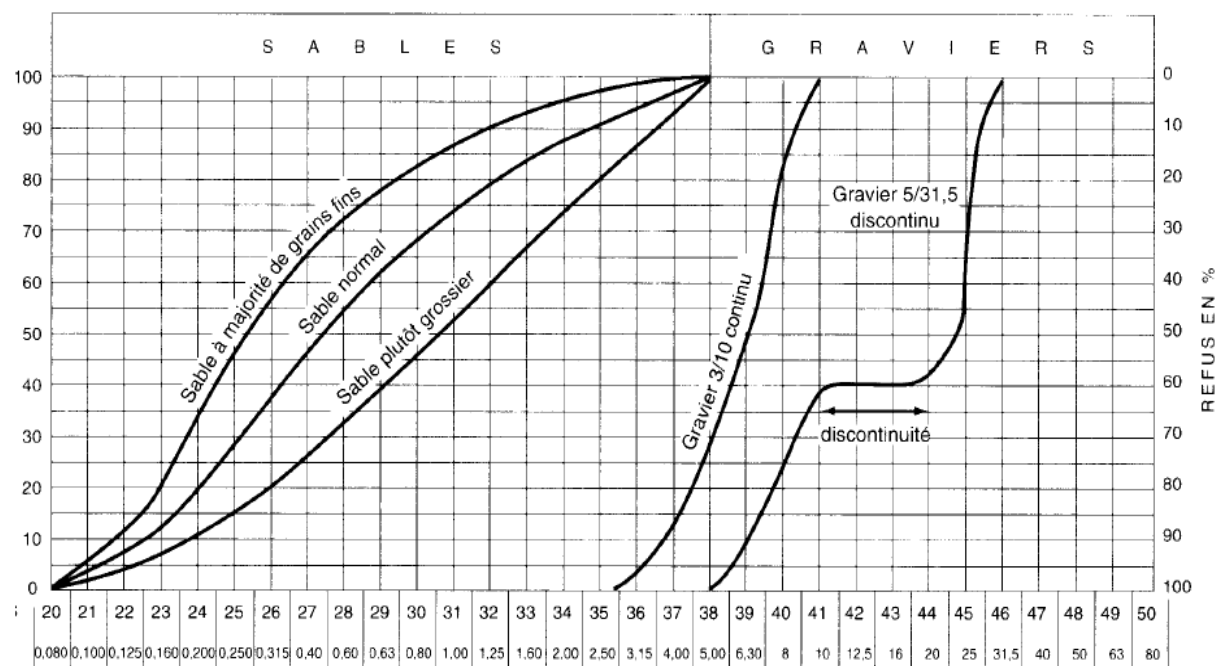


Figure 11: Courbes granulométriques des granulats.

4.3.3 Forme des granulats

La forme des granulats a une incidence sur la maniabilité du béton, la forme la plus souhaitable se rapprochent de la sphère, une mauvaise forme (aiguilles, plat) nécessite une quantité d'eau plus élevée et peut provoquer des défauts d'aspect.

La forme d'un granulat est défini par :

- Sa longueur L .
- Son épaisseur E qui est le plus petit écartement d'un couple de plans tangent parallèles.
- Sa grosseur G .

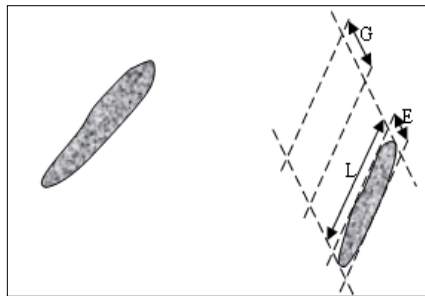


Figure 12 : forme d'un granulat.

4.3.4 Coefficient d'aplatissement

Le coefficient d'aplatissement A qui caractérise donc la forme des granulats à partir de leur plus grande dimension et de leur épaisseur est par définition le pourcentage d'éléments tel que $G/S > 1,58$ (G représentant en fait la dimension de la maille carrée minimale au travers de laquelle passe l'élément). Le coefficient « A » est déterminé par un double tamisage, d'abord au travers de la série de tamis à mailles carrées utilisée pour l'étude de la granulométrie, puis par un second tamisage des refus retenus sur les différents tamis sur une série de grilles à fentes parallèles, le rapport les dimension des tamis et des grilles étant de 1,58.

4.3.5 Coefficient d'absorption

Est le rapport de l'augmentation de la masse des granulats au bout de 24 heures par imbibition partielle la masse sèche, ce coefficient mesure le volume des pores accessible à l'eau, plus la valeur est grande plus la durabilité du béton est limité dans un milieu agressive, de même la pénétration de l'eau dans les pores des grains fragilise la structure en cas de gel.

4.3.6 Module de finesse

Les sable doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins, ne soit ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter

le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF) [15].

Le module de finesse correspond au $1/100^e$ de la somme des refus, exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivants :

0,16 - 0,315 - 0,63 - 2,5 - 5 - 10 - 20 - 40 et 80 mm.

Le module de finesse étant presque exclusivement vérifié sur les sables, les tamis concernés sont : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 et 5mm [2].

4.3.7 Résistance à la fragmentation

Dans les bétons, les granulats sont soumis à des contraintes pouvant entraîner leur rupture, la mesure de leur résistance à la fragmentation s'obtient par l'essai Los Angeles. C'est un essai de résistance aux impacts, basé sur la mesure de la dégradation granulométrique des matériaux soumis aux chocs [15].

C'est l'essai le plus couramment utilisé, il consiste à introduire dans un cylindre horizontal une certaine quantité du granulat à étudier avec un certain nombre de boules d'acier et de vérifier la quantité de fines produites après un temps de rotation défini, ainsi que les quantités à mettre en œuvre dans l'essai, en fonction de la granulométrie de l'échantillon à tester [2].

4.3.8 Résistance à l'attrition

C'est une caractéristique très importante pour les matériaux entrant dans la composition des assises de chaussées, soumise à des déformations périodiques dues au passage des véhicules et induisant un effet d'attrition entre les granulats.

L'essai de Micro-Deval est un essai dont le principe est de reproduire, dans un cylindre en rotation, des phénomènes d'usure. [15].

4.3.9 Propreté des granulats

Les autres propriétés des granulats seront abordées à l'occasion des aspects relatifs au béton qui en dépendent. Nous aborderons néanmoins la notion de propreté, les granulats peuvent contenir en quantité limitée (inférieure à 0,1 %) des déchets de bois, débris végétaux, charbon ou scories. par contre, ils ne doivent pas contenir d'hydrocarbures, d'huiles végétales ou des matières organiques, là encore, le cas du sable mérite une attention particulière.

On mesure également par un essai dit équivalent de sable (ES) la teneur en fines essentiellement argileuse du sable (ES=100 : sable pure ; ES=0 argile) [3].

Ile est préférable d'utiliser un sable ayant un ES compris entre 75 et 85. En effet, si l'ES est trop faible, la teneur élevée en argile risque d'engendrer des problèmes de variation dimensionnel du béton. A l'inverse, un sable trop propre (ES >85) manque de fines argileuses ce qui peut affecter les propriétés de mise en œuvre du béton et nécessitera une correction au niveau de la formation.

Tableau 5: ESV et ESP de sable.

ESV	ESP	Type de sable	Influence sur le béton
< 65	< 60	argileux	Risque de retrait au gonflement fort
>65	< 75	Très légèrement argileux	Retrait légèrement forte
75-85	70-80	Bon sable	Il convient pour béton de haute qualité
>85	>80	Sable manque de fines argileuse	Défaut de plasticité d'état

5 L'EAU DE GACHAGE

Toutes les eaux ne conviennent pas pour fabriquer un béton, les impuretés quelle contiennent peuvent affecter certaines propriétés du béton, allant de la consistance (aptitude a mise en œuvre) à l'esthétique (taches) en passant par la résistance et la durabilité.

L'eau peut avoir plusieurs origines. Tout d'abord l'eau potable, la plus facilement disponible, puis les eaux pompées dans les nappes phréatiques ou dans les cours d'eau, les eux de rejet industriels et enfin les eaux de recyclage de l'industrie du béton elle-même ; Pour évaluer l'aptitude d'une eau à être employée, différentes critères sont satisfaire :

- Sensoriels (olfactif ou visuels).
- Chimique (dosage des chlorures, sulfates phosphates, nitrates,.....).
- Mécanique (comparaison des cantiques de prise et de durcissement de mortier, l'un gâché avec l'eau potable, l'autre avec l'eau envisagée).

Toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un gout prononcé peut-être employée pour la fabrication du béton, [3]

L'eau doit satisfaire aux respections suivantes :

Tableau 6 : limites en % des constituants dans l'eau de gâchage.

Constituants	Limites en % de l'eau (en masse)		
	Béton précontraint	béton armé	béton non armé
Insoluble	< 0,2	< 0,2	< 0,5
Matières dissoutes	< 0,2	< 0,5	< 1,0
Carbonates + bicarbonates alcalins	< 0,1	< 0,1	< 0,1
sulfates en SO_3	< 0,1	< 0,1	< 0,1
sulfates en S	< 0,01	-	-
sucres	< 0,01	< 0,01	< 0,01
phosphates en P_2O_5	< 0,01	< 0,01	< 0,01
nitrates en NO_3	< 0,05	< 0,05	< 0,05
zinc	< 0,01	< 0,01	< 0,01
sodium (Na^+) et potassium (K^+)	< 0,1	< 0,1	
Acidité en PH	>4	>4	>4

5.1 RÔLE DE L'EAU DE GÂCHAGE

Lors du malaxage, l'eau est l'élément qui va donner une capacité d'écoulement au squelette compact formé par l'empilement des grains solides, ceci signifie que l'eau va venir desserrer le squelette compact afin de donner une mobilité aux grains suffisants pour permettre la mise en œuvre souhaitée.

Lorsque le béton est frais est mise en place, il se trouve dans une période dormante, qui précède le phénomène de prise puis le durcissement qui conduira aux performances mécaniques, ce changement d'état résulte de la réaction entre l'eau et le ciment qui forment des hydrates liaisonnant le squelette granulaires [3].

6 LES ADJUVANTS

Les adjuvants pour béton. Dont l'utilisation devient de plus en plus courante. Permettent d'améliorer ou de modifier plusieurs propriétés et caractéristiques du béton frais et du béton durci.

Toutefois avant de leur inclure dans un mélange de béton. Il faut être en mesure d'apprécier leur valeur et leur efficacité.

En effet, certaines conditions améliorent l'efficacité de ces produits tandis que d'autres tendent à la réduire. De plus, certains adjuvants se nuisent mutuellement lorsqu'ils sont utilisés ensemble. Il faut donc évaluer les avantages de l'emploi d'un adjuvant par rapport aux inconvénients et au coût supplémentaire qui y sont reliés [16].

6.1 DEFINITION

Les adjuvants sont des produits chimiques qui incorporés dans le béton lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieure à 5% du poids de ciment. Provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci.

Un adjuvant n'est pas un palliatif, il n'a ni pour mission ni pour effet de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre défectueuse. Ce n'est pas un produit capable de se substituer aux règles de la bonne technique [2].

6.2 CLASSIFICATION DES ADJUVANTS

Un adjuvant a en générale, une action principale d'après laquelle il se trouve classé et défini, mais il peut présenter également certaines actions secondaires que l'on appelle généralement effet secondaires.

Les normes européennes retiennent la classification suivante :

- Plastifiants réducteur d'eau.
- Super plastifiants hautement réducteur d'eau.
- Rétenteur d'eau.
- Entraîneurs d'air.
- Accélérateur de prise.
- Accélérateur de durcissement.
- Retardateur de prise.
- Hydrofuges.

6.2.1 *Plastifiant réducteur d'eau*

Ce sont des produits qui viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment. Ils provoquant une défloculation des grains et une lubrification de la pâte. Ce processus permet soit une amélioration de la maniabilité sans augmenter le dosage en eau, soit une réduction du rapport E/C. donc une augmentation des résistances mécaniques, sans modifier la maniabilité. Ils doivent par rapport au béton témoin, assurer une résistance à la compression de 110 % minimum et permettre une réduction du dosage en eau d'au moins 5 %.

6.2.2 *Rétenteur d'air*

Ce sont des produits d'addition généralement en poudre qui ont pour fonction principale de réduire la tendance au ressuage des bétons.

On utilise généralement des méthyles cellulose qui ont la propriété d'augmenter de volume en fixant l'eau libre du béton.

Les rétenteurs d'eau sont utilisés pour améliorer la cohésion des bétons fluides dont le sable manque d'éléments fins ou à faible dosage en ciment.

6.2.3 *Super plastifiant hautement réducteur d'eau*

Le mode d'action est similaire à celui des plastifiants, mais il se produit avec une intensité bien plus importante. Par rapport qu béton témoin fabriqué identiquement mais sans superplastifiant, à maniabilité égale, il doit permettre une réduction d'eau minimale de 12 %, en fait ce pourcentage est généralement réduit de 15 à 25 % suivant le dosage concernant les résistances à la compression elles doivent être de 140% à 1 jours et de 115% à 28 jours.

