

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOAT
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER

Option : Matériaux et structures

Présenté par:

M^{lle} DJERFAF Nadjat

Ingénieur d'Etat en Génie Civil- Université de Laghouat

THÈME

OPTIMISATION DE LA FORMULATION DE BÉTONS A BASE
DE SABLES CONCASSÉS DE LA RÉGION DE LAGHOAT



DEVANT LE JURY:

NOM ET PRÉNOM	GRADE	ÉTABLISSEMENT	QUALITÉ
D ^r . ALLAOUI Omar	M.C.A	U. LAGHOAT	Président de jury
D ^r . NAFA Zahreddine	M.C.A	U.GUELMA	Rapporteur
Mme. BEN MILOUD Meriem	M.A.A	U. LAGHOAT	Co-Rapporteur
D ^r . CHERAIT Yacine	M.C.A	U.GUELMA	Examineur
D ^r . GUEDDOUDA Mohamed Kamel	M.C.A	U. LAGHOAT	Examineur

Soutenue le 14 Mai 2012

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu **ALLAH** qui m'a donnée la force de mener à bien l'étude de ce sujet.

Je tiens à remercier plus singulièrement Monsieur **NAFA Zahreddine** maître de conférences à l'université de Guelma de m'avoir proposée le thème qui a fait l'objet de ce mémoire. Je tiens également à lui exprimer ici, ma gratitude et ma profonde reconnaissance pour son encadrement et les inappréciables conseils le long de la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier également Monsieur **ALLAOUI Omar** maître de conférences de l'université de **Laghouat** de m'avoir fait l'honneur de présider le Jury de ma soutenance et d'avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie vivement Monsieur **CHERAIT Yacine** maître de conférences à l'université de **Guelma** d'avoir examiné ce travail et accepté de participer à mon Jury de mémoire.

Je remercie parallèlement Monsieur le Docteur **GUEDDOUDA Mohamed Kamel** maître de conférences à l'université de Laghouat d'avoir examiné ce travail et admettre de participer à mon Jury de mémoire.

Je remercie identiquement madame co-promoteur **BEN MILOUD MERIEM** pour son aide durant la réalisation de ce mémoire.

Comme je suis également redevable à Monsieur **HALLIFA Bachir**, Monsieur **BENABED Benchaa**, Monsieur **MIMOUNI Younce**, Mademoiselle **BEN ACHOURE Souaad**, Mademoiselle **Aïda** pour leur aide inestimable.

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes parents

À mes frères et Sœurs

À toutes mes connaissances

DJERFAF Nadjat

ملخص

قد يؤدي الاستغلال الدائم و الهائل لرمال الأودية السيليسية إلى نفاذها لذا وجب على الباحثين في مجال البناء إيجاد سبل لحماية هاته المخازن الطبيعية. غناء منطقة الأطلس الصحراوي بالصخور الكلسية يدعو إلى التفكير في إمكانية استغلال هته الثروة الطبيعية.

يتمحور موضوع هذا البحث حول تقييم الرمل الكلسي الناتج عن تكسير الصخور الكلسية لمنطقة الأغواط و إمكانية استعماله عوضا عن الرمل الطبيعي في تحضير الخرسانة.

الهدف الأساسي لهذا البحث يتمثل في تحضير خرسانة كلسية مع استعمال مادة لينة و نسب متفاوتة من دقائق الكلس. يتم بعد ذلك التحقق من خصائصها الفيزيائية , الميكانيكية و ديمومتها في وسط مركز بحمض الكبريت.

1. نتائج هذا البحث أكدت لنا انه من الممكن استعمال الرمل الكلسي عوضا عن الرمل الطبيعي في تحضير خرسانة عالية المقاومة.
2. القيم المثالية لمقاومة الميكانيكية للخرسانة تم التحصل عليها بإضافة 5 إلى 10 بالمئة من دقائق الكلس.
3. مقاومة الخرسانة الكلسية في الوسط الحمضي جيدة نتيجة لكثمتها الممتازة.

الكلمات المفتوحة:

الخرسانة كلسية , ملدن, ديمومة, دقائق الكلس, مقاومة عالية, الرمل الكلسي.

Abstract

The present work is interested in the valorization of the sand crushing of the region of **Laghouat** and the possibility of the substitution by the sand natural of river in the manufacture of the concrete.

The main objective of this research consists to made a concrete limestone with a super-plasticizer and percentages varied in limestone Filler, and of true in the laboratory the physical, mechanical performance and the durability to the attacks by the **Sulfuric Acid**.

The experimental survey allowed us to pull the main following findings:

1. The sand crushing can be used to manufacture a concrete to high performance with a rate of the limestone filler varied from **0** to **25%**.
2. The rate of optimal improvement of the mechanical resistance of the concrete is gotten for a percentage of substitution of limestone Filler of the order of **5** to **10%**.
3. The resistance of the concrete limestone with a super-plasticizer and percentages varied in limestone Filler to the attacks by the **Sulfuric Acid** is noticed well.

Keywords:

Concrete, limestone; Super-plasticizer; durability; limestone Filler; performance; sand crushing.

Résumé

Le présent travail s'intéresse à la valorisation du sable de concassage de la région de **Laghouat** et la possibilité de son utilisation comme un substituant du sable naturel de rivière dans la fabrication du béton.

L'objectif principal de cette recherche consiste à formuler un béton calcaire superplastifié avec des pourcentages variés en fines calcaires, et de vérifier en laboratoire sa performance physique, mécanique et sa durabilité aux attaques par l'acide sulfurique.

L'étude expérimentale nous a permis de tirer les principales conclusions suivantes :

1. Le sable de concassage peut être utilisé pour fabriquer un béton à haute performance avec un taux des fines calcaires variant de **0 à 25%**.
2. Le taux d'amélioration optimal de la résistance mécanique du béton est obtenu pour un pourcentage de substitution de fines de l'ordre de **5 à 10%**.
3. La résistance du béton calcaire superplastifié avec des pourcentages variés en fines aux attaques par l'acide sulfurique est remarquée bonne.

Mots clés :

Béton calcaire, superplastifiant, durabilité, fines calcaires, performance, sable de concassage

LISTE DES SYMBOLES

Q	Volume d'eau traversé le spécimen (cm^3)
A	Section traversée par l'eau (cm^2)
L	Hauteur de spécimen en béton (cm)
H	Gradient hydraulique à travers le spécimen L (cm)
T	Temps d'écoulement de volume Q (sec).
C	Ciment.
E	Eau.
SP	Superplastifiant.
E/C	Rapport eau ciment.
D_{max}	Diamètre maximal des granulats.
d	Diamètre minimal des granulats.
γ	Coefficient de compacité du matériau sec.
G	Coefficient granulaire .
V_T	Volume total des matériaux secs "ciment+sable+gravier".
V_{S+G}	Volume des granulats (sable + gravier).
V_C	Volume du ciment utilisé.
M_{SSS}	La masse des granulats à l'état SSS (saturés superficiellement secs).
M	La masse des granulats à l'état naturel.
E_{TOT}	Teneur en eau total dans les granulats.
E_h	Humidité des granulats.
E_{abs}	Quantité d'eau absorbée par les granulats.
M_E	Masse d'eau absorbée par les granulats.
V_{Sol}	Volume de la matière solide.
V_E	Volume d'eau dans le superplastifiant.
V_{liq}	Volume de superplastifiant liquide.
V_{Sol}	Volume de la matière solide dans le superplastifiant.

σ_{C28}	Classe vrai de ciment .
HR	Humidité relative.
T	Température.
g	Accélération de la pesanteur.
ν	Coefficient de poisson .
E	Module du Young.
K_I	Facteur d'intensité des contraintes.
f_{max}	Flèche maximale.
Composition N°1	Béton à 0% des fines calcaires.
Composition N°2	Béton à 5% des fines calcaires.
Composition N°3	Béton à 10% des fines calcaires.
Composition N°4	Béton à 15% des fines calcaires.
Composition n°5	Béton à 20% des fines calcaires.
Composition N°6	Béton à 25% des fines calcaires.
Rc28	Résistance à la compression à l'âge de 28 jours.
Rf28	Résistance à la flexion à l'âge de 28 jours.
C	Compacité du sable.
ABS	Absorption des granulats.
γ_{app}	Masse volumique apparente .
γ_{abs}	Masse volumique absolue.
M_f	Module de finesse.
Cu	Coefficient d'uniformité.
VB	Valeur au bleu de méthylène.
CPJ	Ciment portland composé.
Es	Equivalent de sable.
w	Teneur en eau.
TV_{air}	Taux de variation de l'air occlus dans le béton.
tsp_i	Teneur en air dans la composition N°i (i=2 à 6).

tsp₀	Teneur en air dans la composition N°1 .
TV_A	Taux de la variation de l'affaissement au cône d'Abrams.
A_i	Affaissement du béton de composition N°i .
A₀	Affaissement du béton de composition N°1 .
TVR_{CJ}	Taux de variation de la résistance à la compression .
R_{Cj0}	Résistance à la compression de la composition N°1 (0% des fines calcaires) à l'âge j.
R_{Cji}	Résistance à la compression de la composition N°i (i=2 à 6) à l'âge j.
TVR_{fj}	Taux de variation de la résistance à la flexion.
R_{fj0}	Résistance à la flexion de la composition N°1 (0% des fines calcaires) à l'âge j
R_{fji}	Résistance à la flexion de la composition N°i (i=2 à 6) à l'âge j
TVC_C	Taux de variation du coefficient de capillarité C _C .
C_{C0}	Coefficient de capillarité de la composition N°1 (0% des fines calcaires)
C_{Ci}	Coefficient de capillarité de la composition N°i (i=2 à 6).
TV_{Abs}	Taux de variation de l'absorption totale.
Abs₀	Absorption totale la composition N°1 (0% des fines calcaires) à l'âge j.
Abs_i	Absorption totale de la composition N°i (i=2 à 6) à l'âge j.
TV_μ	Taux de variation du retrait de séchage.
μ_{j0}	Retrait de séchage de la composition N°1 (0% des fines calcaires) à l'âge j.
μ_{je}	Retrait de séchage de la composition N°i (I=2 à 6).
TVG_f	Taux de variation de l'énergie de la rupture.
G_{f0}	Energie de la rupture de la composition N°1 (0% des fines calcaires).
G_{fi}	Retrait de séchage de la composition N°i (I=2 à 6).
V	Vitesse du son.
TVV	Taux de variation de la vitesse du son.
Long.carac	Longueur caractéristique.

Introduction générale	2
-----------------------------	---

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1 Introduction.....	6
I.2 Performance mécanique du béton à base des granulats de concassage.....	6
I.3 L'importance des fines calcaires dans un béton ordinaire.....	10
I.4 Mécanique linéaire de la rupture.....	18
I.4.1 Généralité.....	18
I.4.2 Approche énergétique.....	19
I.4.3 Approche d'intensité des contraintes.....	21
I.4.4 Influence des granulats sur la résistance à la propagation des fissures.....	23
I.4.5 Etude de l'énergie de la rupture d'un béton calcaire.....	23
I.5 Attaque du béton par les acides	25
I.5.1 Généralité.....	25
I.5.2 Réactions chimiques des différents types d'acides avec la portlandite.....	25
I.5.3 Résistance à la corrosion par l'acide sulfurique des mortiers à base de ciment alumineux et le CPA.....	29
I.6 synthèse de l'étude bibliographie.....	29

Chapitre II : Techniques expérimentales utilisés.