Ce sont tous des produits de synthèse dont les plus utilisés sont les résines mélamines sulfonées, les naphthalène-sulfonates et, plus récemment formulés, les vinyles sulfonates. Une de leurs principales caractéristiques est leur durée d'efficacité limitée dans le temps : un béton fluidifié avec une résine mélamine retrouve sa maniabilité initiale en moins de 30 minutes à une température de 23 C°. C'est pourquoi ils sont fréquemment utilisés en combinaison avec des adjuvants retardateurs de prise, à l'exclusion semble-t-il des vinyles sulfonates qui ont une durée d'efficacité plus longue. Selon le plan pratique, il est préférable d'introduire le superplastifiant le plus tard possible lors du malaxage du béton.

6.2.4 *Entraineur d'air*

Ce sont des composés d'addition généralement à base de résine de synthèse : résine vinsol, aryl alkyl sulfonâtes, aïde gras...etc.

Les entraineurs d'air se présentent sous forme de liquides, de sels solubles ou de poudres insolubles à ajouter au moment du malaxage.

Ces adjuvants introduisent volontairement de l'air agissent en stabilisant les bulles générées lors du malaxage, sous forme d'un très grand nombre de microbulle, dont 80 % d'entre d'elles ont un diamètre inférieur à 100 microns, la plupart étant comprises entre quelques microns et quelques dizaines de microns. Ces microbulles ne doivent pas être confondues avec l'air occlus, constitué de bulles de tous diamètres généralement supérieurs de 1 mm, réparties aléatoirement dans le béton, qui se trouvent emprisonnées pendant la mise en place.

Il améliore essentiellement :

- ✓ La plasticité et l'ouvrabilité du béton, les bulles agissent comme autant de grains fins analogues à de petites billes souples et sans frottement.
- ✓ La résistance au gel du béton durci (antigélif) ; les très nombreuses petites bulles d'air disséminées dans la masse constituant en effet autant de petits vases d'expansion dans le réseau de canalicules interne pour l'eau interstitielle dont le volume augmente avant la prise en glace ; cela évite la dégradation du béton par le gel de cette eau.

La quantité d'air entrainé pour une bonne protection contre le gel est d'autant plus grande que la dimension des granulats est plus faible.

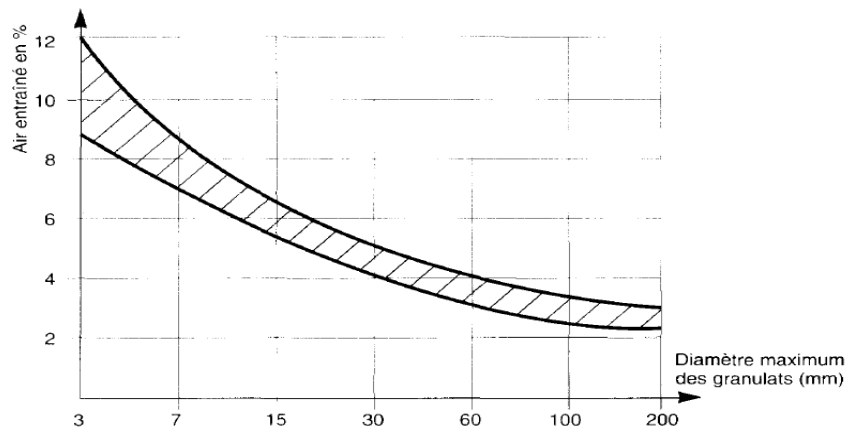


Figure 13: Pourcentage d'air entrainé recommandé suivant la grosseur des granulats.

6.2.5 Accélérateurs de prise

Ce sont des produits solubles dans l'eau et qui agissent chimiquement en augmentant la vitesse d'hydratation du ciment, cela entraîne un déclenchement plus rapide du phénomène de prise et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important.

Les accélérateurs seront donc tout particulièrement employés pour les bétonnages par temps froids ou pour les travaux urgents.

On distingue :

- ✓ Accélérateur de prise : alcalis, carbonates et sulfates de soude ou de potasse, utilisés surtout par temps froid.
- ✓ Les accélérateurs du durcissement : chlorures et carbonates, plus généralement employés afin de réduire certains délais pour décoffrer ou manutentionner les pièces.

Il y a lieu de noter que si les résistances initiales sont augmentées, les résistances à 28 jours peuvent être légèrement diminuées (Figure 4).

6.2.6 Retardateurs

Ils agissent chimiquement comme les accélérateur de en retardant plus ou moins longtemps l'hydratation et le début de prise du ciment.

Parmi les produits retardateurs de prise on peut citer :

- ✓ Les sucres et gluconates.
- ✓ Les acides citriques et tartriques.
- ✓ L'oxyde de zinc
- ✓ Les phosphates alcalins.

Les doses à utiliser sont en général très faible (de l'ordre de 0,1 % en extrait sec) et les produits commerciaux sont dilués, il convient de veiller à une bonne répartition du produit dans la masse. Les retardateurs diminuent évidemment les résistances initiales mais ils augmentent souvent les résistances finales.

Ces produits sont employés en particulier :

- Pour les bétonnages par temps très chaud.
- Pour les transports de béton sur grand distances.
- Pour des reprises de bétonnage [2].

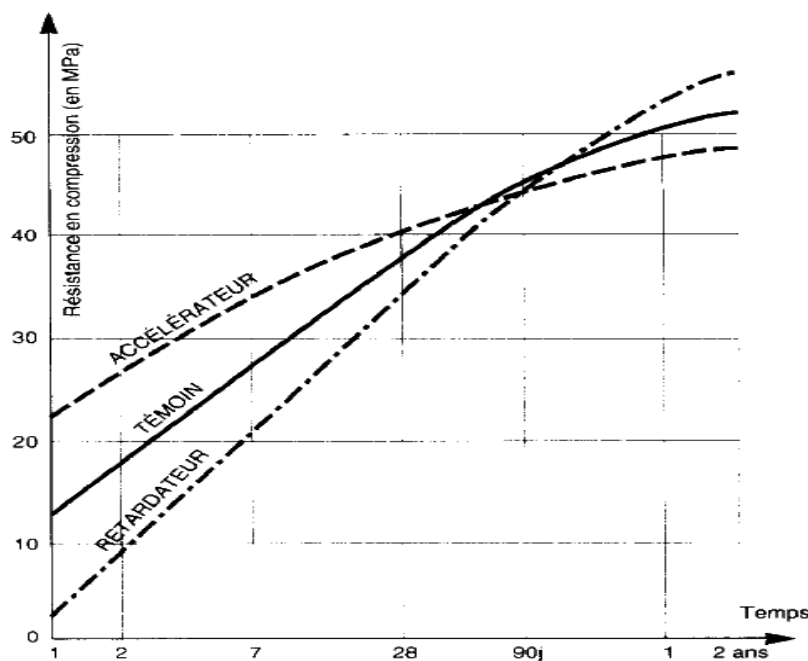


Figure 14 : schéma de l'influence comparée d'un accélérateur et d'un retardateur de prise sur l'évolution des résistances.

6.2.7 Hydrofuges

Ce sont des produits qui réduisent la perméabilité aux fluides et/ou l'absorption capillaire. Ils agissent physiquement en bouchant les pores capillaires grâce à leurs particules hydrophobes à hautes surfaces spécifiques. Il peut se créer des précipités insolubles par réaction avec la chaux, créant ainsi des cristaux légèrement expansifs qui bouchent les capillaires.

Les agents hydrofuges sont utilisés dans les enduits, les chapes étanches, les citernes, les réservoirs, les piscines, dans tout domaine où le mortier est en contact avec l'eau. Leur proportion par rapport à la masse de ciment est de l'ordre de 0,1 % à quelques pour-cent [17].

CONCLUSION

Cette analyse bibliographique a montré qu'il existe d'autres produits que le clinker entre dans la composition des ciments. Ces produits ont plusieurs provenances, peuvent être naturels, artificiels, ou des déchets des autres industries. L'incorporation de ces produits dans le ciment donnant la classification des ciments courants, et permet d'améliorer certaines propriétés de ciments (mécanique, rhéologiques...etc.).

Ainsi que l'utilisation de ces matériaux contribue dans la réduction des coûts de ciment, et le taux de clinker utilisé dans le ciment (avantage économique), et permet même de préserver la nature (avantage écologique).

La bonne caractérisation des composants de béton et leurs choix de façon convenable conduisent à la confection des bétons de bonnes qualités.

Partie

Expérimentale

PARTIE EXPERIMENTALE

1. INTRODUCTION :

Comme mentionné auparavant, l'objectif de cette partie expérimentale de notre travail de recherche est d'étudier l'effet des différents modes d'incorporation de filler calcaire sur les propriétés du béton. On fixant le taux d'introduction à 10 %, soit avec addition ou substitution, pondérale et volumétrique par rapport à la masse du ciment. Cette étude est basée sur deux paramètres intrinsèques de béton : l'affaissement et le rapport E/L (eau/liant).

L'objet de ce chapitre est la présentation des matériaux utilisés pour la confection des différents mélanges des bétons étudiés et la méthodologie adoptée lors du travail de recherche expérimentale. La composition des bétons étudiés est formulée selon la méthode de Dreux-Gorisse.

2. LES CONSTITUANTS :

2.1 LE CIMENT :

Le liant utilisé dans notre étude est un ciment portland composé, dont les caractéristique physico mécaniques et chimiques satisfont aux exigences des ciments CPJ CEM II/A 52,5 R, avec ajouts de calcaire, produit par la cimenterie de M'SILA ACC.

Les caractéristiques chimiques, minéralogiques, physiques et mécaniques sont données dans les tableaux suivants.

Tableau 1: Caractéristiques mécaniques du ciment CEM II/A 52,5 R (MPa).

Echéances	Flexion	Compression
02 jours	4,8	30,3
07 jours	6,3	44,7
28jours	6,9	57,2

Tableau 2: Composition chimique du ciment CEM II/A 52,5 R.

Eléments	Teneur (%)
SiO₂	20,84
Al₂O₃	3,47
Fe₂O₃	0,23
CaO	64,93
MgO	0,69
K₂O	0,50
Na₂O	0,08
SO₃	2,51
CaO	1,6
Cl⁻	0,072
Ins	0,48
P.F	6,540

Tableau 3 : Caractéristiques physiques du ciment CEM II/A 52,5 R.

Consistance normale	H ₂ O	29,2
Temps de prise (mm)	Début	155
	Fin	270
Stabilité (mm)	Froid	-
	Chaud	00
Essai de retrait (µm/m)	03 jours	222
	07 jours	463
	28 jours	869
Essai de gonflement (µm/m)	03 jours	0
	07 jours	0
	28 jours	0
Masse volumique absolue du ciment (g/cm ³)		3,03
SSB (cm ² /g)		4752

Tableau 4: Composition minéralogique du ciment CEM II/A 52,5 R.

phase	Minéraux	Teneur (%)
Clinker	C ₃ S	54
	C ₂ S	25
	C ₃ A	13
	C ₄ AF	-
	CaO _L	02
Régulateur de prise	Gypse	06
ajout	calcaire	10

2.2 LES GRANULATS :

Les granulats sont les matières inertes, constituent le squelette de béton, de dimension comprise entre 0 et 125 mm. Les granulats utilisés proviennent de la carrière de KADDARA.

2.2.1 Le sable :

L'analyse granulométrique par tamisage de sable est résumée dans le tableau 5.

Tableau 5 : Analyse granulométrique de sable de KADDARA.

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus (%)	Passants(%)
0,08	00	00	1,12
0,16	1,8	0,18	6,22
0,315	32,3	3,23	18,84
0,63	388,4	38,84	35,67
1,25	643,3	64,33	61,16
2,5	811,6	81,16	96,77
5	937,8	93,78	99,82
6,3	988,8	98,88	100
Module de finesse		2,82	

Les propriétés physiques de sable sont données dans le tableau 6.

Tableau 6 : Propriétés physique de sable

Equivalent de sable	90 %
Masse volumique apparent	1,47
Masse volumique absolue	2,60

Le sable utilisé est un sable grossier ($M_f > 2,80$) avec manque de fines argileuses.