II.1 Introduction.....	32
II.2 Essais réalisés sur les granulats.....	32
II.2.1 Analyse granulométrique par tamisage.....	32
II.2.2. Analyse granulométrique par sédimentation.....	32
II.2.3 Equivalent du sable.....	32
II.2.4 Essai au bleu de méthylène.....	32
II.2.5 Masse volumique apparente.....	33

SOMMAIRE

2012

II.2.6 Masse volumique absolue.....	33
II.2.7 Absorption des granulats.....	33
II.2.8 Essai de Los Angeles.....	34
II.3 Essais réalisés sur le ciment.....	34
II.3.1 Finesse du ciment.....	34
II.3.2 Consistance de ciment.....	35
II.3.3 Temps de prise.....	35
II.3.4 Détermination de la stabilité.....	35
II.4 Essais réalisés sur l'adjuvant.....	35
II.4.1 Extrait sec.....	35
II.4.2 Méthode des coulis.....	36
II.5 Essais réalisés sur le béton.....	38
II.5.1 Consistance du béton.....	38
II.5.2 Teneur en air dans le béton frais.....	38
II.5.3 Résistance mécanique.....	39
II.5.3.1 Résistance à la compression.....	39
II.5.3.2 Résistance à la flexion.....	40
II.5.4 Essai de l'auscultation dynamique.....	41
II.5.5 Retrait de séchage.....	42
II.5.6 Absorption.....	42
II.5.6.1 Absorption totale	42
II.5.6.2 Absorption capillaire	42
II.5.7 Résistance à la propagation des fissures.....	43
II.5.8. Essai réalisés pour la détermination de la durabilité du béton.....	45
II.6 Synthèse du chapitre.....	45

Chapitre III : Caractérisation des matériaux de base.

III.1 Introduction.....	47
III.2 Caractérisation des sables calcaires de la région de Laghouat avant élimination des fine...	47

SOMMAIRE

2012

III.2.1 Analyse granulométrique des sables calcaires de la région Laghouat avant élimination des fines calcaires.....	47
III.2 .2 Différentes caractéristiques physiques des sables calcaires	48
III.3. Matériaux utilisé pour la confection du béton étudié	50
III.3.1 granulats.....	50
III.3.2 Ciment.....	50
III.3.3 Adjuvant.....	50
III.3.4. Eau de gâchage.....	50
III.3.5. Analyse granulométrique des sables calcaires de l'oued m'Zi sans fines calcaires (0%)	50
III.3.6. Propriétés physiques du sable sans fines calcaires	51
III.3.7. Effet des fines calcaires sur les propriétés physiques du sable.....	52
III.3.8. Fines calcaires.....	53
III.3.8.1. Analyse granulométrique par sédimentation.....	53
III.3.8.2. Propriétés physiques des fines calcaires.....	54
III.3.9 Gravier.....	54
III.3.9.1 Analyse granulométrique.....	54
III.3.10. Ciment.....	56
III.3.11. Superplastifiant.....	57
III.3.12. Eau de gâchage.....	58
III.4. Synthèse de chapitre.....	59

Chapitre IV : Formulation du béton élaboré

IV.1 Introduction.....	61
IV.2 Présentation de la méthode du formulation.....	61
IV.3 Résultats de la formulation.....	64
IV.3.1 Composition granulaire.....	64
IV.3.2 Optimisation du squelette granulaire.....	65
IV.3.3 Composition du référence.....	68
IV.3.4 Gâchée d'essai.....	71

SOMMAIRE

2012

IV.3.5 Etude de système ciment-superplastifiant-fines.....	71
IV.4 Interprétation des résultats.....	75
IV.5 Synthèse de chapitre.....	77

Chapitre V : Propriétés des bétons à l'état frais et durcis

V.1 Introduction générale.....	79
V.2 Propriétés du béton frais.....	79
V.2.1 Air occlus.....	79
V.2.2 Affaissement au cône d'Abrams.....	81
V.3 Résistance mécanique.....	83
V.3.1 Résistance à la compression.....	83
V.3.2 Résistance à la flexion.....	86
V.3.3. Interprétation des résultats.....	88
V.4 Retrait de séchage.....	89
V.4.1 Perte relative de masse.....	89
V.4.2 Evolution de retrait en fonction du temps.....	91
V.4.3 Evolution de retrait en fonction des taux de fines calcaires.....	92
V.4.4 Interprétation des résultats.....	94
V.5 Mécanique linéaire de la rupture.....	95
V.5.1 Evolution de l'effort de flexion en fonction de la flèche.....	96
V.5.2 Evolution de l'énergie de la rupture en fonction des taux de fines.....	97
V.5.3 Evolution de facteur d'intensité des contraintes en fonction des taux de fines.....	98
V.6 Synthèse de chapitre.....	100

Chapitre VI : Durabilité du béton a base de sable fin en milieu acide

VI.1 Introduction.....	102
VI.2. Absorption.....	102
VI.2.1 Absorption capillaire.....	102

SOMMAIRE

2012

VI.2.2 Absorption totale.....	106
VI.3. Durabilité du béton aux attaques par l'acide sulfurique.....	109
VI.3.1 Aspect des éprouvettes après 120j d'immersion dans la solution.....	109
VI.3.2. Variation des dimensions des éprouvettes.....	110
VI.3.2.1. Variation des dimensions longitudinales des éprouvettes.....	110
VI.3.2.2. Variation des dimensions transversales des éprouvettes	110
VI.3.3.Perte relative de masse.....	111
VI.3.4 Résistance mécanique.....	112
VI.3.4.1 Résistance à la compression.....	112
VI.3.4.2 Résistance à la flexion.....	112
VI.3.5.Mesure ultrasonique.....	114
VI.3.6. Analyse par diffraction des rayons X.....	116
VI.3.7. Interprétation des résultats	119
VI.4. Synthèse de chapitre.....	120
Conclusion et recommandations	123
Références bibliographies.....	127
Annexe 01.....	131
Annexe 02.....	134

INTRODUCTION GENERALE

Introduction, Problématique et objectif

Problématique : Notre pays a lancé de grands projets que ce soit pour le domaine de bâtiment (logements et équipements publics) ou dans le domaine de travaux publics (autoroutes, ponts, et voies ferrées). Les technologies de construction utilisées mettent en œuvres de très grandes quantités de granulats. Des millions de tonnes ont été exploités dans le domaine de construction et devant cette exploitation abusive du sable naturel et ces conséquences fâcheuses sur l'environnement, l'extraction du sable naturel de l'oued est totalement interdite par les autorités nationales depuis 2009. La solution de rechange étant évidemment le recours au sable de carrières qui présente cependant une granulométrie très différentes du sable naturel.

Objectif de l'étude : Ce travail de mémoire de Magister s'intéresse à la valorisation des gisements des matériaux de construction locaux riches en roches calcaires (voir les cartes géologiques de l'annexe), et ce à travers une caractérisation complète des sables produits dans les carrières de la région de Laghouat située au centre sud du pays. On essayera de formuler des compositions en béton à partir des sables concassés en fonction de leur teneur en fines calcaires et d'étudier en laboratoire les principales caractéristiques physiques (à l'état frais et durci) et mécaniques (essai destructif et non destructif) et aussi quelques critères de durabilité des formulations proposées.

● Structuration du mémoire :

Le travail est partagé en six chapitres :

Le premier chapitre est destiné à l'étude bibliographique où l'intérêt est porté sur l'utilisation des sables de concassage dans la production de béton adjuvanté, ainsi que sur l'importance des fines calcaires dans un béton ordinaire. Nous présentons dans cette recherche bibliographique des résultats expérimentaux trouvés par des chercheurs de différents pays. De plus, un rappel sur la théorie de la mécanique de la rupture avec des résultats expérimentaux sur ce sujet sont présentés dans ce chapitre. Enfin, le dernier point traité dans cette étude bibliographique concerne la durabilité des bétons dans un milieu agressif (l'attaque par les acides).

Le deuxième chapitre comporte la description des différentes techniques expérimentales utilisées dans la réalisation des essais. Ce chapitre est divisé en deux parties : la première concerne les essais de caractérisation des matériaux constituant le béton (gravier, sable, fines calcaires, ciment, eau et adjuvant) tandis que la deuxième partie est consacrée à la présentation des méthodes de caractérisation physico-mécaniques du béton à l'état frais et à l'état durci (consistance, air occlus, porosité, absorption, retrait, résistance mécanique et la résistance à la propagation des fissures).

Le troisième chapitre regroupe les résultats des caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques des matériaux utilisés (granulats, fines calcaires, ciment, super-plastifiant et l'eau) ainsi que celles du sable avec des pourcentages variés en fines calcaires (0 à 25%)

Le quatrième chapitre comporte la formulation du béton. On commence par la détermination des différentes proportions pondérales du mélange (gravier sable, ciment, et eau), pour finir avec le système ciment-super-plastifiant de chaque composition réalisée. Dans ce cadre, la méthode des coulis a été utilisée pour déterminer la dose de saturation.

Le cinquième chapitre est consacré à l'exposé des résultats expérimentaux. On commence par la présentation des propriétés du béton frais (air occlus et affaissement au cône d'Abrams), puis, on passe aux caractéristiques physico-mécaniques du béton à l'état durci (résistance à la compression, résistance à la flexion, retrait de séchage et la résistance à la propagation des fissures). Une synthèse des résultats trouvés est présentée à la fin de ce chapitre.

Le sixième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de l'étude de la durabilité du béton vis-à-vis à l'absorption d'eau totale, capillaire et à l'acide sulfurique H_2SO_4 . L'étude ultrasonique et la diffraction aux rayons x sont utilisées pour la détermination des caractérisations physique et chimique du béton calcaire attaqué par l'acide sulfurique H_2SO_4 .

La conclusion et les recommandations sont présentées à la fin du mémoire.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION

Le béton confectionné avec le sable de concassage a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Nous présentons dans cette étude bibliographique quelques résultats expérimentaux obtenus par des chercheurs de différents pays.

L'étude bibliographique est partagée en trois parties essentielles:

- La première partie est consacrée à la performance mécanique des bétons adjuvantés fabriqués avec les granulats de concassage, puis une présentation des résultats sur l'effet des fines calcaires sur les propriétés physico-mécaniques de béton ordinaire (non adjuvanté).
- La deuxième partie s'intéresse à des rappels sur la théorie de la mécanique linéaire de la rupture avec des exemples d'applications sur un béton calcaire.
- La troisième partie est consacrée à l'étude bibliographique de la durabilité du béton aux attaques des acides.
- Enfin, la présentation d'une synthèse bibliographique.

I.2. PERFORMANCE MECANIQUE DU BETON A BASE DES GRANULATS DE CONCASSAGE

H. Donza, O. Cabrera, E.F. Irassar [1], ont montré dans une recherche l'effet des granulats de concassage sur les propriétés mécaniques du béton. La source des granulats utilisés : sable naturel des rivières **S**, granite **G**, calcaire **L** et dolomite **D** (voir figure I.1.). Nous présentons dans ce qui suit les résultats obtenus dans cette recherche.

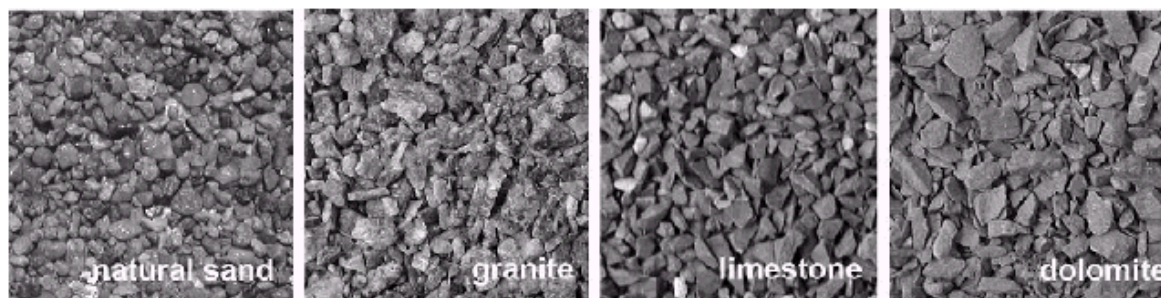


Figure I.1: Photos des différents sables de concassage testés.