2.2.2 Les graviers :

L'analyse granulométrique des graviers est résumée dans les tableaux 7, 8 et 9 :

Tableau 7: Analyse granulométrique des Graviers 3/8

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus (%)	Passant (%)
10	00	00	100
8	42,8	2,14	97,86
6,3	567,8	28,39	71,61
5	1388,2	69,41	30,59
2,5	1990,2	99,51	0,49
1,25	1996	99,8	0,2

Tableau 8 : Analyse granulométrique des graviers 8/15

Tamis	Refus (g)	Refus (%)	Passant (%)
16	00	00	100
12,5	316,4	9,04	90,96
10	1565,2	44,72	55,28
8	2842,35	81,21	18,79
6,3	3460,45	98,87	1,13
5	3487,4	99,64	0,36

Tableau 9 : Analyse granulométrique des graviers 15/25

Tamis	Refus (g)	Refus (%)	Passant (%)
31,5	00	00	100
25	69	1,38	98,62
20	2008,5	40,17	59,83
16	3743	74,86	25,14
12,5	4932,5	98,47	1,53
10	4985	99,7	0,3

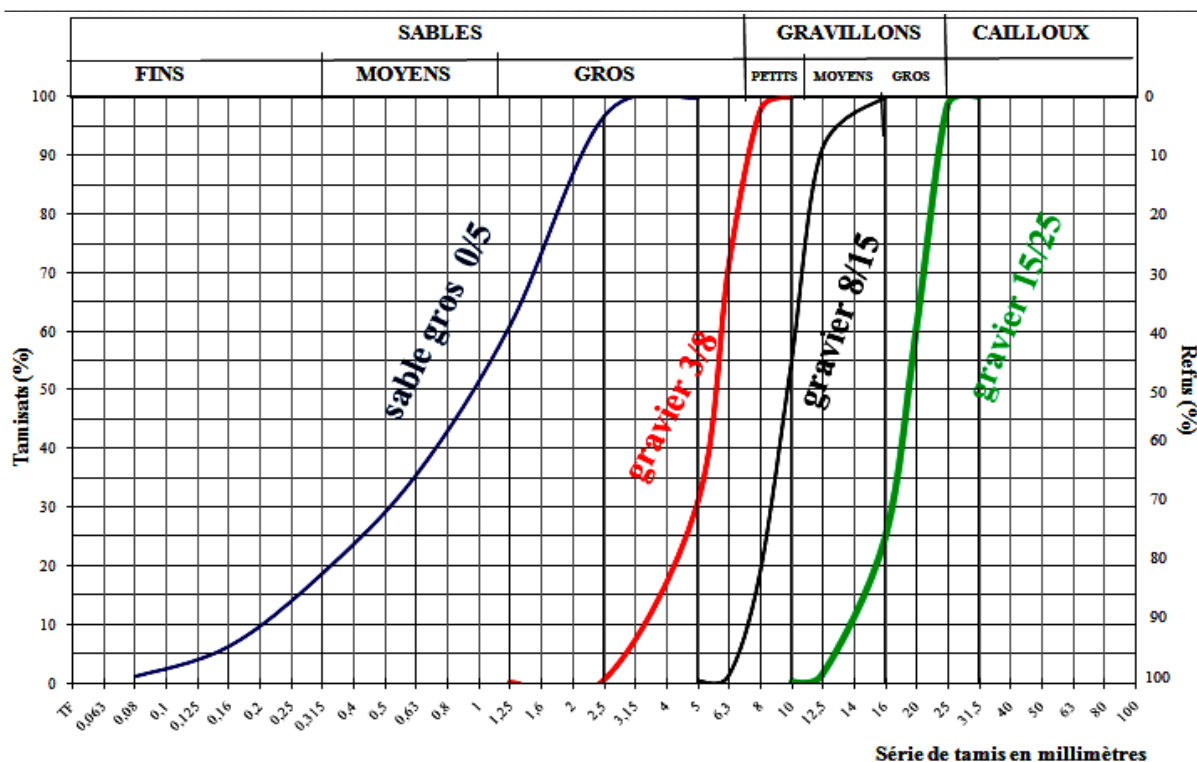


Figure 1 : Courbes granulométriques des granulats.

D'après l'analyse granulométrique, on peut conclure que l'ensemble des granulats ont une granulométrie continue. Les caractéristiques physiques et mécaniques des graviers sont résumées dans les tableaux 10 et 11.

Tableau 10 : Caractéristiques physiques des graviers.

Caractéristique	Type de gravier		
	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,64	2,64	2,64
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1360	1420	1370
Coefficient d'aplatissement(%)	-	11,2	8,86
Coefficient d'absorption(%)	0,35	0,35	0,4

Tableau 11 : Caractéristiques mécaniques des graviers.

Caractéristiques	Type de gravier		
	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
Los Angeles (%)	20,17	20,15	22,75
Micro Deval (%)	15,15	15,18	16

2.3 FILLER CALCAIRE :

On a utilisé des fillers calcaires provenant de la cimenterie de MEFTAH.

Tableau 12 : Caractéristiques physique des fillers calcaires.

SSB (cm ² /g)	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (kg/m ³)
7745	2,68	950

La composition chimique des fillers calcaire (tableau 13) est déterminée par fluorescence X au niveau de CETIM-Boumerdès.

Tableau 13: Analyse chimique des fillers calcaires.

élément	Taux (%)
Perte au feu	41,96
SiO₂	0,53
Al₂O₃	1,25
Fe₂O₃	0,51
CaO	52,89
MgO	0,39
SO₃	0,06
K₂O	0,08
Na₂O	0,12
P₂O₅	0,11
TiO₂	0,08



Figure 2: Fillers calcaire (avant et après broyage).

2.4 ADJUVANT :

On a utilisé comme adjuvant un superplastifiant ‘ADVAFlow 390’, c’est un superplastifiant de nouvelle génération, haut réducteur d’eau, il confère au béton une grande ouvrabilité et une rétention de slump pour les coulages difficiles même à haute température. Les caractéristiques techniques de l’adjuvant sont reportées dans le tableau 14.

Tableau 14 : caractéristiques techniques de l’adjuvant ADVAFlow 390.

Aspect	Liquide claire opaque
Densité	1,050 ± 0,02 20 C°
Teneur en chlorure	< 0,1 %
Air entraîné	1,5 %
Durée de conservation	12 mois
Dosage	0,5 à 1,5 % du ciment



Figure 3 : Adjuvant ADVA Flow 390

3. BÉTONS ÉTUDIÉS

3.1 BETON TEMOIN

La formulation des bétons étudiés est réalisée selon la méthode de Dreux-Gorisse. Cette méthode a pour but de réaliser une composition du béton à partir de son ouvrabilité et de la résistance recherchée. Ces deux qualités sont liées par des abaques selon le dosage en ciment connu.

Les proportions des différents granulats sont déterminées par le biais de la courbe de référence. Cette courbe est tracée à travers les courbes granulométriques des granulats utilisés. Un coefficient de compacité est donné au béton, il permet avec la connaissance des masses volumiques des granulats, de déterminer les dosages pondéraux des constituants.

Quelques essais préliminaires de plasticité doivent avoir lieu pour fixer le dosage en eau afin d'adapter la maniabilité désirée.

Nous avons réalisé une formulation avec les critères suivants :

- ✓ béton plastique.
- ✓ résistance souhaitable 30 MPa.
- ✓ Affaissement de cône d'Abrams = 8 cm.
- ✓ Granulats concassé.
- ✓ Qualité des granulats : bonne, courante.
- ✓ Vibration normale.

3.1.1 Dosage en ciment et en eau :

On commencera par évaluer approximativement le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée :

$$f_c = G F_{CE} (C/E - 0,5) \quad [2]$$

Où :

f_c : Résistance moyenne en compression désirée à 28 jours (MPa).

G : coefficient granulaire (tableau 15).

F_{CE} = résistance vraie de ciment utilisé.

D_{max} = 25

C : dosage en ciment (Kg/m³)

E : dosage en eau.

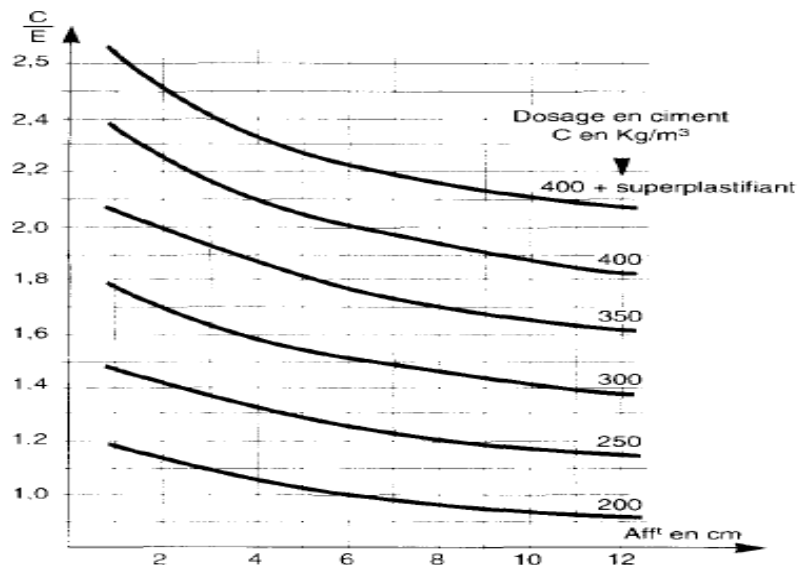
Tableau 15 : coefficient granulaire G

Qualité des granulats	Dimension maximale D des granulats		
	Fin $D \leq 16 \text{ mm}$	Moyen $25 \leq D \leq 40$	Gros $D \geq 63$
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
passable	0,35	0,40	0,45

$$C/E = f_{c.} / (G F_{CE}) + 0,5$$

$$C/E = 1,81.$$

Le dosage en ciment est donc fonction de C/E mais également du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. L'abaque de la figure 4 permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée du problème [2].

**Figure 4:** abaque permettant la détermination de C_{opt} .

Dosage en ciment $C = 380 \text{ kg}$ pour 1 m^3 du béton.

On déduit le dosage en eau : $E = C/1,81 = 210 \text{ litres}$ pour 1 m^3 du béton.

Le dosage en eau corrigé en fonction de la dimension maximale des granulats (tableau16). Dans notre cas, il n'y a pas de correction à faire ($D_{max} = 25 \text{ mm}$).

Tableau 16 : correction du dosage en eau

Dimension maximale des granulats en mm	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau %	+ 15	+ 9	+ 4	0	-4	-8	-12

3.1.2 Dosage en granulats :

D'abord, on trace la courbe granulaire de référence OAB (figure 5).

D_{max} égale à 25 mm ; L'abscisse du point A est au milieu du segment limité par les modules 00 et 25.

Son ordonné : $Y_A = 50 - \sqrt{D} + K + K_S + K_P$.

Y : exprimé en pourcentage %.

D : en mm

K : terme correcteur ; $K = k + K_S + K_P$; avec :

$K_S = 6 M_f - 15$, Si $M_f \neq 2,5$

K_P : correction supplémentaire dans le cas d'un béton pompé.

k : donner dans le tableau 17

Tableau 17 : Terme correcteur k pour la fixation de l'ordonnée y de la courbe de référence

		Dosage du ciment (Kg/m ³)					
Vibration	Forme de granulats	400 + fluidifiant	400	350	300	250	200
Faible	Roulé	-2	0	+2	+4	+6	+8
	Concassé	0	+2	+4	+6	+8	+10
Normale	Roulé	-4	-2	0	+2	+4	+6
	Concassé	-2	0	+2	+4	+6	+8
Puissante	Roulé	-6	-4	+2	0	+2	+4
	Concassé	-4	-2	0	+2	+4	+6

D'après le tableau 17 :

$$K = +2$$

Le module de finesse de notre sable est de $2,82 \neq 2,5$: $K_S = (6 \times 2,82) - 15 = 1,92$

Donc l'ordonnée de point A est : $Y_A = 50 - \sqrt{25} + 2 + 1,92$

$$Y_A = 48,92 \%$$

Les coordonnées de courbe de référence est donc :

- ✓ Le point O : (0 ; 0)
- ✓ Le point A : (12,5 ; 48,92)
- ✓ Le point B : (25 ; 100%).

Pour obtenir les proportions des granulats, on doit tracer les lignes de partage en joignant le point 95 % de la première courbe avec le point 5% de la courbe suivante, les points de croisement entre chacune des lignes de partage et ceux de la courbe de référence représentent le pourcentage de chaque granulats.

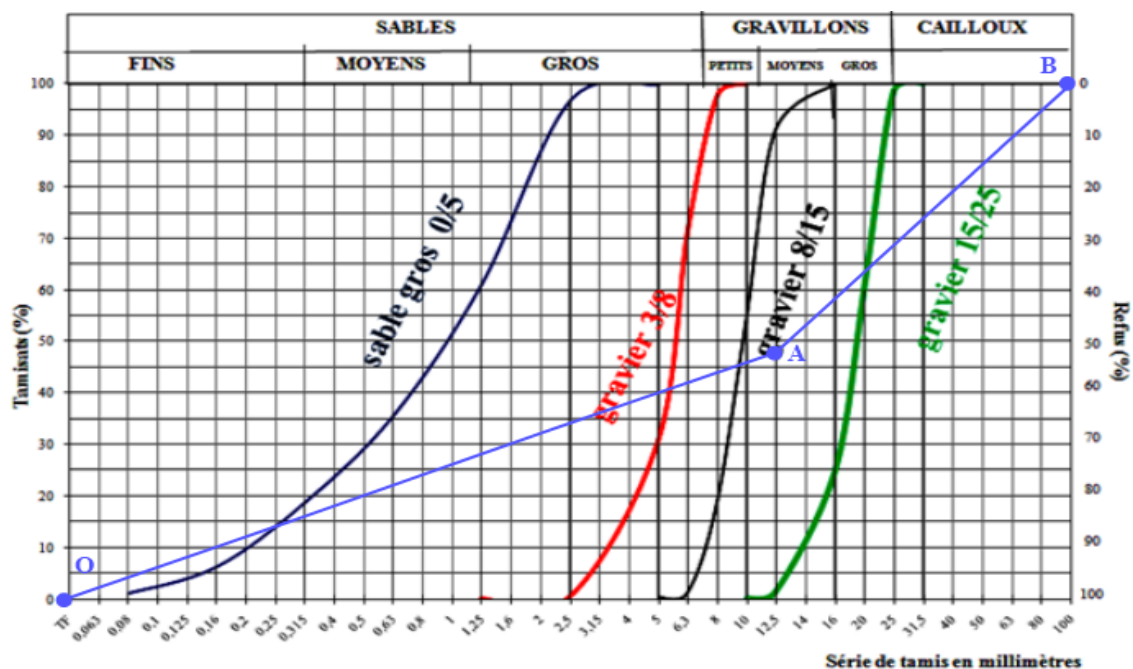


Figure 5: Courbes granulométriques et de référence.

➤ **pourcentage des granulats :**

Tableau 18 : les pourcentages des granulats

Type de granulats	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
Pourcentage (%)	34	9	9	48

Pour déterminer le volume et la masse des granulats, on détermine d'abord le coefficient de compacité (γ) qui est donné par le tableau 19 :

Tableau 19: valeurs du coefficient de compacité

Consistance	Serrage	Coefficient de compacité						
		D=5	D=10	D=15	D=25	D=40	D=63	D=100
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,830	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,885	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

D'après le tableau 19, coefficient de compacité γ égale à 0,825

$$\gamma = \frac{V_c + V_s + V_g}{1000}$$

Avec :

V_c : volume absolue du ciment en litres.

V_s : volume absolue du sable en litres.

V_g : volume absolue du gravier en litres.

Le volume total (V_t) des granulats V est donc :

$$V_t = V_g + V_s = 1000 \gamma - V_c$$

$V_c = (\text{masse du ciment} / \text{masse volumique du ciment})$

$$V_c = \frac{380}{3,1} = 123 \text{ litres}$$

$$V_t = 1000$$

$$V_t = 1000 (0,825) - 123 = 703 \text{ litres.}$$

➤ Volume des granulats :

Après qu'on a déterminé les pourcentages des granulats, le volume de chaque type des granulats pour 1 m^3 est calculé :

$$V_{\text{granulats}} = V_t \frac{G\%}{100}$$

Tableau 20: volume des granulats pour 1 m³ de béton.

Type de granulats	sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
Volume (litres)	238,68	63,18	63,18	336,96

Masse des granulats :

Après qu'on a déterminé les volumes des granulats, on déduit leurs masses pour 1 m³ de béton :

$$M = \rho \cdot V$$

Tableau 21 : Masse des granulats pour 1m³ de béton.

Type de granulats	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
Volume (l)	238,68	63,18	63,18	336,96
Masse volumique Absolue (g/cm ³)	2,64	2,64	2,64	2,66
Masse (kg)	630,11	166,79	166,79	896,31

➤ La composition du béton témoin pour 1m³ :

Tableau 22: Composition du béton témoin (pour 1m³).

Gravier (kg)	3/8	166,79
	8/15	166,79
	15/25	896,31
Sable (kg)		630,11
Ciment (kg)		380
Eau (kg)		210
Adjuvant 1 %		3,8
Masse volumique du béton (kg/m³)		2240
G/S		1,95
E/C		0,55

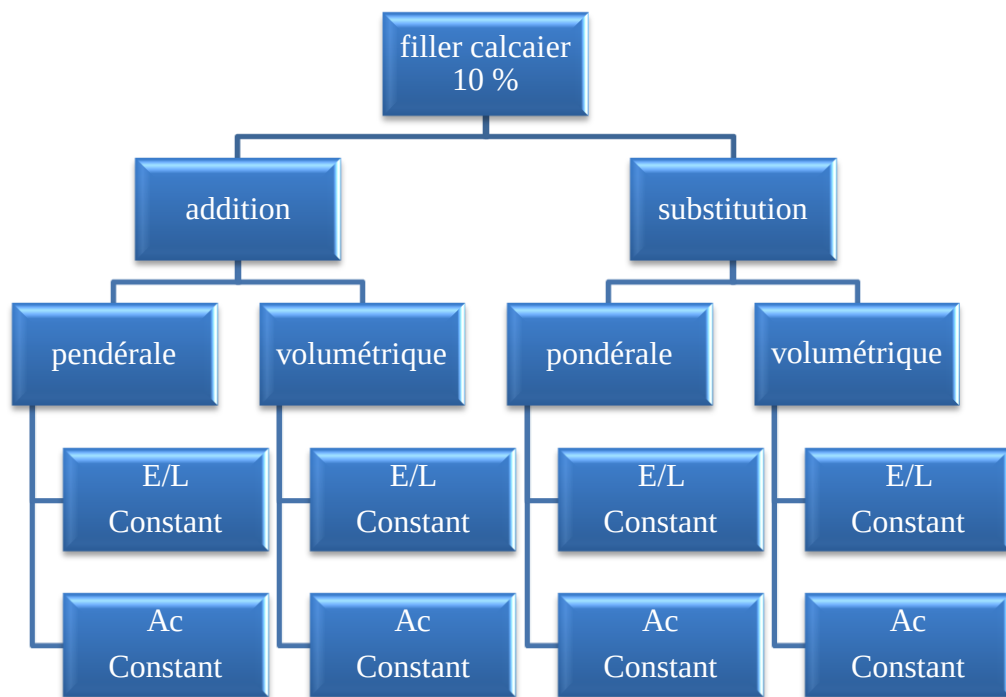
3.2 BETON AVEC FILLER CALCAIRE :

Le béton d'étude est un béton témoin avec ajout de filler calcaire à différent mode d'incorporation. La méthodologie du travail est représentée par la figure 6.

Le taux d'incorporation de filler calcaire dans le béton est fixé à 10 % par rapport à la masse du ciment, le dosage en granulats est constant et le dosage en ciment est varié selon le mode d'introduction de filler calcaire. Une précaution pour le dosage en eau est à prendre en considération, dans le cas où on fixant le rapport E/L.

Tableau 23 : Composition des bétons d'étude avec ajout de filler calcaire.

	Dosage en ciment (kg)	Dosage en filler (kg)	Dosage en eau pour E/L constant (l)
Addition pondérale	380	38	230
Addition volumétrique	380	32,83	227
Substitution pondérale	342	38	210
Substitution volumétrique	347,17	32,83	210

**Figure 6** : Schéma récapitulatif de la méthodologie du travail.

4. RESULTATS D'ESSAIS ET INTERPRETATIONS

Nous présenterons dans cette partie les résultats des essais expérimentaux effectués sur les bétons avec ajouts de filler calcaire, selon différents mode d'incorporation. Ces résultats portent sur les caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci et les comparer avec les résultats de béton témoin.

La légende suivante est adoptée pour la suite des résultats :

-  Addition Pondérale : AP
-  Addition Volumétrique : AV
-  Substitution Pondérale : SP
-  Substitution Volumétrique : SV
-  Béton Témoin : BT

3.1 BETONS AVEC RAPPORT EAU/LIANT CONSTANT ($E/L = 0,4$)

3.1.1 Effet sur l'affaissement au cône d'Abrams

La figure 7, présente la variation de l'affaissement au cône d'Abrams des diverses compositions de bétons, pour les modes d'introduction des fillers calcaire par addition et par substitution "calcul volumétrique et/ou pondéral", comparés au béton témoin. On voit clairement, que dans le cas d'addition l'affaissement est plus grand (18 cm) et s'approche de celui du témoin (17cm), alors que dans le cas de substitution il est plus faible (14 cm) pour le calcul volumétrique et 10 cm pour le calcul pondéral. Dans le cas de substitution, on a moins de ciment et les fillers calcaire absorbe l'eau de gâchage ceci entraine la diminution de l'affaissement. Cette diminution est plus grande dans le cas de substitution pondérale du fait de la quantité plus importante de fillers calcaire introduite.

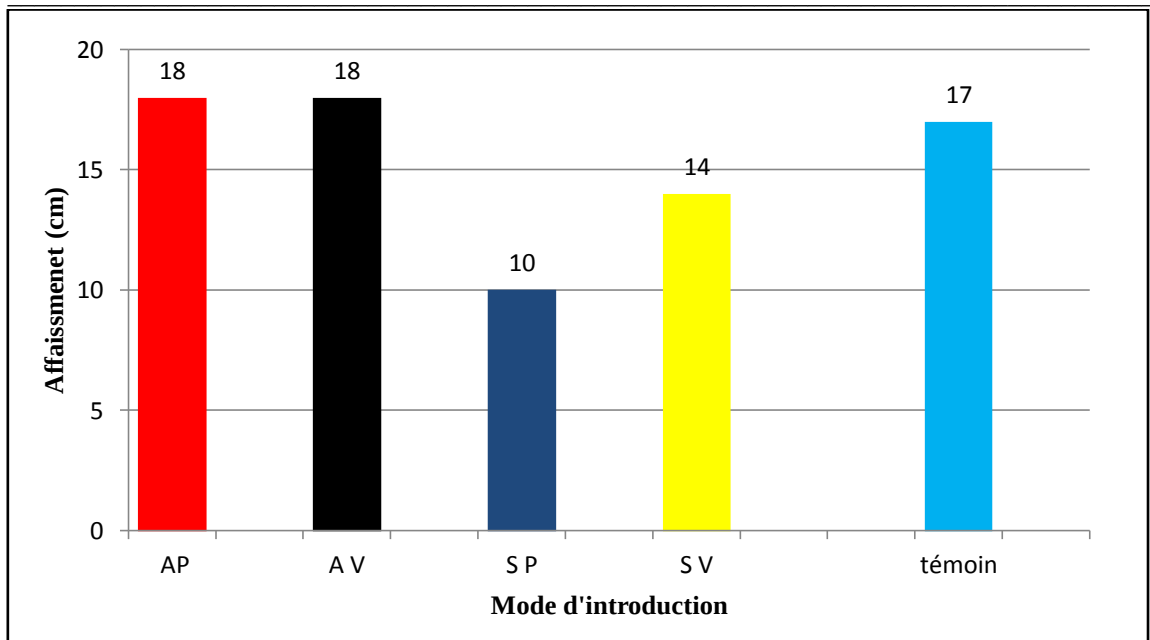


Figure 7: Variation de l'affaissement au cône d'Abrams en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

3.1.2 Effet sur les masses volumiques :

L'effet des fillers calcaire sur la masse volumique à l'état frais et durci pour les différents modes d'introduction dans le béton est présenté sur les figures 8 et 9. D'après ces figures on remarque que les masses volumiques des bétons à l'état frais sont légèrement faibles par rapport au témoin. Alors qu'à l'état durci sont légèrement plus grandes que celle du béton témoin, conséquence de la densification de la matrice par les fillers calcaire.