I.2.1 COMPOSITION ET PROPRIETES DU BETON FRAIS

La composition et les propriétés physiques du béton frais sont résumées dans le tableau I.1:

Tableau I. 1: Composition et propriétés physiques du béton frais.

Proportions des matériaux (kg/m³)

Mélanges	S-530	G-530	G-485	G-450	D-485	L-485	L-450	D-450
Ciment Portland	530	530	485	450	485	485	450	450
Eau	160	160	160	160	169	168	160	175
Sable	660	660	698	727	720	702	736	724
Graviers	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030
Superplastifiant	0.67	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
E/c	0.30	0.30	0.3	0.36	0.35	0.35	0.36	0.39
Affaissement (mm)	180	170	160	120	80	175	140	n.s. ^a

^a affaissement nul.

I.2.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les propriétés du béton frais présentées dans le tableau I.1 montrent que le béton fabriqué avec le sable de concassages exige un dosage en superplastifiant peu important (**SP=0.89%** comparativement au sable naturel **SP=0.67%**) ceci peut être lié à la forme des particules du sable de concassage. L'affaissement au cône d'**Abrams** du béton à base du sable dolomite a été remarqué faible comparativement aux autres types du béton.

La figure I.2, montre l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps. Il est remarqué que la résistance du béton à base de sable granite **G-530** est meilleure que celle du béton préparé avec un sable naturel **S-530**. Comme il est montré dans la figure I.3 le degré d'hydratation des deux bétons **G-530** et **S-530** est presque identique.

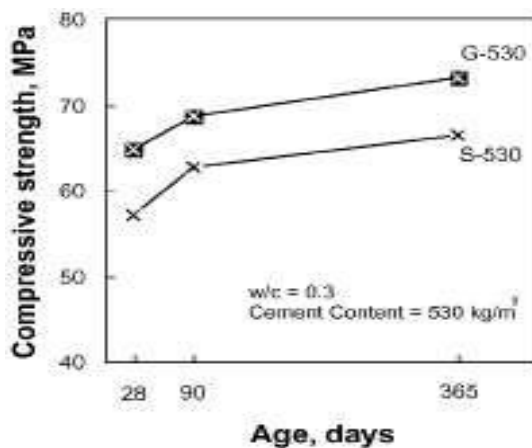


Figure I. 2: Evolution de la résistance à la compression des bétons S-530 et G-530 en fonction du temps.

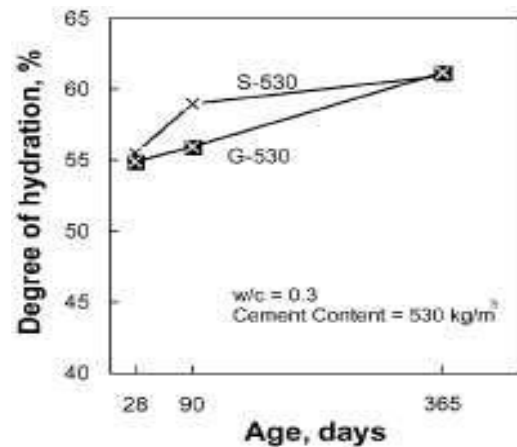


Figure I.3: Evolution de degré de l'hydratation des bétons S-530 et G-530 en fonction du temps.

La figure I.4 illustre l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps des différents mélanges. La résistance à l'âge de 28 jours variant entre 50 et 65 MPA. La meilleure résistance a été remarquée pour le béton G-485. Cette haute résistance due à la dureté du granite.

La figure I.5 représente l'évolution du module d'élasticité E en fonction du temps. Les valeurs du module d'élasticité E sont presque identiques pour les bétons S-530, G-530, G-485, G-450 et L-485.

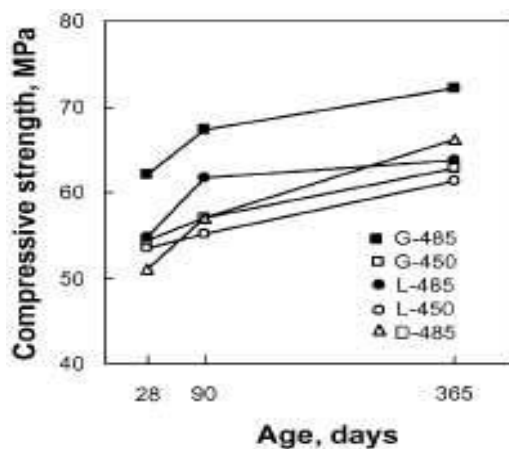


Figure I.4: Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps.

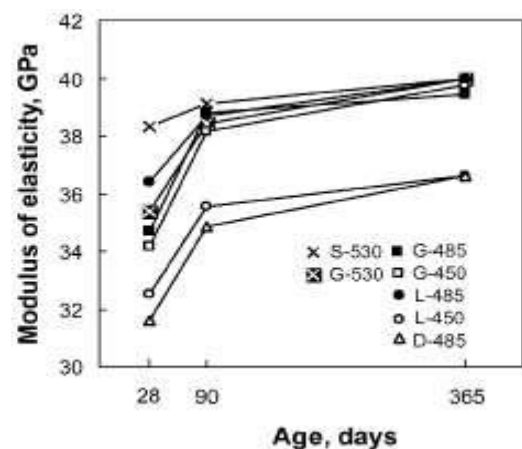


Figure I.5: Evolution du module d'élasticité E en fonction du temps.

Le tableau I.2 regroupe les valeurs de la résistance à la flexion à 28 jours, 90 jours et 365 jours obtenus pour les différents types du béton. La résistance du béton à la flexion est meilleure dans le béton confectionné par le sable calcaire.

Tableau I. 2 : Evolution de la résistance à la flexion en MPA des différents types du béton.

Mélange	Age (jours)		
	28	90	365
	3.36	3.44	3.59
G-530	3.27	3.45	4.08
G-485	3.84	3.94	4.54
L-485	3.90	4.03	4.09
D-485	3.62	3.81	4.39

L'estimation des hydrates dans le ciment pour les différents types de béton est résumée dans le tableau I.3.

Tableau I. 3: Estimation des hydrates dans le ciment (kg/m^3).

Mélanges	Age (jours)		
	28	90	365
	294	312	322
G-530	291	297	324
G-485	287	292	305
L-485	244	268	302
D-485	230	258	296

La figure I.6 présente l'allure des courbes d'évolution de degré d'hydratation en fonction du temps. Le degré d'hydratation maximal a été remarqué pour le béton G-485.

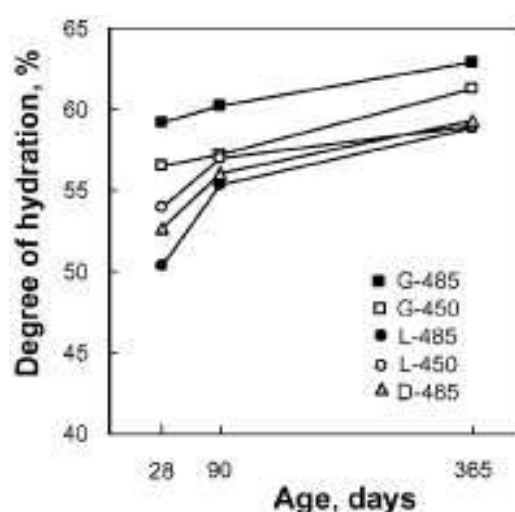


Figure I. 6: Evolution du degré d'hydratation en fonction du temps.

Les résultats présentés ci-dessus indiquent que le sable de concassage peut être utilisé pour réaliser un béton à haute performance avec des propriétés mécaniques semblables ou meilleures que le béton fabriqué avec un sable naturel S.

I.3. L'IMPORTANCE DES FINES CALCAIRES DANS UN BETON ORDINAIRE (NON ADJUVANTE)

Plusieurs chercheurs ont travaillé sur la performance mécanique du béton avec des pourcentages variés en fines calcaires, parmi ces chercheurs **Tahir Celik et Khaled Marar [2]**, **Ilker Bekir Topçu et Ali Ugurlu [3]** et **Guemmedi Z [4]**. Nous présentons dans ce qui suit une synthèse des ces travaux de recherche.

I.3.1. EFFET DES FINES CALCAIRES SUR LES PROPRIETES DE BETON SELON TAHIR CELIK ET KHALED MARAR [2]

L'objectif principal de ce groupe de recherche est de montrer l'effet de plusieurs proportions (**0% à 30%**) de fines utilisées comme remplaçant partiel du sable calcaire concassé sur quelques propriétés physico-mécaniques du béton.

I.3.1.1. COMPOSITION DU BETON :

La composition du béton est donnée dans le tableau I.4.

Tableau I.4 : Composition du béton

Sable kg/m³	210
Gravier kg/m³	965
Ciment kg/m³	420
Eau kg/m³	210

I.3.1.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

◆ BETON FRAIS :

Les propriétés du béton frais sont résumées dans le tableau I.5.

Tableau I.5 : Propriétés du béton frais.

Pourcentage des fines	Air occlus %	Affaissement (mm)
0	2.77	92
5	2.4	87
10	2.15	80
15	1.90	76
20	1.73	72
25	1.48	65
30	1.28	60

Selon les résultats résumés dans le tableau I.5 nous avons remarqué que l'affaissement au cône d'**Abrams** et le pourcentage d'air occlus dans le béton sont diminués en fonction de l'augmentation des fines calcaires dans le sable. La diminution de la maniabilité est due à l'absorption d'eau par les fines calcaires.

◆ BETON DURCI :

La figure I.7 représente l'évolution des résistances à la compression et à la flexion des éprouvettes âgées de 7j et 28j en fonction des taux de fines.

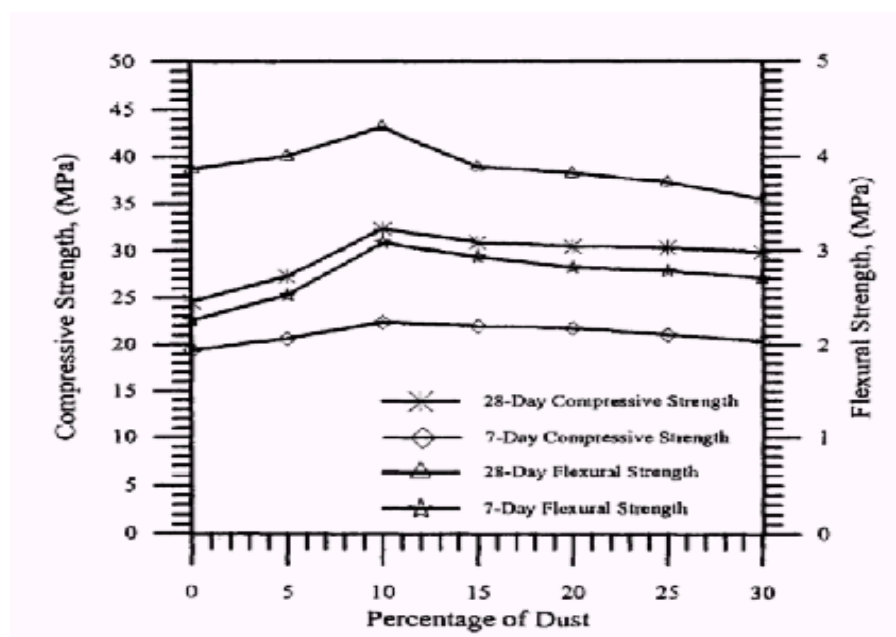


Figure I.7 : Variation de la résistance mécanique en fonction des pourcentages de fines calcaires.