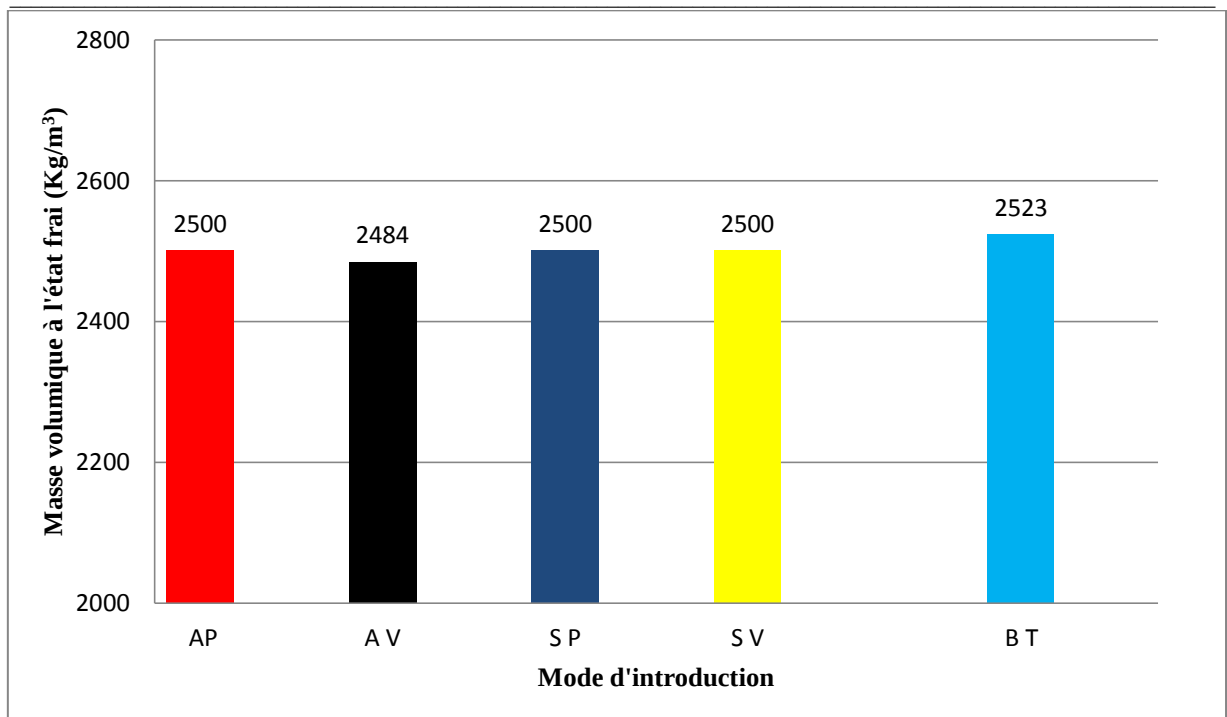


Figure 8: Variation de masse volumique à l'état frais en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

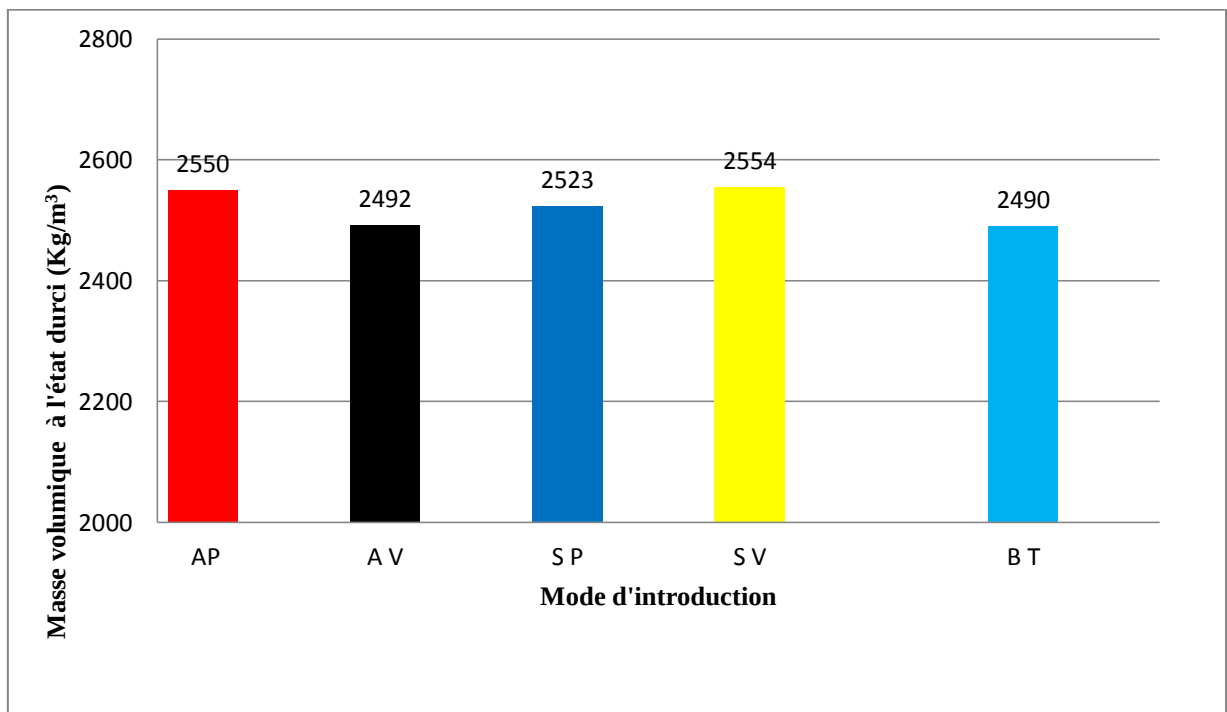


Figure 9: Variation de la masse volumique à l'état durci en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

3.1.3 Effet sur l'absorption d'eau :

La densification de la matrice des bétons par les fillers calcaire, induit la diminution de l'absorption d'eau (Figure 10). Les fines pénètrent dans les zones et les endroits empêchés pour les grains de ciments. Ces interstices sont mieux remplis, d'où on aura moins de vide, et par conséquent une structure plus compacte. En conclusion, le mode d'introduction des fillers calcaire, n'influe pas sur cette caractéristique.

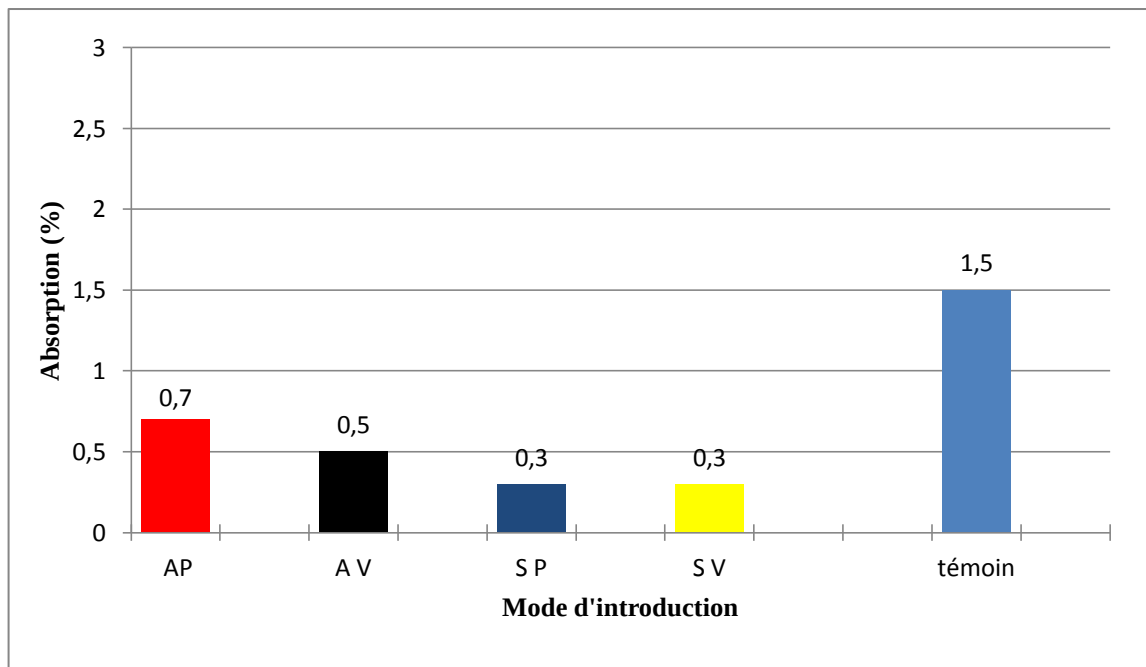


Figure 10: Variation de l'absorption du béton en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

3.1.4 Effet sur la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques:

Les valeurs de la vitesse de propagation d'ondes à travers les bétons pour les différents modes d'incorporation des fillers calcaire sont présentées sur la figure 11. D'après ces valeurs, on constate, une faible augmentation des vitesses de propagation d'ondes des bétons avec ajout comparé au béton témoin.

L'évolution des vitesses de propagation d'ondes présente un comportement tout à fait similaire à celui de l'absorption d'eau. L'augmentation des vitesses de propagation d'ondes avec ajout de filler calcaire peut être expliquée par l'augmentation de la densité des mélanges, indifféremment du mode d'incorporation.

La qualité de béton à l'aide de la vitesse de propagation des ondes ultrasonique représentée dans le tableau 24, on constate que les bétons ont des excellentes qualités.

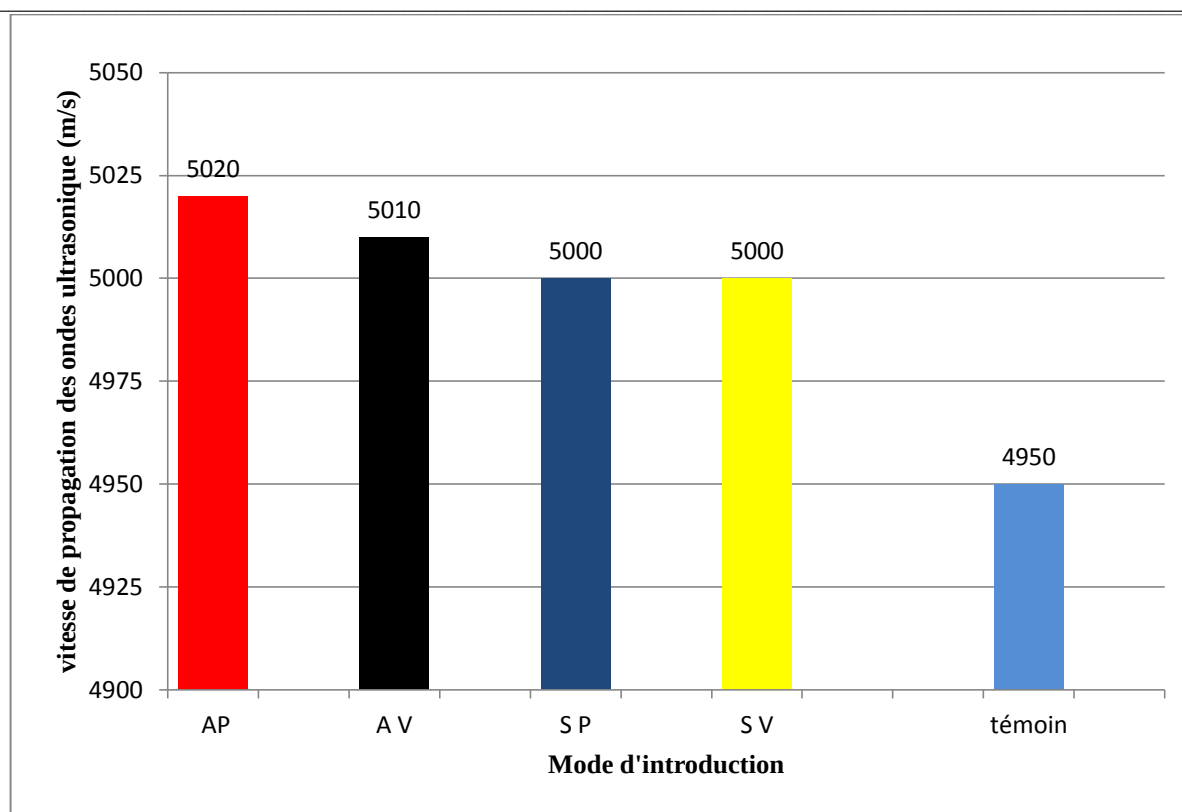


Figure 11 : Variation de propagation des ondes ultrasonique en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

Tableau 24 : qualité de béton en fonction de vitesse de propagation

Vitesse (m/s)	Qualité de béton
< 2134	Très mauvaise qualité
$2134 \leq V < 3048$	Mauvaise qualité
$3048 \leq V < 3658$	Douteuse
$3658 \leq V < 4572$	Bonne
$V \geq 4572$	excellent

3.1.5 Effet sur les résistances mécaniques :

De la figure 12 on constate, que le mode d'introduction par addition volumétrique des fillers calcaire à influence significative sur le développement des résistances à la compression. Les plus faibles valeurs de résistances mécaniques à la compression, sont obtenues pour le mode d'addition pondérale.

La résistance à la traction par flexion augmente avec le dosage volumique par substitution et il est plus faible pour dosage volumétrique par addition (figure 13).

D'une façon générale, les résultats de la figure 14 montrent que l'introduction des fillers calcaire dans les bétons, améliore les résistances à la traction par fendage. Cette augmentation est plus accrue par voie d'addition pondérale.

En conséquence, le comportement mécanique des bétons avec ajout de calcaire est distinct d'un mode d'introduction à un autre, selon la caractéristique mécanique ciblée (compression, flexion et fendage).