Les courbes d'évolution de la résistance mécanique (compression et flexion) montrent que les fines améliorent la résistance à la compression et à la flexion jusqu'à un taux de substitution de 10%. Au-delà de cette valeur la résistance est diminuée. La résistance à la compression atteint à l'âge de 7 jours 22.47 MPA et 32.28 MPA à l'âge 28 jours pour un taux de substitution de 10% des fines calcaires. La résistance à la flexion atteint 3.09 MPa à l'âge de 7 jours et 4.32 MPa à 28 jours de durcissement.

◆ ABSORPTION :

Les résultats d'essai d'absorption sont montrés dans la figure I.8. Selon cette figure, le pourcentage d'absorption d'eau dans le béton est diminué jusqu'à un taux de fines de 15%, puis l'absorption commence à augmenter avec l'augmentation des taux de fines.

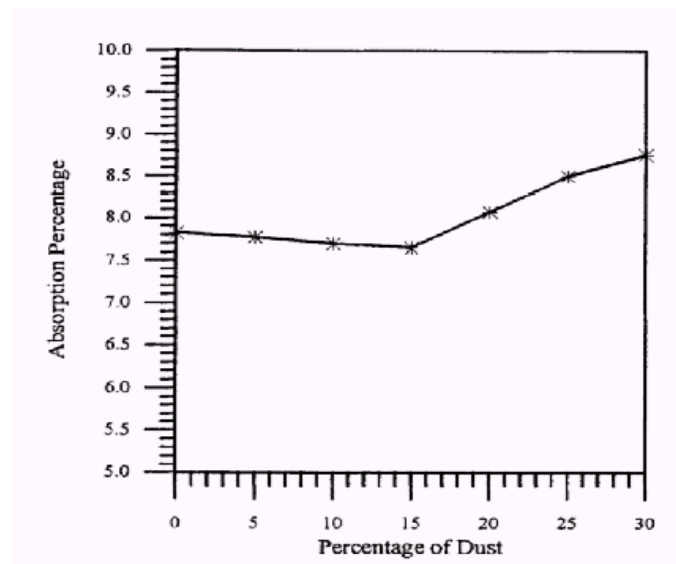


Figure I.8: Variation de l'absorption d'eau en fonction des pourcentages de fines (âge de 28j).

◆ PERMEABILITE A L'EAU :

La figure I.9 montre la variation du coefficient de perméabilité **K** en fonction des pourcentages des fines. **Tahir Celik et Khaled Marar**, ont montré que l'addition des fines améliore l'imperméabilité du béton parce qu'elles bloquent le passage de l'eau dans les pores capillaires du béton. Le coefficient de perméabilité **K** donné par la formule suivante :

$$K = \frac{Q.L}{H.A.T} \dots\dots\dots I.1$$

Q : volume d'eau traversé le spécimen (cm³)

A : section traversée par l'eau (cm²)

L : hauteur de spécimen en béton (cm)

H : gradient hydraulique à travers le spécimen L (cm)

T : temps d'écoulement de volume Q (sec).

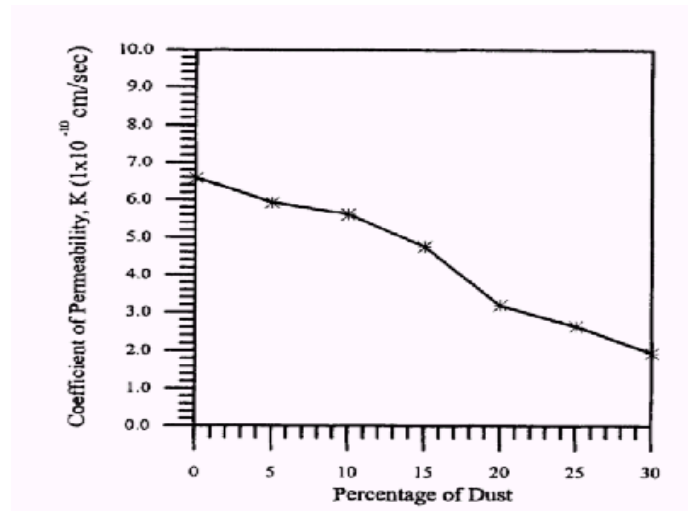


Figure I. 9: Variation de la perméabilité d'eau en fonction des pourcentages des fines (âge de 28j).

◆ RETRAIT DE SECHAGE

La figure I.10 illustre la variation du retrait de séchage en fonction des pourcentages de fines.

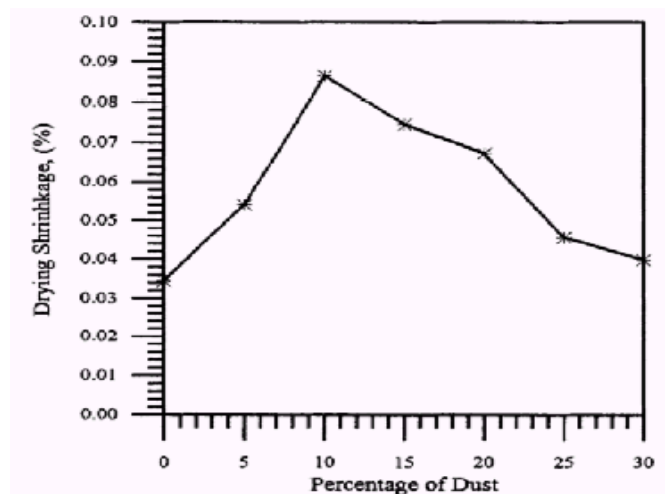


Figure I. 10: Variation du retrait de séchage en fonction des pourcentages de fines (âge de 21j).

La courbe de la figure I.10 montre que les fines augmentent l'amplitude du retrait de séchage jusqu'à un pourcentage des fines de 10%. Au-delà de 10% le retrait commence à diminuer.

I.3. 2. Effet de substitution des fines calcaires sur les propriétés physico-mécaniques du béton selon ILKER BEKIR TOPÇU et ALI UGURLU [3] :

Le but essentiel de ces travaux est de déterminer l'effet des fines calcaires sur les propriétés du béton (résistance mécanique et perméabilité à l'eau) pour deux types de granulats: granulats naturels de rivière et granulats calcaires de concassage. Le dosage en ciment est également varié.

I.3.2.1 COMPOSITION DU BETON

La composition du béton testé est résumée dans le tableau I.6.

Tableau I.6: Composition du béton.

Granulats de concassage					Granulats naturels				
E/C	Fines %	Ciment Kg/m ³	Sable Kg/m ³	Gravier Kg/m ³	E/C	Fines %	Ciment Kg/m ³	Sable Kg/m ³	Gravier Kg/m ³
0.92	0	200	681	1268	0.84	0	200	774	811
0.94	3	200	579	1176	0.85	3	200	496	790
0.95	7	200	507	1175	0.86	7	200	413	740
0.98	10	200	434	1132	0.87	10	200	363	727
0.98	15	200	330	1071	0.88	15	200	278	670
0.71	0	275	650	1208	0.60	0	275	600	1117
0.71	3	275	582	1182	0.61	3	275	531	1085
0.71	7	275	490	1142	0.62	7	275	442	1032
0.72	10	275	421	1097	0.63	10	275	380	990
0.73	15	275	324	1065	0.65	15	275	285	912
0.60	0	350	668	1245	0.50	0	350	574	1073
0.61	3	350	580	1177	0.54	3	350	500	1014
0.62	7	350	480	1111	0.56	7	350	413	962
0.61	10	350	403	1064	0.56	10	350	338	909
0.62	15	350	302	978	0.57	15	350	267	878

• Affaissement constant

I.3.2.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les figures I.11, I.12, I.13, et I.14 montrent qu'il y a une amélioration de la résistance à la compression et à la flexion avec la substitution des fines calcaires. Une diminution de la perméabilité d'eau a été observée avec l'augmentation des fines (voir figures I.15 et I.16.) Les améliorations dans les propriétés du béton sont maximales pour les valeurs de 7-10% de la matière de substitution. Lorsque le pourcentage des fines calcaires dépasse 10%, les propriétés du béton changent dans le sens négatif (diminution de la résistance à la compression et à la flexion).

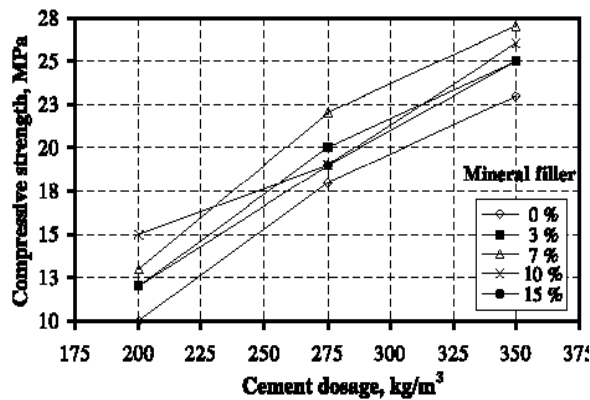


Figure I.11: Résistance à la compression à l'âge de 28 jours du béton avec des pourcentages variés de fines (granulats de concassage).

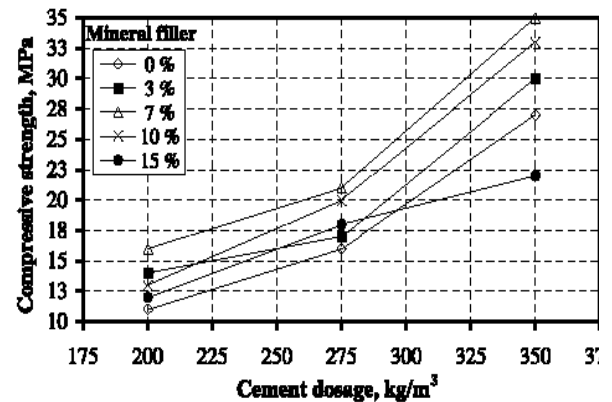


Figure I.12: Résistance à la compression à l'âge de 28 jours du béton avec des pourcentages variés de fines (granulats des rivières)

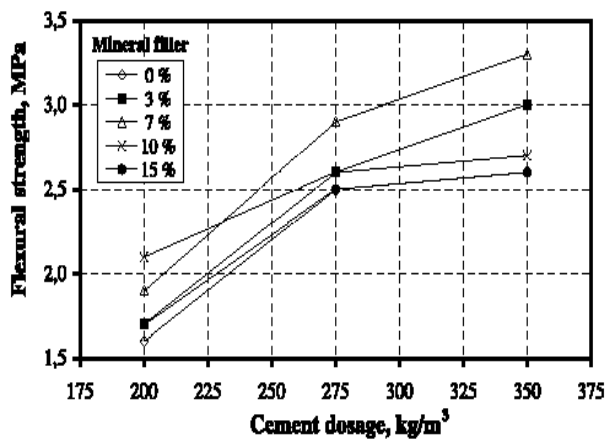


Figure I.13 : Résistance à la flexion à l'âge de 28 jours du béton avec des pourcentages variés de fines (granulats de concassages).

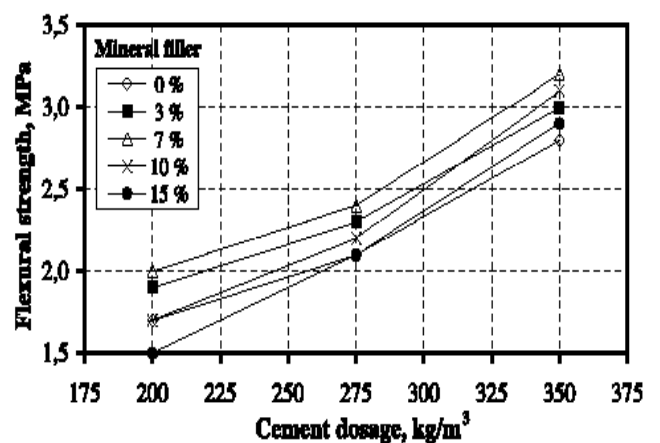


Figure I.14 : Résistance à la flexion à l'âge de 28 jours du béton avec des pourcentages variés de fines (granulats de rivière).

● PERMEABILITE A L'EAU :

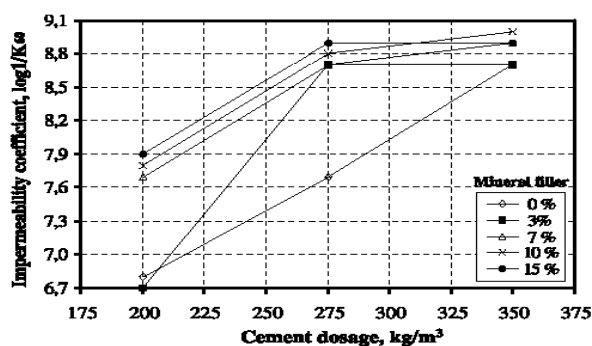


Figure I.15 : Perméabilité à l'eau (âge de 40 jours) du béton avec des pourcentages variés de fines (granulats de concassage).

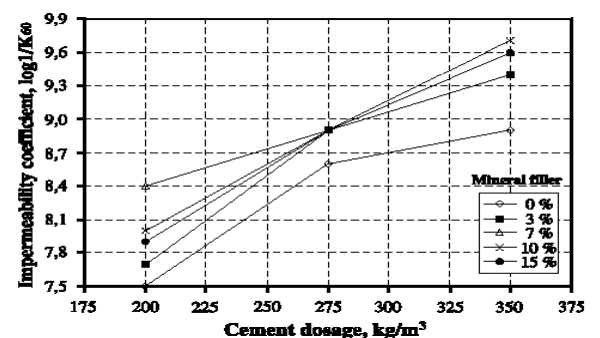


Figure I.16 : Perméabilité à l'eau (âge de 40 jours) du béton avec des pourcentages variés de fines (granulats de rivière).

I.3.3. AMELIORATION DES PERFORMANCES DES BETONS PAR AJOUTS DE FINES CALCAIRES SELON GUEMMADI. Z [4] :

Cette étude a montré l'influence des éléments fins du sable calcaire de concassage sur le comportement du béton ordinaire à base de deux squelettes granulaires (continue et discontinue) et à teneur en fines variable (0 à 24%).

La composition du béton est résumée dans le tableau suivant :

Tableau I.7 : Composition du béton en (kg/m³).

Squelette	Granulométrie continue					Granulométrie discontinue				
Mélanges	Ac0%	Ac6%	Ac12%	Ac18%	Ac24%	Ad0%	Ad6%	Ad12%	Ad18%	Ad24%
Sable 0/3	621	584	546	508	470	621	584	546	508	470
Gravier 3/8	201	201	201	201	201	348	348	348	348	348
Gravier 8/15	385	385	385	385	385					
Gravier 15/25	647	647	647	647	647	887	887	887	887	887
Ciment	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
E/C	0.52	0.55	0.56	0.57	0.55	0.58	0.59	0.59	0.59	0.58
Fines	0	38	76	113	151	0	38	76	113	151
Affaissement en (cm)	8.5	9	8	8.5	9	8	8	8.5	8	8.5

RESULTATS EXPERIMENTAUX

I.3.3.1 BETON FRAIS :

◆ TENEUR EN AIR OCCLUS :

La figure 1.17 montre que le pourcentage d'air occlus dans le béton frais diminue avec l'augmentation des taux de fines jusqu'à un pourcentage de 18%. Au delà de cette valeur, il y a une reprise d'air occlus pour les deux squelettes granulaires (voir figure 1.17).

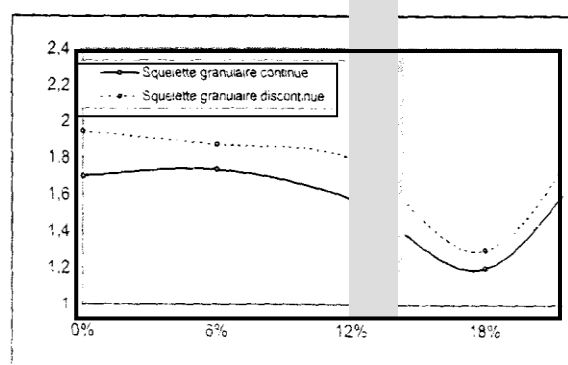


Figure I.17 : Variation de la teneur de l'air occlus en fonction du taux de fines.

I.3.3.2 BETON DURCI :

◆ RESISTANCE A LA COMPRESSION

La résistance mécanique à la compression et à la flexion pour les deux squelettes granulaires est optimale avec un taux de substitution de 18% figure I.18 et figure I.19.

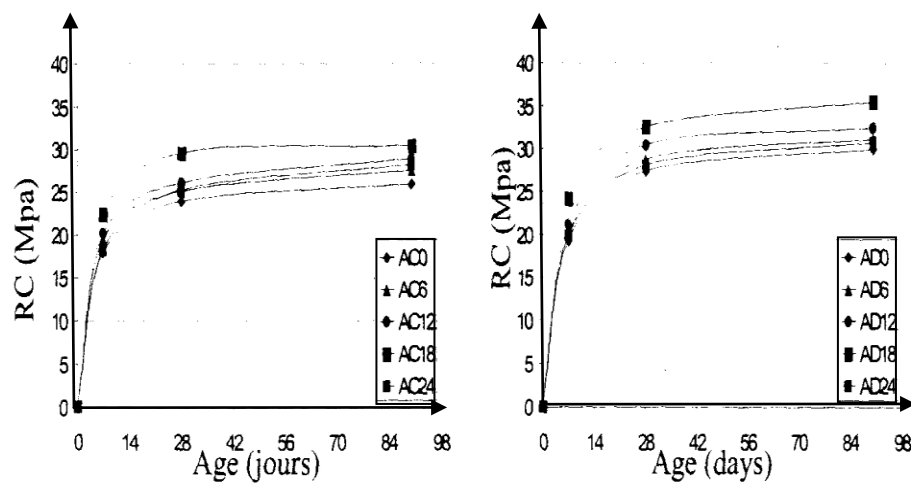


Figure I.18 : Variation de la résistance à la compression en fonction des pourcentages de fines.

◆ RESISTANCE A LA FLEXION

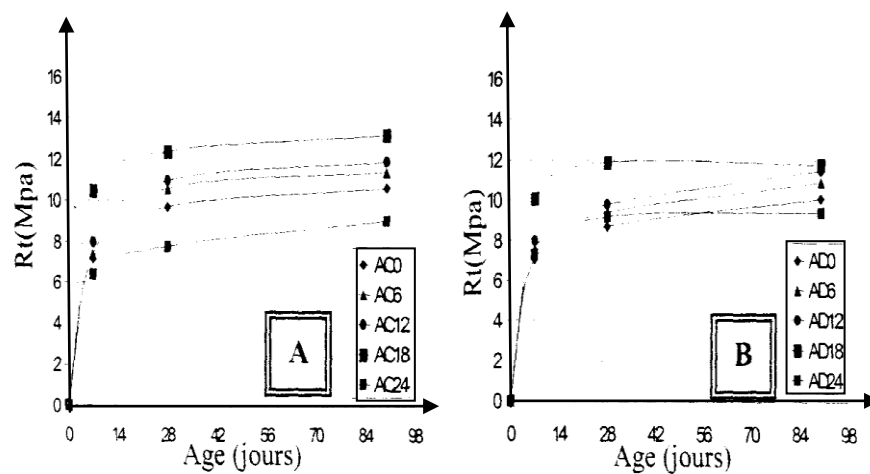


Figure I.19 : Variation de la résistance à la flexion en fonction des pourcentages de fines.

◆ RETRAIT DE SECHAGE

L'amplitude du retrait de séchage augmente en fonction des taux de fines figure I.20.

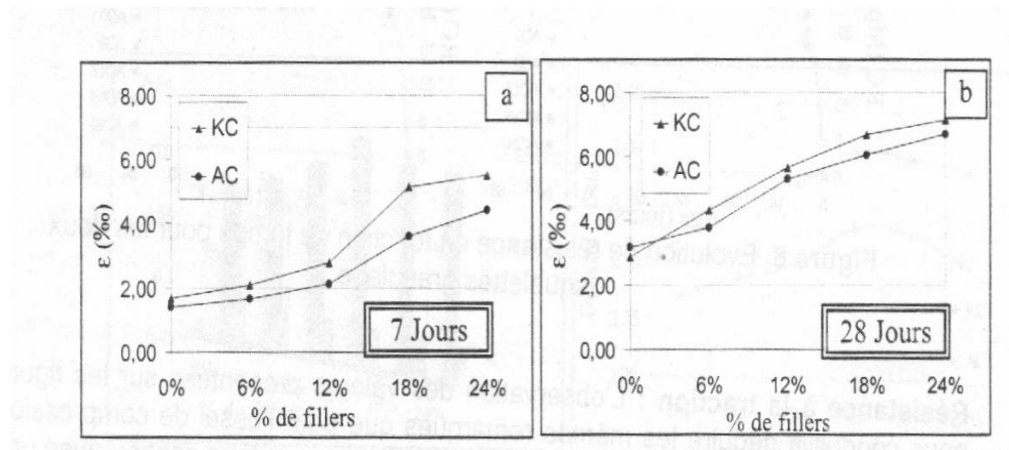


Figure I.20 : Variation du retrait de séchage en fonction des pourcentages de fines.

Remarque : Selon Guemmadi .Z, ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Dreux, Bertrand [4] .

I.4. MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE

I.4.1 GENERALITES

Généralement l'approche classique utilisée dans le dimensionnement des structures est basée sur la limite d'élasticité σ_e . Cette approche consiste à dimensionner les structures soumises à des contraintes σ restant inférieures à la contrainte admissible σ_e [13] :

$$\sigma \leq \beta \cdot \sigma_e$$

β : Facteur de sécurité qui est inférieur à 1.

En réalité, le comportement des structures sous un système de charges donné dépend du matériau constitutif et l'existence des défauts (fissures) au sein du matériau ; ce dernier n'est pas tenu en compte dans l'approche classique basée sur la limite d'élasticité. Pour cette raison, l'utilisation de l'approche basée sur la mécanique de la rupture est nécessaire pour maîtriser la propagation des fissures dans le matériau.

L'approche basée sur la mécanique de la rupture est à trois variables :

1. La contrainte appliquée σ
2. La ténacité (ou facteur d'intensité des contraintes) K qui remplace la limite d'élasticité σ_e dans l'approche classique basée sur la théorie d'élasticité.
3. La taille de défaut dans le matériau.

Deux approches sont utilisées dans la mécanique de la rupture:

1. Approche énergétique appelée aussi approche globale (critère de la propagation des fissures donné par Griffith) basée sur le principe de la thermodynamique : caractérisée par l'étude du comportement global de la structure fissurée sur le plan énergétique.
2. Approche d'intensité des contraintes appelé aussi approche locale : caractérisée par une étude des champs de contrainte et de déformation au voisinage du front de fissure.

Ces deux approches sont équivalentes dans certaines conditions (comportement du matériau élastique linéaire) [13].

I.4.2. APPROCHE ENERGETIQUE

Physiquement, pour qu'une fissure se propage dans un matériau il faut que le taux de restitution de l'énergie G soit égal à l'énergie spécifique de rupture $2\gamma_s$ (Pierre Rossi [30]) :

$G < 2\gamma_s \rightarrow$ *pas de propagation de fissure*

$G = 2\gamma_s \rightarrow$ *propagation de fissure*

- **DETERMINATION DE L'ENERGIE DE LA RUPTURE G [15]**

Soit le système présenté dans la figure I.21a, où les deux états ne diffèrent que par la surface de la fissure A .