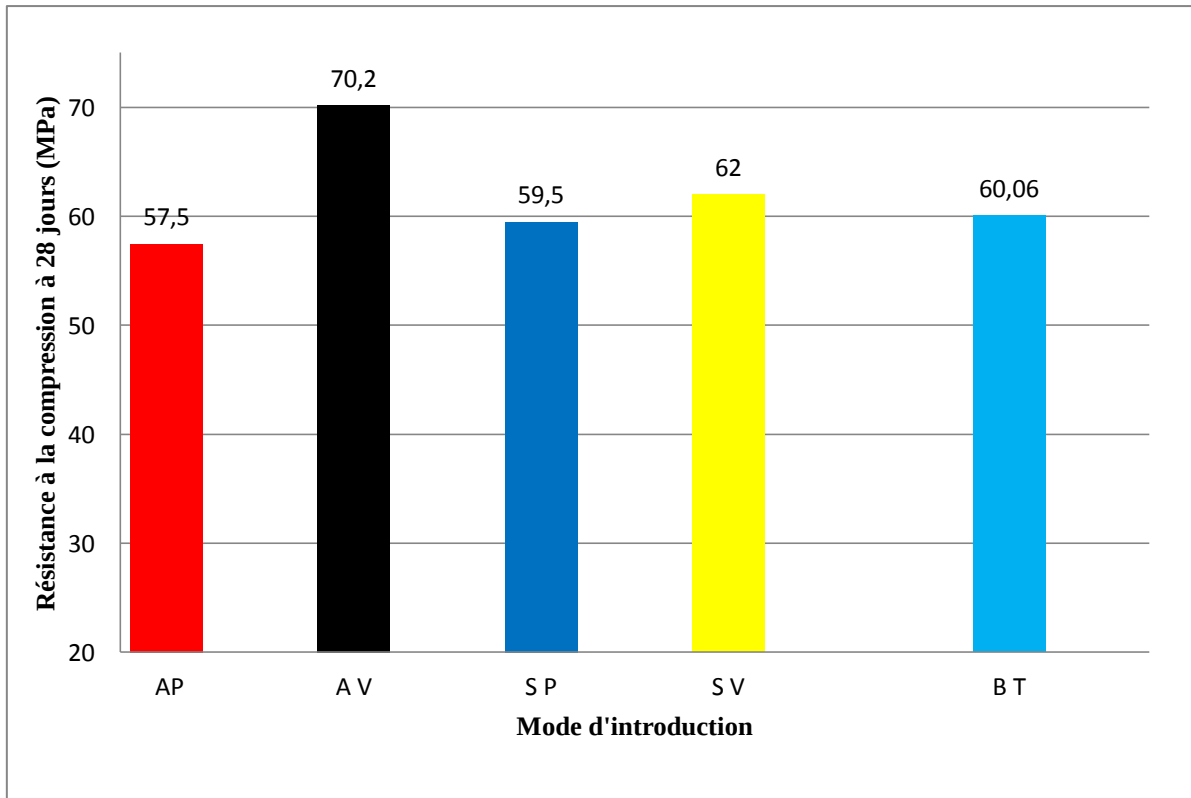


Figure 12: Variation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

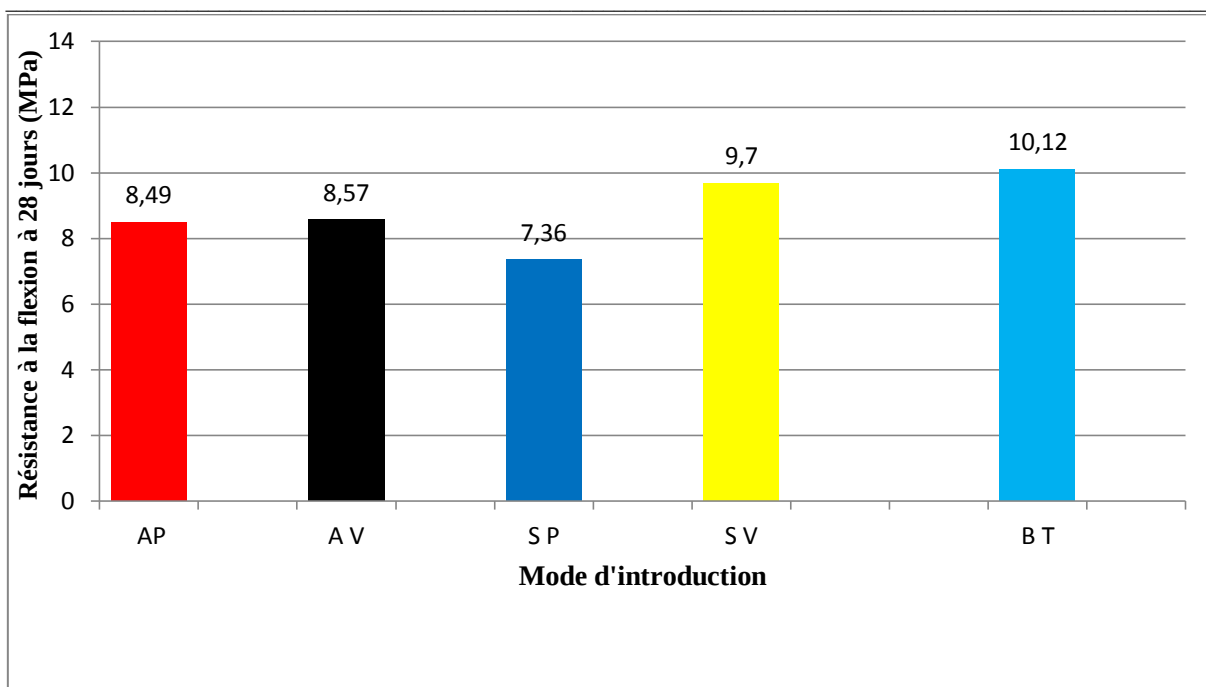


Figure 13: Variation de la résistance à la flexion à 28 jours en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

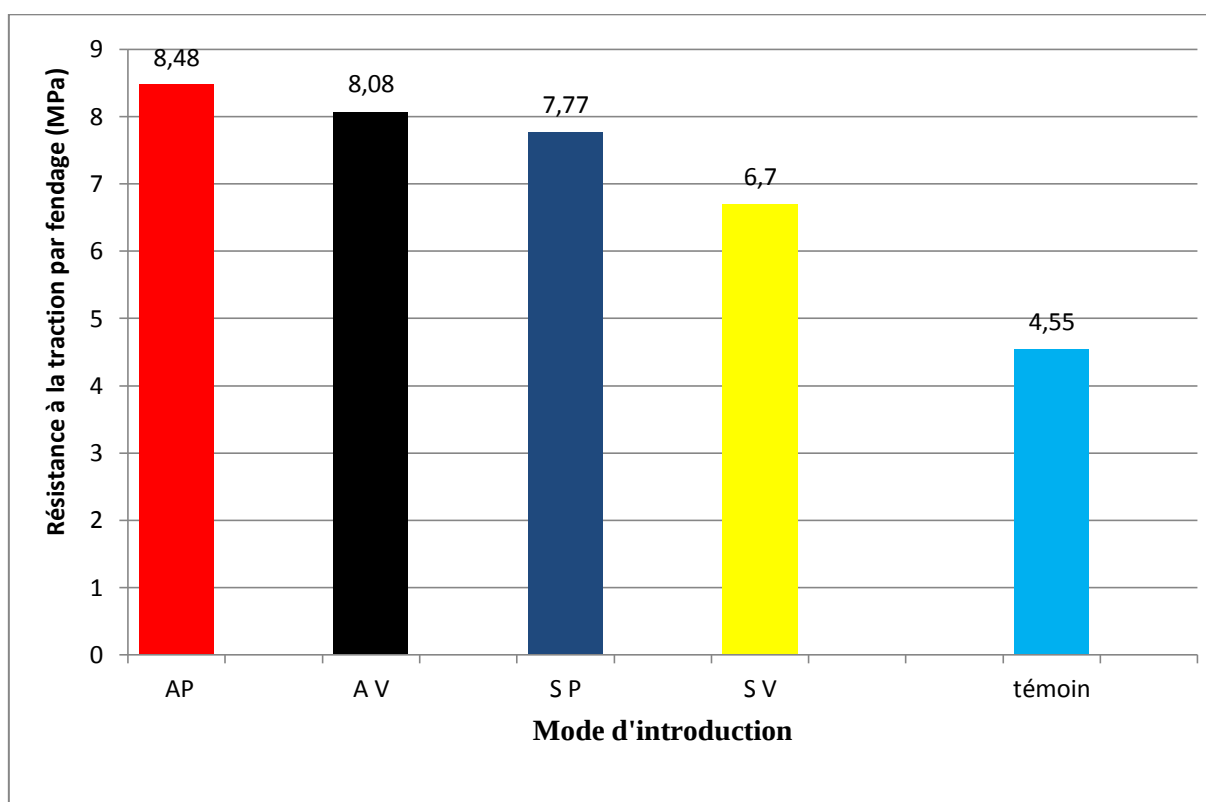


Figure 14 : Variation de la résistance à la traction par fendage à 28 jours En fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

3.2 BETONS AVEC AFFAISSEMENT AU CONE D'ABRAMS CONSTANT ($Ac = 12\text{ cm}$)

3.2.1 Effet sur rapport E/L

La figure 15 présente la variation de rapport E/L des diverses compositions de béton pour les modes d'introduction, on remarque que le rapport E/L augmente pour les différents modes d'introduction par rapport au béton témoin, cela peut-être expliqué par la finesse des fillers qui est élevée à celle du ciment qui conduit à augmenter le besoin en eau et évidemment la quantité de filler ajouté.

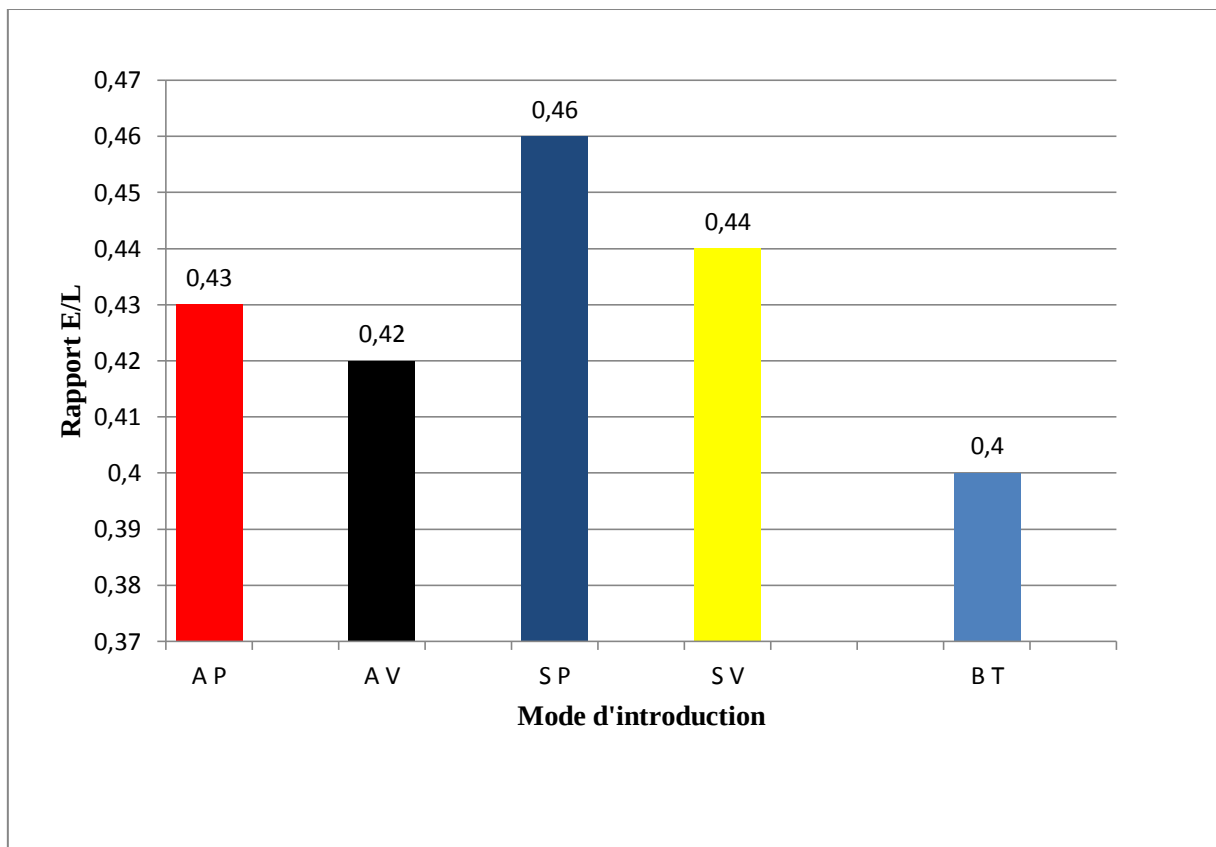


Figure 15 : Variation du rapport E/L en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

3.2.2 Effet sur les masses volumiques :

Les figures 16 et 17 présentent l'effet des fillers calcaire sur la masse volumique à l'état frais et durci pour les différents modes d'introduction, d'après ces figures on remarque que les masses volumiques à l'état frais sont légèrement faibles par rapport au témoin, et sont presque identiques pour les différents modes d'introduction. Alors qu'à l'état durci, au contraire, elles sont plus ou moins plus grandes que le témoin.

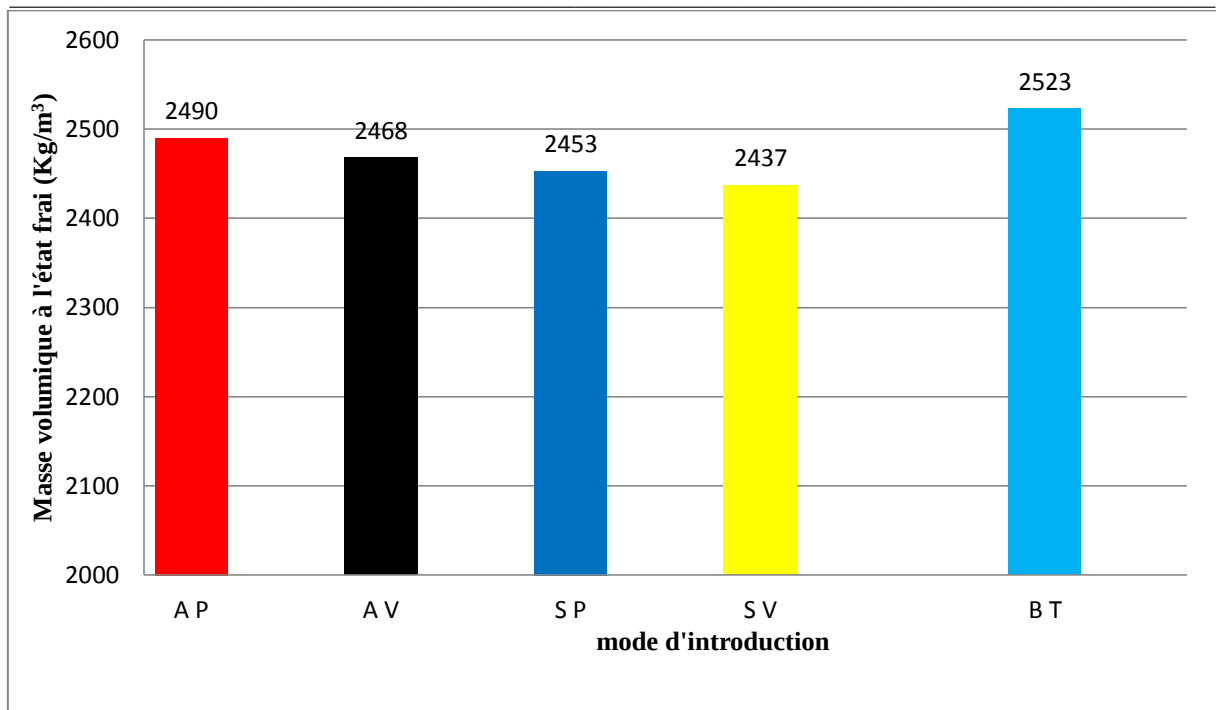


Figure 16 : Variation de la masse volumique à l'état frais en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

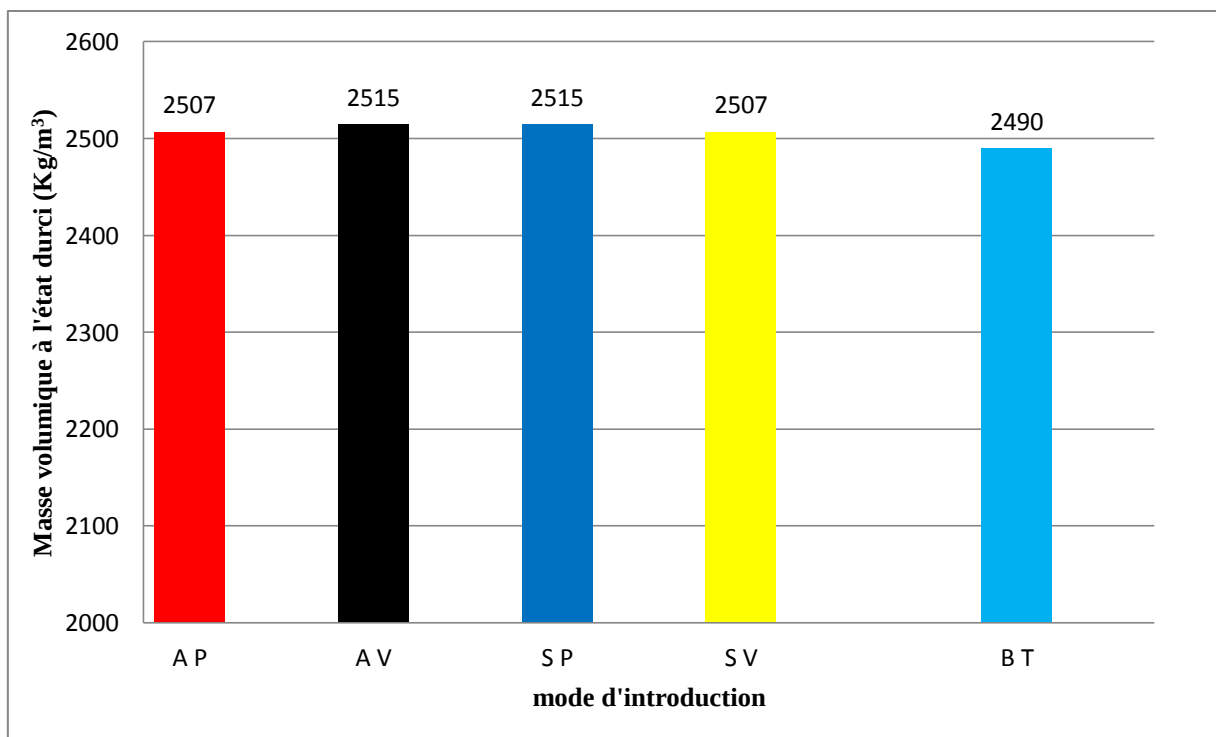


Figure 17: Variation de la masse volumique à l'état durci (à 28j) en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

3.2.3 Effet sur l'absorption d'eau :

L'introduction des fillers calcaire dans le béton induit une diminution de l'absorption d'eau (figure18) pour les différents modes d'introduction par rapport au béton témoin, cette diminution est l'effet de leur finesse supérieure à celle du ciment, les fines calcaire vont remplir les interstices, ce qui conduit uu compactage de la matrice du béton. Cette absorption est plus faible dans le cas d'addition pondérale des fillers calcaire.

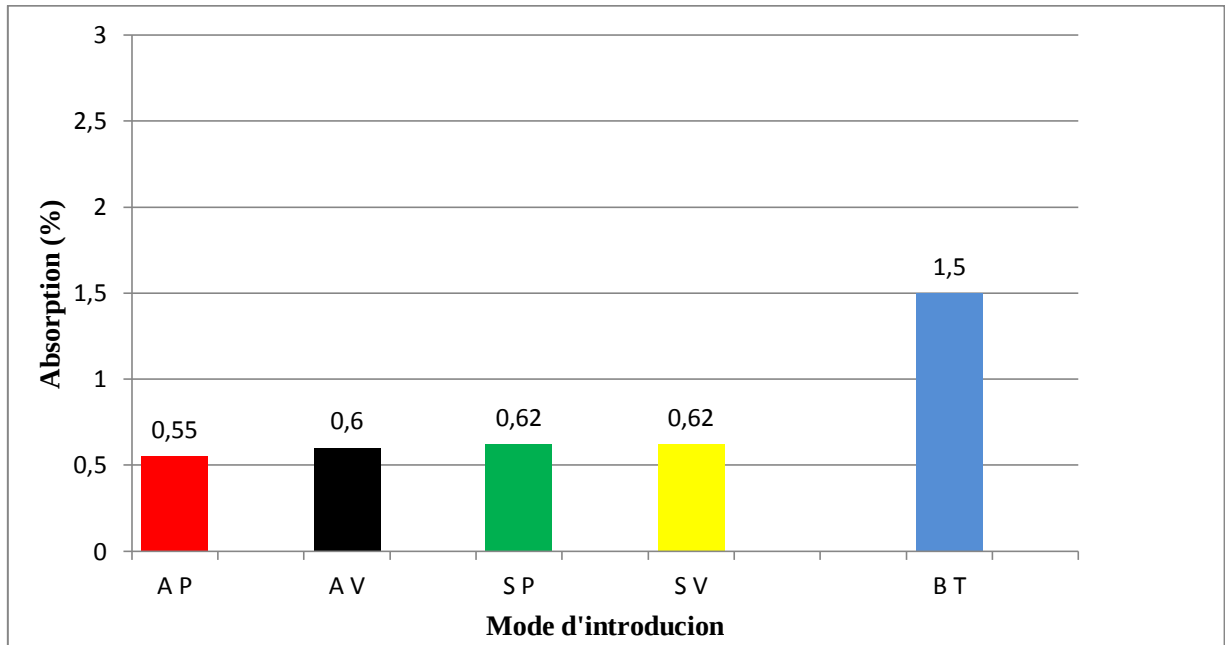


Figure 18 : Variation de l'absorption du béton en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

3.2.4 Effet sur la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques

L'évolution des vitesses de propagation d'ondes sonores (Figure 19) suit celle de la masse volumique des bétons à l'état durci. En d'autres termes, au fur et à mesure que la masse volumique augmente, la vitesse de propagation d'onde aussi. C'est signe de densification des mélanges, indifféremment du mode d'incorporation.

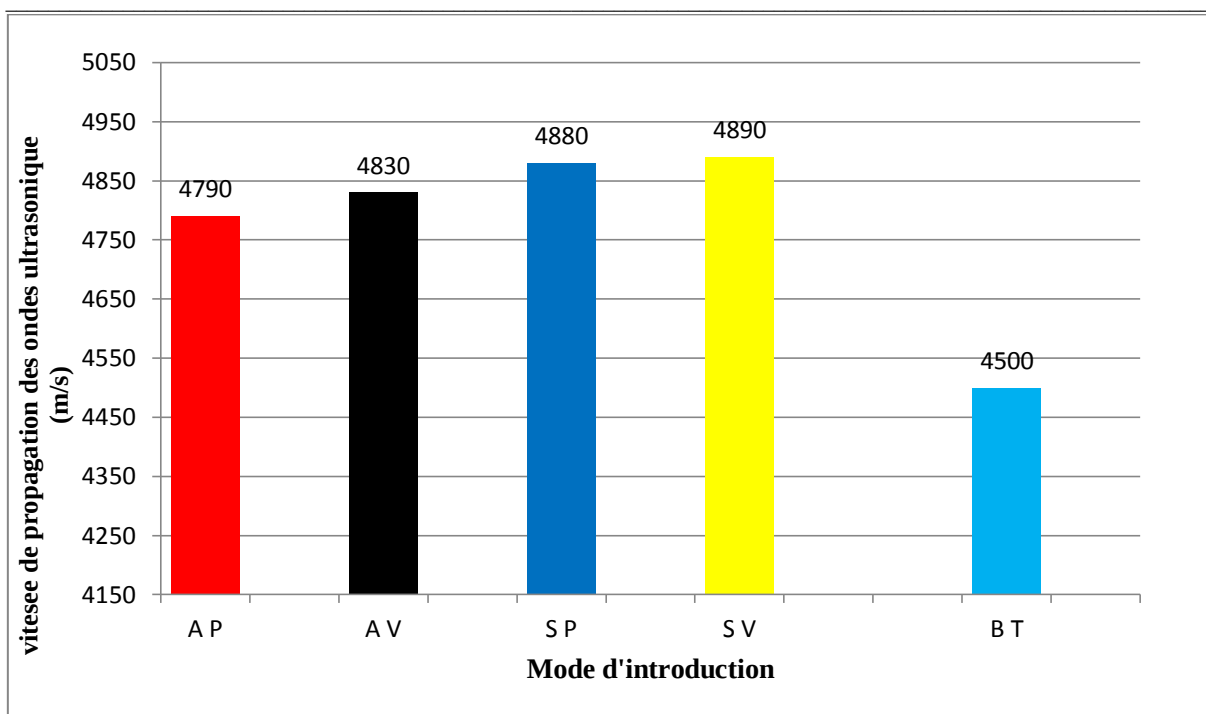


Figure 19 : Variation de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

3.2.5 Effet sur les résistances mécaniques :

Dans tous les cas les fillers calcaire interviennent par leur finesse et densifient la matrice et par conséquent, augmentent les résistances mécaniques (figure 20, 21 et 22). Ces résistances sont légèrement faibles pour le mode de substitution vu la quantité de ciment remplacée et évidemment le rapport E/L plus accru.