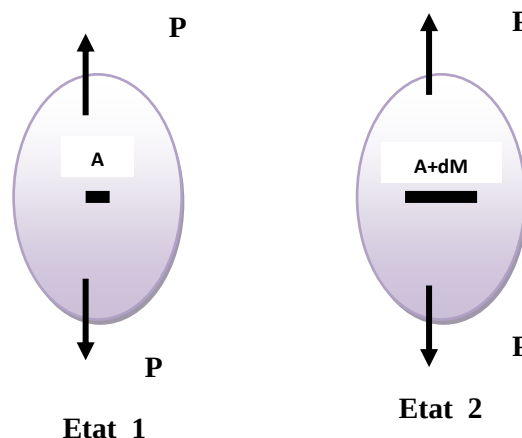


Figure I.21a

$$G.dA = dw - du = P.df - d\left(\frac{1}{2}Pf\right)$$

$$G.dA = \frac{1}{2}(P.df - f.dP) \dots\dots\dots (2)$$

P : force appliquée .

f : déplacement du point d'application de la force P.

dw : le travail de la force P.

du : variation du potentiel élastique du système.

L'intégration de l'équation (1) pour u à l'état (1) et l'état (2) égal à 0 et par conséquent du=0.

L'énergie cinétique est nulle

$$\int_a^b G.dA = G \int_a^b dA = G .A = \int_a^b dw$$

$$\int_a^b dw = \int_a^b P.df = D$$

$$\text{d'où : } G = \frac{D}{A} \dots\dots\dots(3) \quad [15]$$

D : l'air sous la courbe effort-déplacement.

A : l'air de la surface rompue.

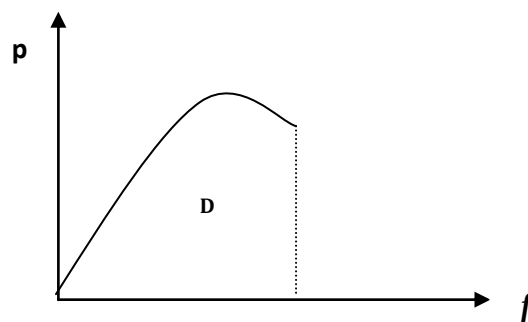


Figure I.21: Courbe effort-flèche.

• FACTEUR D'INTENSITE DES CONTRAINTES [15]

$$K_I^2 = k.E.G \dots\dots\dots(4)$$

k=1 : Contraintes planes

$$k = \frac{1}{(1-\nu^2)} : \text{Déformations planes}$$

I.4.2.2 MODE DE PROPAGATION DE FISSURE [15]

- **Mode I** : mode d'ouverture

Le mode d'ouverture est le plus dangereux, les déplacements des lèvres de la fissure sont perpendiculaires au plan de propagation de la fissure (figure I.22).

- **Mode II** : mode de cisaillement plan

Les deux lèvres de la fissure se déplacent dans le plan de la propagation et parallèles à la direction de propagation (figure I.22).

- **Mode III** : mode de cisaillement anti-plan

Le déplacement des lèvres de la fissure pour ce mode est dans le plan de propagation et perpendiculaire au fond de la fissure "perpendiculaire à la direction de la propagation de la fissure (figure I.22).

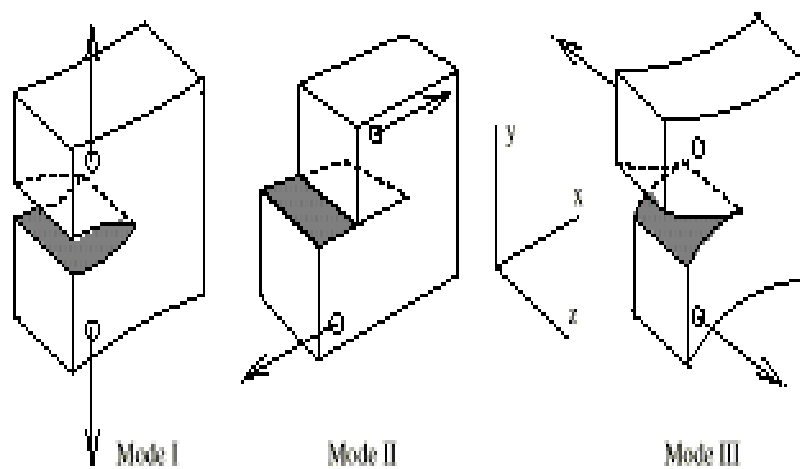


Figure I.22 : Les trois modes de la rupture.

I.4.3 APPROCHE D'INTENSITE DES CONTRAINTES (ANALYTIQUE) [13]

La figure I.23 représente le champ des contraintes d'un élément (e) au voisinage de la fissure sollicitée en mode I dans un repère en coordonnées polaires r, θ :

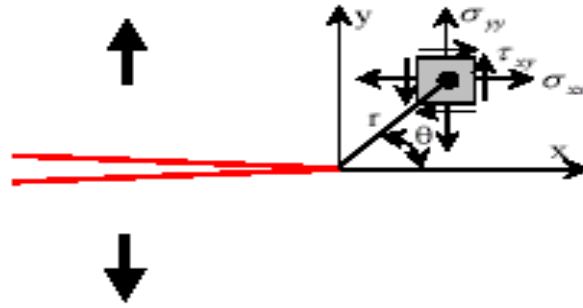


Figure I.23 : contraintes près de l'extrémité d'une fissure.

Les contraintes sont données en fonction du facteur d'intensité des contraintes K en mode I:

□ **Mode I** [13] :

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi.r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \dots \dots \dots (5)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi.r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \dots \dots \dots (6)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi.r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \dots \dots \dots (7)$$

Les formules donnant le facteur K pour les différents types de chargement existent dans les manuels spécialisés.

□ **Mode II** [13] :

$$\sigma_{xx} = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi.r}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \right) \dots \dots \dots (8)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi.r}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \dots \dots \dots (9)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi.r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \dots \dots \dots (10)$$

□ **Mode III** [13] :

$$\sigma_{13} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi.r}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \dots \dots \dots (11)$$

$$\sigma_{23} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi.r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \dots \dots \dots (12)$$

I.4.4. INFLUENCE DES GRANULATS SUR LA RESISTANCE A LA PROPAGATION DE FISSURES [15]:

Les résultats regroupés dans le tableau I.8 montrent que l'énergie de la rupture G_f augmente avec l'augmentation de dimensions des granulats.

Tableau I.8: Comparaison entre la pâte, mortier et le béton d'après MODEER 1979[15].

Matériau	G_f J/m	E MPa	R_t MPa	K_{IC} $MPa\sqrt{m}$	Long. caractéristique m $l_{cract} = \frac{E G_f}{R_t^2}$
Pâte de ciment	9.3	21600	5.5	0.45	0.01
Mortier	59.5	29200	3.5	1.3	0.14
Béton	108	29200	3.5	1.8	0.26

I.4.5 ETUDE DE L'ENERGIE DE LA RUPTURE D'UN BETON CALCAIRE

J.K. Kim et C.S Lee [5], ont présenté dans une étude expérimentale les caractéristiques de la propagation de fissures dans un béton calcaire non adjuvanté et adjuvanté. Les résultats expérimentaux sont comparés avec deux types du béton :

- béton à base d'un sable de concassage « granite G ».
- béton à base d'un sable de rivière R.

I.4.5.1 Composition du béton : La composition du béton est résumée dans le tableau I.9.

Tableau I.9 : Composition du béton.

PROPORTIONS DES CONSTITUANTS DU BETON Kg/m^3							
Melange	E/Liant	Ciment	Eau	Sable	gravier	F.S	Adjuvant
L-20 G-20 R-20	20	628	140	522	1059	70	3.5
R-30	30	489	154	593	1100	26	2.0
L-40 G-40 R-40	40	423	169	601	1124	-	1.0
L-60 G-60 R-60	60	331	199	726	1002	-	-
L : sable calcaire, G : granite, R : sable de rivière, 20, 30, 40, et 60 sont les rapports E/ Liant (%)							
Liant= dosage en ciment+ fumé de silice.							

I.4.5.2 RESULTATS

Les résultats obtenues sont regroupés dans le tableau I.10 et les figures I.24, I-25

Tableau I.10 : Résultats obtenues par J.-K. Kim [5].

Mélange	R_c MPa	R_t MPa	E GPa	F_{max} KN	G_f N/m	Long.caract (l_{ch} en mm)
L-60	31.27	3.48	2994	3.85	100.15	247.6
L-40	47.41	4.61	3372	4.14	120.45	191.1
L-20	82.80	6.05	4057	7.84	104.09	115.4
G-60	32.57	3.24	2879	3.64	88.29	242.1
G-40	45.85	4.78	3340	3.87	116.14	169.8
G-20	85.68	6.60	3957	7.40	113.06	102.7
R-60	34.87	3.31	2651	3.39	83.32	201.60
R-40	55.28	4.69	3158	3.91	116.36	167.10
R-30	66.91	5.18	3435	5.23	98.74	126.40
R-20	88.80	6.12	3814	8.24	92.34	94.00

1. L'énergie de la rupture G_f d'un béton avec sable calcaire est légèrement supérieure à celle d'un béton avec un sable de rivière (tableau I.10 et figure I.24) cela peut être due au pourcentage des fines incluses dans le sable qui améliorent la cohésion entre la pâte de ciment et le squelette granulaire.
2. La longueur caractéristique du béton calcaire est presque la même que celle d'un béton avec sable de rivière ou granite. Ainsi, la longueur caractéristique diminue avec l'augmentation de la résistance à la compression (voir tableau I.10 et figure I.25).

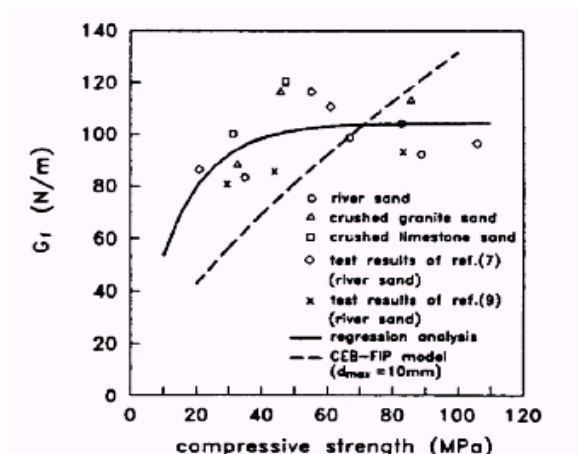


Figure I.24 : Variation de l'énergie de rupture en fonction de la résistance à la compression.

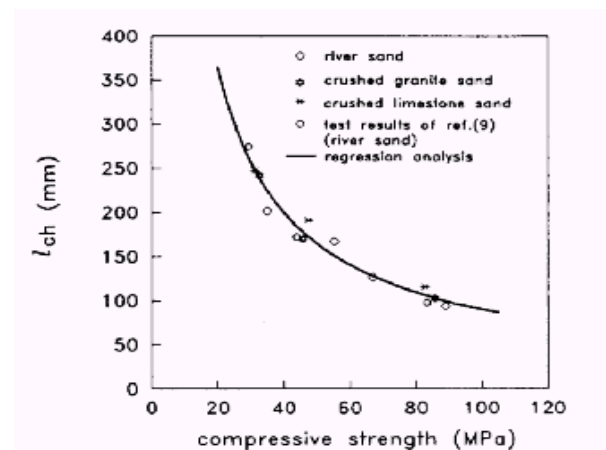


Figure I.25 : Variation de longueur caractéristique en fonction de la résistance à la compression.

I.5. ATTAQUE DU BETON PAR LES ACIDES

I.5.1 GENERALITES

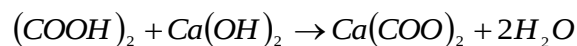
Généralement, l'attaque du béton par les acides prend la forme d'une décomposition des produits de l'hydratation et de formation de nouveau composé qui peut être soluble ou insoluble **Neville [6]**.

La nocivité de l'attaque acide dépend de la solubilité de composé (sel) formé par réaction avec la portlandite **Ca (OH)₂ Larrard [21]**.

L'attaque du béton devient grave pour un **PH** inférieur à **5.5** et considéré très sévère pour un **PH** inférieur à **4.5** **ex** : les pluies acides contiennent principalement de l'acide sulfurique **H₂SO₄** et de l'acide nitrique provoquant des dégradations des surfaces exposées du béton (dans ce cas le **PH** varie entre **4** et **4.5**) **Neville [6]**.

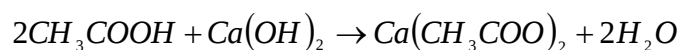
I.5.2. Les réactions chimiques des différents acides avec la portlandite Ca (OH)₂

1. ACIDE OXALIQUE



Le nouveau composé formé est le **sel oxalique de calcium** qui est insoluble dans l'eau et donc le béton n'est pas endommagé (c'est le cas de l'acide phosphorique et l'acide trotrique) **Larrard [21]**.

2. ACIDE ACETIQUE



Le composé formé est le **sel acétate de calcium** qui est très soluble dans l'eau, donc la porosité augmente avec une altération des propriétés de béton a été observé. On peut citer quelques acides qui fonctionnent sur ce modèle l'acide **lactique** et l'acide **formique** qui proviennent de l'industrie agroalimentaire **[21]**.

3. ACIDE CARBONIQUE :

L'acide carbonique réagit avec la portlandite pour former de la calcite **CaCO₃**. Dans certains cas (quantité élevée de **CO₂** et d'eau douce) la calcite va réagir avec l'acide

carbonique pour donner le bicarbonate de calcium. Donc l'agressivité de l'eau contenant du gaz carbonique dépend de la quantité de gaz dissous et de la dureté de l'eau [21].

4. ACIDE SULFURIQUE H_2SO_4 [25]:

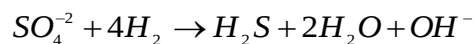
L'acide sulfurique peut produire par la transformation du sulfate en H_2S (très toxique) par les bactéries anaérobies et en acide sulfurique H_2SO_4 par les bactéries aérobies. Le H_2SO_4 provoque des corrosions sévères dans le béton. On distingue deux types principaux de bactéries :

- **Anaérobie** : *Desulfovibrio desulfuricans*.
- **Aérobie** : *Thiobacillus concretivorus*.

a) Bactérie anaérobie (*Desulfovibrio desulfuricans*)

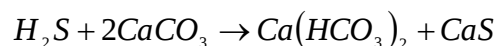
◆ Production de H_2S

Au sein du béton les bactéries anaérobies transforment les sulfates et elles produisent le H_2S (hydrogène sulfuré) qui est libéré vers la surface (figure I.26), la réaction chimique s'écrit sous la forme suivante :



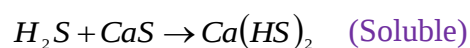
Minéral

■ Action de H_2S sur le béton :



Soluble

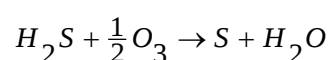
Lixiviation



b) Bactéries aérobies (*Thiobacillus concretivorus*)

- Oxydation du H_2S (activité bactérienne)

Le H_2S est décomposé sous forme de S par les bactéries aérobie.



- Oxydation du S

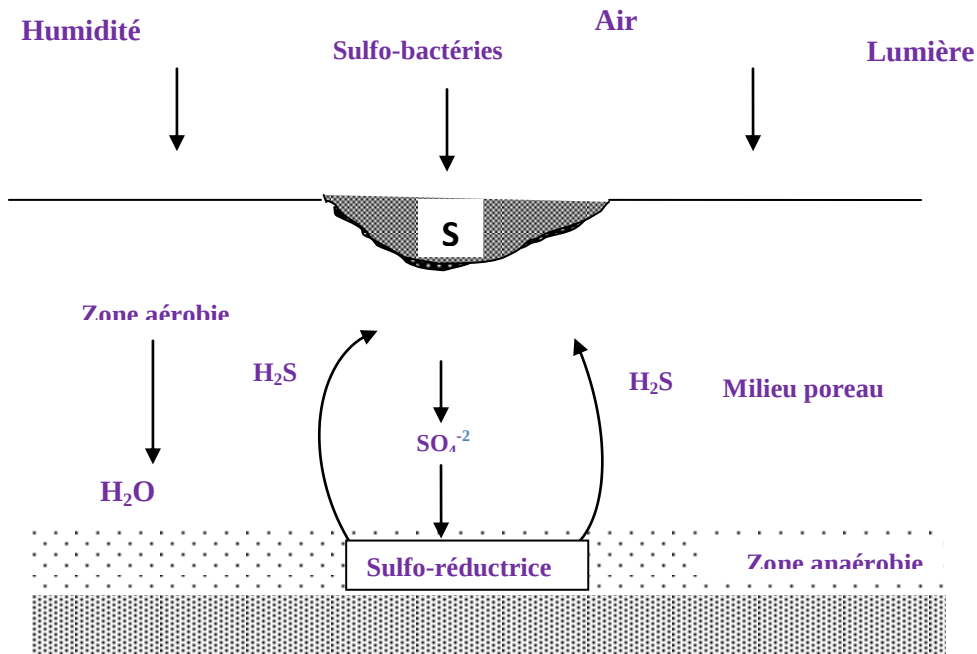
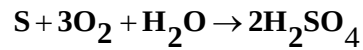
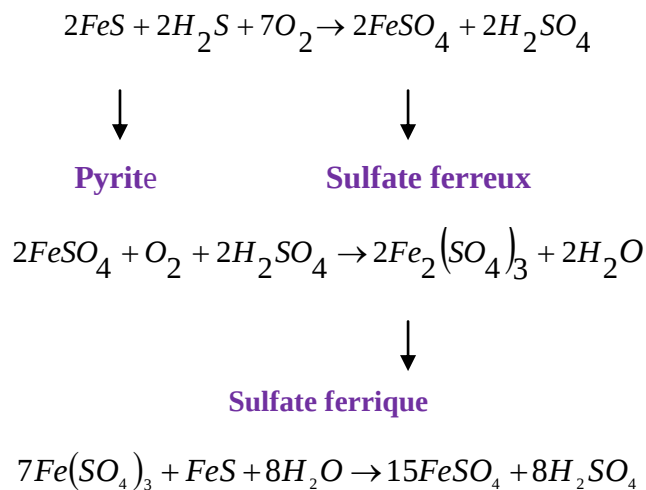


Figure I.26 : Agression du béton par l'activité bactérienne

Le même principe de production de H_2SO_4 a été constaté dans une conduite d'évacuation des eaux usées ou industrielles. La figure I.27 montre les dégradations dues à l'attaque par l'acide sulfurique dans une canalisation des eaux usées.

Les sols contenant des schistes argileux pyriteux provoquent des gonflements importants et le dégagement de l'acide sulfurique H_2SO_4 [25].



● ATTAQUE DE LA CALCITE CaCO_3 PAR L'ACIDE SULFURIQUE

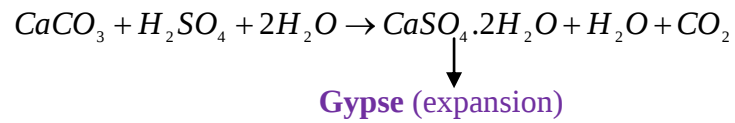


Figure I.27 : Cristaux de gypse dans un béton de 100 ans [26]

● EXEMPLES D'ATTAQUE DE H_2SO_4



Figure I.28 : Dégradation due à l'attaque de l'acide sulfurique dans une canalisation des eaux usées [22].

I.5.3 RESISTANCE A LA CORROSION PAR L'ACIDE SULFURIQUE DES MORTIERS A BASE DE CIMENT ALUMINEUX ET DE CPA :

La résistance à l'attaque de l'acide sulfurique des mortiers à base de ciment alumineux est dix fois plus élevée que celle du ciment Portland (voir figure I.29 I.30). D'autres essais ont montré que des bétons à base de ciment alumineux résistent durablement aux eaux usées d'un PH de 4 [22].



Fig. I.29. Epruvettes prismatiques à base de ciment alumineux et de CPA après attaque de 150 jours à l'acide sulfurique.

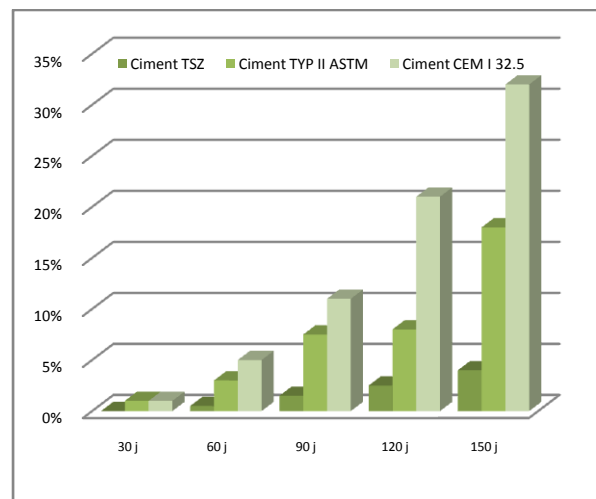


Fig.I.30. Résistance à la corrosion par l'acide sulfurique de mortiers à base de ciment alumineux et de CPA.

TSZ : Ciment alumineux.

I.6. SYNTHESE DE L'ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Les principales conclusions qu'on peut tirer de cette étude bibliographique sont les suivantes :

- Le sable de concassage peut être utilisé pour produire un béton à haute performance avec des propriétés mécaniques semblables ou meilleures que le béton préparé avec un sable naturel.
- Les travaux sur l'effet de fines calcaires sur les propriétés physico-mécaniques du béton montrent certaines divergences dans les résultats selon les auteurs. Certains auteurs, ont montré que les améliorations dans les propriétés physico-mécaniques du

béton sont maximales pour des taux de substitution de l'ordre de **7-10%** de fines calcaires par rapport au poids du sable. Ainsi l'imperméabilité du béton à l'eau augmente avec l'augmentation des fines calcaires dans le sable [1] et [2]. D'autre part, la résistance mécanique du béton (résistance à la compression et à la flexion) pour deux types de squelettes granulaires (continu et discontinu) est optimale avec un taux de substitution des fines calcaires de l'ordre de **18%** et que l'amplitude du retrait augmente avec l'augmentation des pourcentages de fines calcaires dans le sable [3].

- Les fines calcaires incluses dans le sable augmentent l'énergie de la rupture G_f du béton cela peut être due au pourcentage des fines incluses dans le sable qui améliorent la cohésion entre la pâte de ciment et le squelette granulaire.
- L'acide réagit avec les produits de l'hydratation tel que la portlandite Ca(OH)_2 pour former un nouveau composé qui peut être soluble ou non soluble. En outre, les acides peuvent réagir avec la calcite CaCO_3 présente dans les granulats de concassage [4]. Certains types d'acides qui proviennent de l'industrie tel que l'acide **lactique** et l'acide **formique** [15] ou produits par transformation de soufre par les bactéries, ce type d'acide est appelé acide sulfurique H_2SO_4 . Cette transformation se manifeste dans le béton ou dans une conduite d'évacuation des eaux usées. La réaction de l'acide sulfurique avec la calcite donne le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (produit expansif) appelé aussi le sulfate de calcium. Les bétons à base de ciment alumineux résistent bien aux eaux usées chargées d'acide sulfurique [5].

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTALES UTILISEES

II.1 INTRODUCTION

Nous présentons dans ce chapitre les différentes techniques expérimentales utilisées dans la caractérisation des matériaux employés.