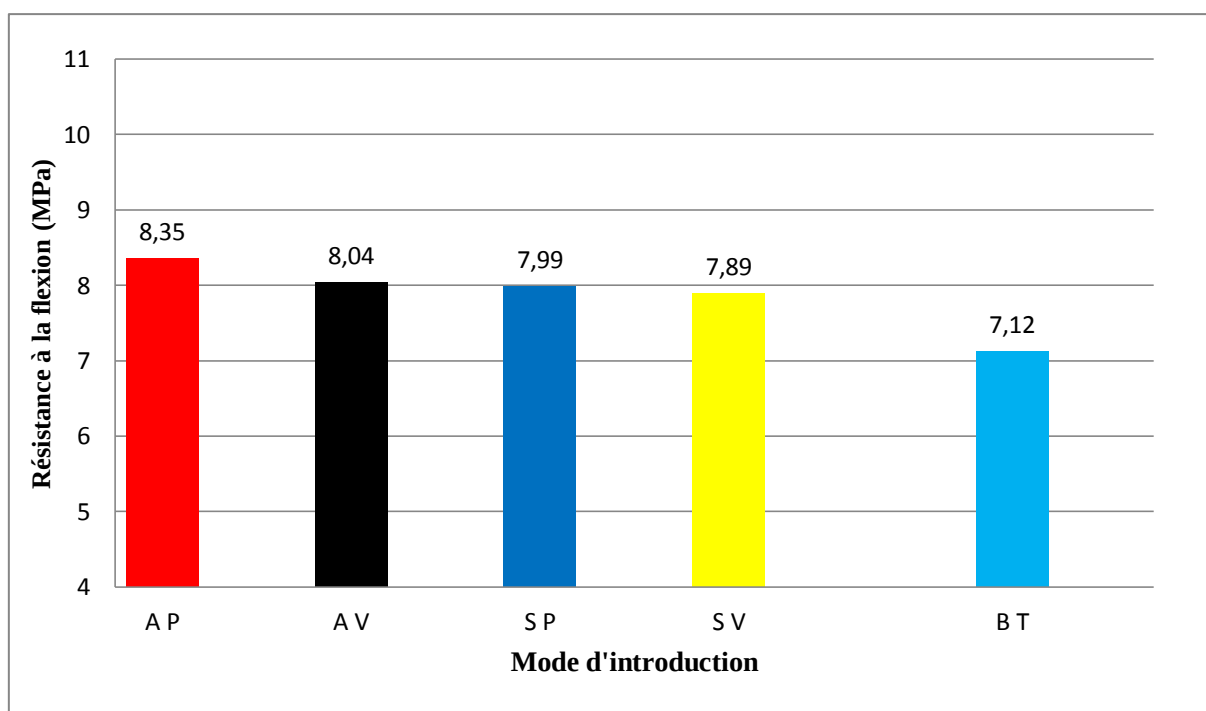


Figure 20: Variation de la résistance à la flexion à 28 jours en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

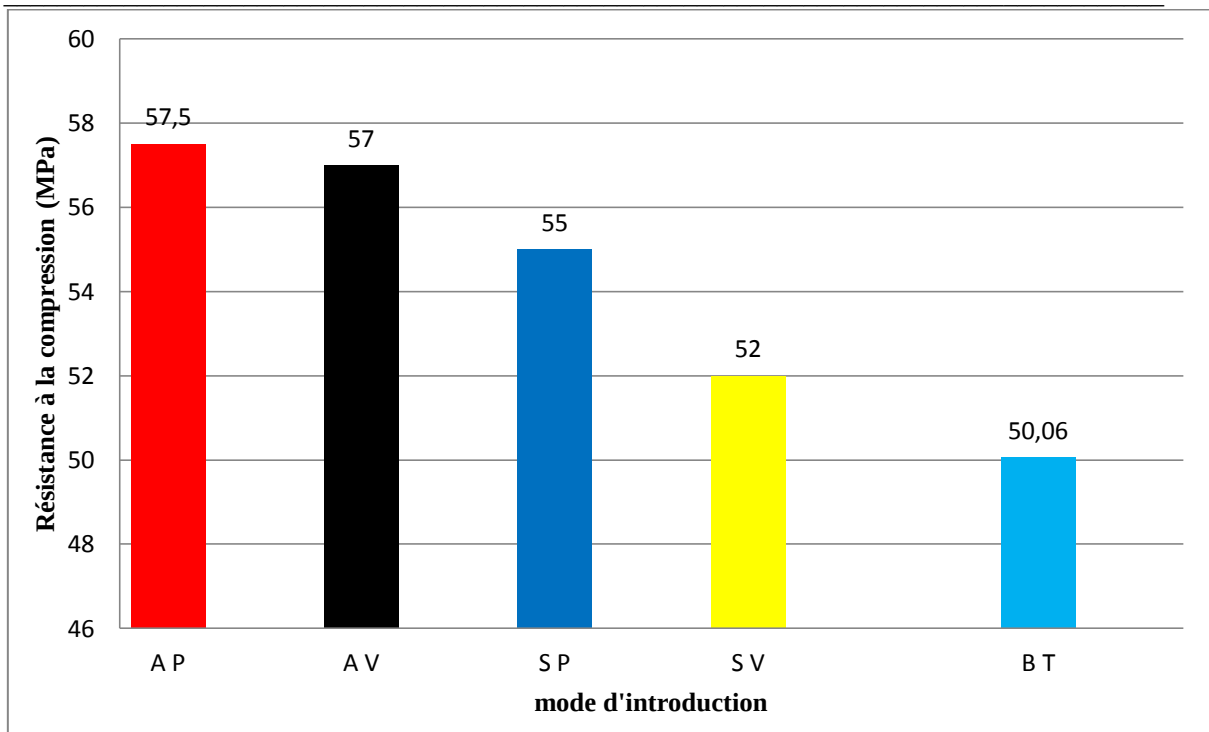


Figure 21: Variation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

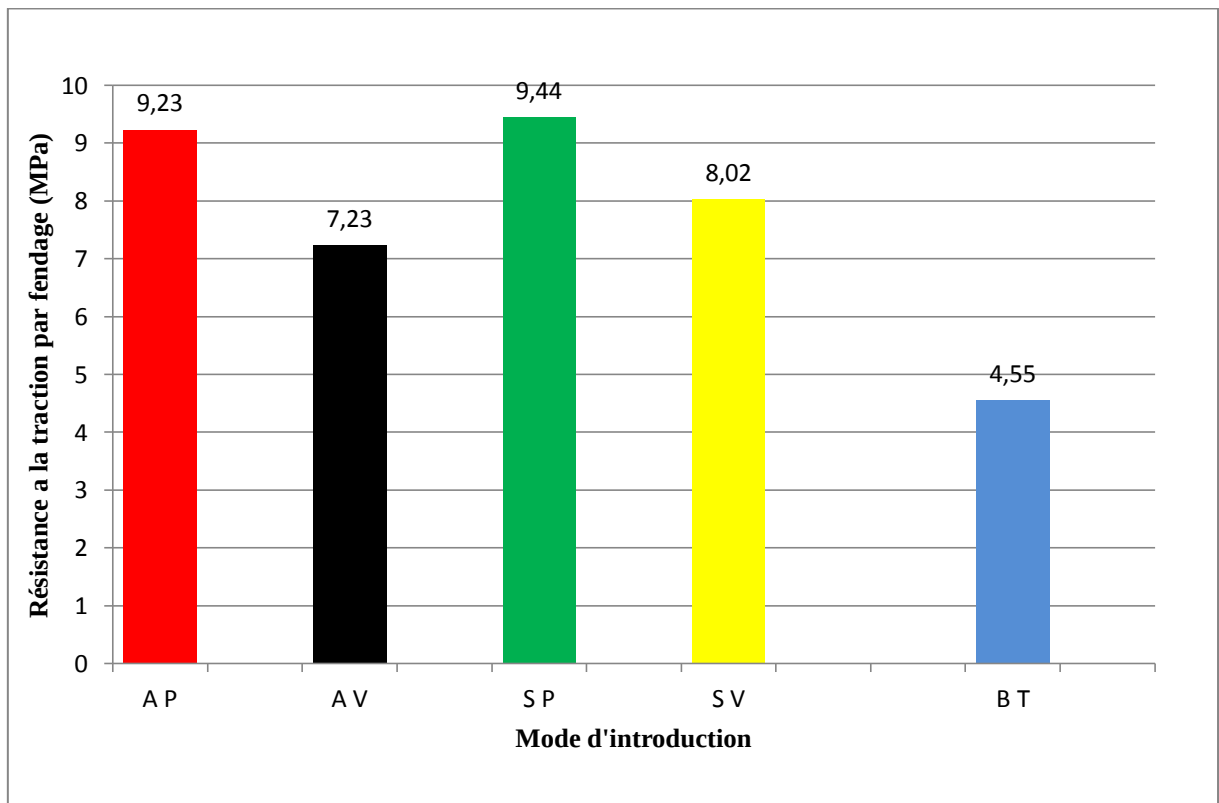


Figure 22 : Variation de la résistance à la traction par fendage en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire.

Conclusion Générale

Perstectives

Références Bibliographiques

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail était l'étude de l'effet du mode d'incorporation des filler calcaire sur les propriétés des bétons à l'état frais et durci. Cette étude était basée sur deux paramètres intrinsèques du béton : affaissement et le rapport E/L.

Les conclusions présentées ci-après reprennent les conclusions issues de l'analyse pour chaque propriété étudiée dans les deux cas, le premier est celui où l'affaissement constant et le deuxième pour le rapport E/L constant.

En partant des résultats obtenus on a pu sortir avec plusieurs points:

- Pour E/L constant :

Le mode d'introduction des fillers calcaire influe sur l'affaissement. Ce dernier diminue pour le dosage en substitution.

L'introduction des fillers calcaire finement broyé avec les différents modes induit une augmentation de la masse volumique et une diminution de l'absorption en eau, résultant de la densification de matrice du béton.

L'introduction des filler calcaire avec différents mode à un impact sur les résistances mécaniques, le mode volumétrique par addition à une influence significative sur la résistance à la compression, alors que le dosage volumétrique par substitution augment la résistance à la flexion.

Pour la résistance à la traction par fendage, l'introduction des fillers calcaire par différent mode améliore la résistance, le dosage avec addition pondérale donne de meilleure résistance.

- Pour l'affaissement constant :

Le mode d'introduction influe sur le rapport E/L, les fillers calcaire finement broyé introduits dans le béton augment le besoin d'eau.

Le mode d'introduction n'influe pas sur les masses volumiques et l'absorption

De façon générale, l'introduction des filler calcaire avec addition augment les résistances mécanique, alors que l'introduction avec substitution diminue légèrement les résistances mécanique.

Perspectives

- ✓ Il serait intéressant de conduire la même étude sur d'autres type d'ajouts cimentaires non calcaire pour plus une grande efficacité économique et allez vers un contrôle rational et globale de la qualité du béton.
- ✓ Essayé de combiner les différents ajouts et examinera l'effet de leur utilisation simultanée, pour les différents modes d'introduction.

Références Bibliographiques

- [1] **A. ALI AICHOUBA**. "Effets des pouzzolanes naturelles sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire", Thèse de magister, IGCM ORAN, 2005.
- [2] **Dreux .G & J. Festa**: «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8ème Edition. Eyrolles. pp 408. Mai 1998.
- [3] **Chanvillard G.**, "le matériau béton : connaissance générales", Aléas, les cours de l'entp, 1999
- [4] **Kari L.**, " Comportement thermique et énergétique des ciments lors de leur hydratation", mémoire de magister, USTHB 2013.
- [5] **Magdoud N., Radi F.**, "influence de la nature de l'adjuvant (superplastifiant) sur les propriétés physico-mécanique et thermique des mortiers à base de déchet des briques réfractaires", mémoire de master, université de Boumerdés, 2015.
- [6] **djoudrik S; fellahi S.**, "élaboration et caractérisation d'un béton fibre ultrahaut performance (BFUP) à base du calcaire", mémoire de master, université de Boumerdés 2010.
- [7] **Chaid R., Jauberthie1 R., et Boukhaled A.**, "effet d'ajout calcaire sur la durabilité du béton", Lebanese Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2010.
- [8] **Ghernouti Y.**, "effet des ajouts cimentaires ultrafines sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du béton", mémoire de magister, université de Boumerdés, 2002.
- [9] **Belabid J.**, "comportement mécanique et durabilité des matériaux cimentaires avec ajout de cendre volante", mémoire de fin d'étude, université de Boumerdés, 2016.
- [10] **Khalifa N. Bouasker M. Mounanga P. Benkhala N.**, "Approche physico-chimique et mécanique de la fissuration endogène de liants binaires et ternaires au jeune âge" XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen ALGERIE, 29 au 31 Mai 2011

- [11] **AMOURI C.**, "Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité)" thèse de doctorat, université de Constantine, 2009.
- [12] **Rahil M. Mouel F.** "élaboration d'un béton à haut performance(BHP) avec ajout de calcaire sur broyé" mémoire d'ingénieur, université de Boumerdés, 2005
- [13] **Ramdani M. Moussaoui F.** " étude sur les bétons précontraints composés les différents des fibres métalliques et laitier de hautes fourneau" ingénieur d'état, université de Boumerdés, 2010.
- [14] **Akmouche S.** " élaboration et caractérisation des BHUP à base 'ajout pouzzolanique et de différents fibres" mémoire de master, université de Boumerdés, 2012.
- [15] **SAADANI S.**, "comportement des bétons à base des granulats recyclés", mémoire de magister, université é de Constantine, 2016.
- [16] **Trembley D.**, "béton de ciment", Québec, modulo editor, 1983.
- [17] **Nicot pierre M.**, "interaction mortier-support : élément déterminant des performances et de l'adhérence d'un mortier", thèse de doctorat, université de Toulouse, 2008.