La description des méthodes d'essais de laboratoire est résumée dans ce qui suit: méthodes de caractérisation des matériaux constituant le béton (sable, fines calcaires, gravier, ciment, eau et adjuvant). Par la suite nous présenterons les méthodes de caractérisation physico-mécaniques du béton à l'état frais et durci (consistance, air occlus, absorption, retrait, résistance mécanique et la résistance à la propagation des fissures) et enfin, la description des méthodes de mesure utilisées dans la détermination de la durabilité du béton aux attaques des acides.

II.2. ESSAIS REALISES SUR LES GRANULATS

II.2.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE

L'essai d'analyse granulométrique permet de déterminer le pourcentage en poids des différents grains constituant l'échantillon (sable ou gravier).

L'essai est réalisé conformément à la norme européenne **BS : EN 12620:2002 [16]**.

II.2.2. ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTATION

L'analyse granulométrique par sédimentométrie est réalisée sur des échantillons de sable de diamètre inférieur à 100 micromètres.

Le but principal de cet essai est de déterminer le pourcentage en poids des éléments fins et de tracer la courbe granulométrique des fines jusqu'à un diamètre d'environ 2 micromètres.

L'essai est réalisé selon la norme **NF. P94-093 [9]**.

II.2.3. EQUIVALENT DE SABLE

L'équivalent de sable est un essai réalisé suivant la norme **NF.P18-598** équivalente à **NA455** dont l'objectif de cet essai est de déterminer la propreté du sable [17].

II.2.4. ESSAI AU BLEU DE METHYLENE

L'essai au bleu de méthylène permet d'apprécier l'activité de la fraction argileuse dans le sable. L'essai est réalisé conformément à la norme **NF. P94-068** équivalente à **NA 1948. [9]**.

La valeur du bleu est donnée par l'expression suivante:

$$V_B = \frac{B}{m} \cdot 100 \dots \dots \dots II.1$$

B : masse du bleu de méthylène introduit en gramme.

m :masse de l'échantillon de sable en gramme.

II.2.5. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE [9]

La masse volumique apparente est donnée par :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \dots \dots \dots II.2$$

M : masse de l'échantillon (sable ou gravier) en gramme.

V : Volume apparent de l'échantillon sec en tenant compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

II.2.6. MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE [9]

La masse volumique absolue d'un sable ou d'un gravier est déterminée par la méthode des déplacements de liquide.

La masse volumique est donnée par:

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \dots \dots \dots II.3$$

M : masse de l'échantillon (300 g).

V₁ : Volume d'eau dans l'éprouvette avant introduction de l'échantillon.

V₂ : Volume d'eau dans l'éprouvette après introduction de l'échantillon.

II.2.7. ABSORPTION DES GRANULATS

L'absorption des granulats est déterminée selon la norme **NF P 18-554 [19]** équivalente à **NA 451 et 18-555 [18]**. Par définition, l'absorption des granulats est le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon.

L'absorption des granulats est donnée par la relation suivante:

$$Abs = \frac{M_a - M_s}{M_s} \cdot 100 \dots \dots \dots II.4$$

Ma : masse de l'échantillon imbibé par l'eau pendant 24 heures.

M_s : masse de l'échantillon sec.

II.2.8.ESSAI LOS ANGELES

La résistance au choc d'un gravier est déterminée par un essai appelé **Los Angeles** suivant la norme **NF 18 -573** équivalente à **NA 458 [9]**. Cette résistance au choc est exprimée par un coefficient L_A donné par la relation suivante:

$$L_A = \frac{m}{M} \cdot 100 \dots \dots \dots II.5$$

M : masse de l'échantillon soumis à l'essai ($M=5000g$).

m : masse des éléments inférieurs à 1.6mm produits par la fragmentation de l'échantillon testé, que l'on soumet aux chocs des boulets normalisés dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations.

II.3.3 ESSAIS REALISES SUR LE CIMENT

II.3.1.FINESSE DU CIMENT

La finesse du ciment est caractérisée par sa surface spécifique qui est définie par la surface totale des particules de ciment contenus dans une masse unité de poudre.

La mesure de la finesse est effectuée à l'aide d'un appareil appelé **perméabilimètre de Blaine** dont les différentes étapes d'essai sont définies dans la norme **EN 196-6 [9]**. La surface spécifique d'un ciment est donnée par la relation suivante.

$$SP = K \cdot \sqrt{t} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \frac{\sqrt{P^3}}{1-P} \cdot \frac{1}{\sqrt{0.1\eta}} \dots \dots \dots II.6$$

K : Constant de l'appareil.

η : Viscosité de l'air à une température de l'essai.

P : Porosité qui est définie par :

$$P = \frac{V - V_c}{V} \dots \dots \dots II.7$$

V : Volume de la cellule.

V_c : Volume absolu de ciment compacté dans la cellule.

ρ_c : masse volumique absolue du ciment.

II.3.2. CONSISTANCE DE CIMENT :

L'objectif de cet essai est de déterminer le pourcentage de la quantité d'eau nécessaire pour fabriquer la pâte de ciment de consistance normale qui est caractérisée par sa fluidité. L'essai est effectué à l'aide de l'appareil de **Vicat** conformément à la norme **EN 196-3 [9]**.

II.3.3. TEMPS DE PRISE

Il s'agit de déterminer le temps de prise de la pâte de ciment pendant les premières heures de durcissement.

Le temps de prise d'un ciment dépend de plusieurs paramètres tel que la finesse du ciment, la composition chimique, la température ambiante et l'utilisation d'un adjuvant.

L'essai est réalisé par l'appareil de **Vicat** équipé par une aiguille de 1.13 mm de diamètre. Les détails d'essai sont décrits par la norme **EN 196-3**.

II.3.4. DETERMINATION DE LA STABILITE [9]:

L'essai de stabilité est réalisé à l'aide d'un appareil appelé **Le Chatelier**. Le but d'essai est de déterminer l'augmentation du volume de la pâte de ciment au cours de la réaction de l'hydratation. La stabilité est caractérisée par la valeur:

Stabilité= C-A.....II.8

A: distance entre les points des aiguilles après 24 h de conservation à une température $T=20^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative $HR=98\%$.

B: distance entre les points des aiguilles après 3 h dans un bain d'eau maintenu à ébullition.

C: distance entre les points après refroidissement jusqu'à 20°C .

Les détails d'essai sont décrits par la norme **EN 196-3**.

II.4. ESSAIS REALISES SUR L'ADJUVANT

II.4.1 EXTRAIT SEC

L'extrait sec d'un adjuvant est déterminé par un simple essai conformément à la norme **EN 480-8 [9]**.

Le pourcentage d'extrait sec d'un adjuvant est donné par la relation suivante:

$$S(\%) = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100 \dots \dots \dots II.9$$

S : Extrait sec de l'adjuvant (%).

m_1 : Masse de l'adjuvant liquide ($m_1=10\text{g}$).

m_2 : Masse de l'adjuvant après le séchage à l'étuve pendant 4h à une température 105°C .

II.4.2 METHODE DES COULIS [12] ET [8]

L'objectif principal de la méthode des coulis consiste à déterminer expérimentalement le dosage optimal en super-plastifiant (dose de saturation). Comme règle générale, l'essai est réalisé avec un rapport E/C qui varie entre 0.3 à 0.4. Pour la composition de coulis, en utilisant uniquement le ciment, eau et le super-plastifiant avec des pourcentages variés. Il existe deux méthodes principales pour déterminer la dose de saturation :

1. **METHODE DE MINI CONE** : Le principe de cette méthode consiste à mesurer l'étalement de coulis.



Photo 01 : Mine cône

2. **METHODE DU CONE MARSH** : Le principe d'essai consiste à préparer un certain volume de coulis et à mesurer son temps d'écoulement voir figure II.1.a.



Photo 02 : Cône Marsh

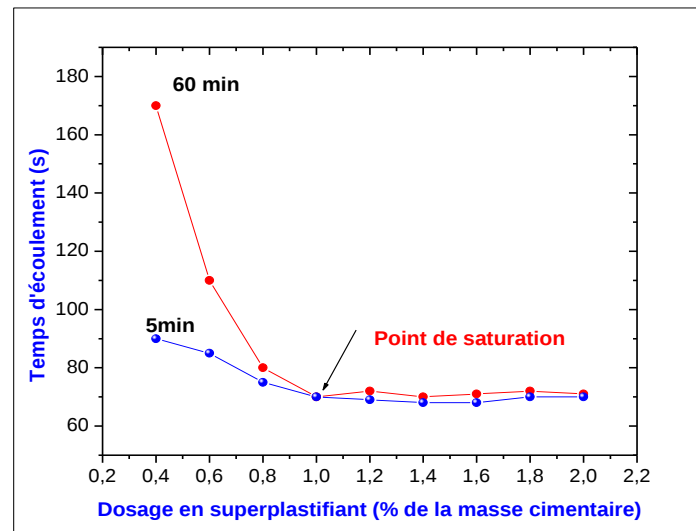


Figure II. 1. a : Détermination de la dose de saturation.

3. METHODE DES COULIS PROPOSEE PAR LCPC [12] ,[8]

C'est une nouvelle méthode des coulis proposée par le groupe l'**AFREM** de **LCPC** pour la formulation des **BHP**, le mode opératoire, composition du coulis et la manière d'obtenir des résultats sont exposés dans ce qui suit :

- **MODE OPERATOIRE** : le mode opératoire est comme suit :

a) Appareillage :

- ✓ Un cône de **Marsh** (capacité 1.2l et diamètre de la buse égal à 1.5cm).
- ✓ Chronomètre.
- ✓ Bêcher gradué de capacité supérieure ou égale à 0.5l.
- ✓ Malaxeur électrique.

b) Composition de coulis : la composition de coulis est déduite de celle du béton , en enlevant tous les éléments supérieurs à 2 mm.

c) Mesure du temps d'écoulement : pour la mesure du temps d'écoulement, on a suivi les étapes suivantes :

- Verser un litre de coulis dans le cône de Marsh. La première mesure se fait à **$t_0 + 5\text{min}$** (t_0 est le temps de malaxage) on mesure le temps d'écoulement des 500 premiers millilitres.

- Pour le suivi de la fluidité du coulis, on a mesuré le temps d'écoulement pour les échéances $t_0+15\text{min}$ et $t_0+60\text{min}$. avant chaque mesure le coulis doit être malaxé pendant 15 seconds à petite vitesse.

d) Dosage de saturation :

- Tracer les points expérimentaux de la courbe Log t en fonction des dosages de superplastifiant (extrait sec).
- Tracer une droite D de la pente 2/5 et tracer les droites D_i parallèles à la droite D et tangentes à ligne brisée. Les abscisses des points de tangentes notés x_i

$$x_s = \sup(x_i)$$

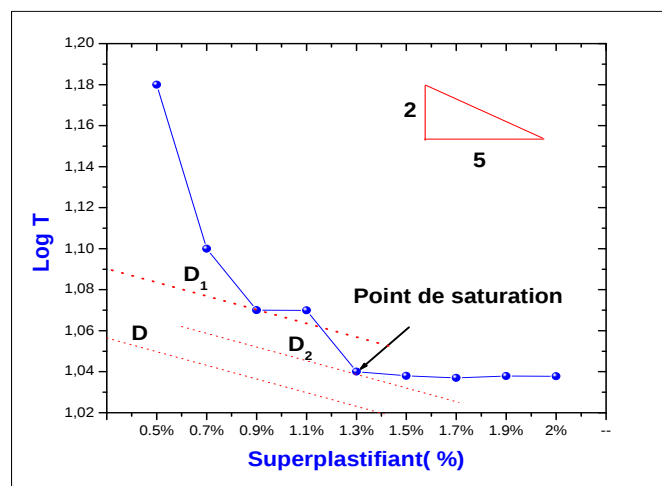


Figure II. 1. b : Détermination de la dose de saturation.

II.5. ESSAIS REALISES SUR LE BETON

II.5.1. CONSISTANCE DU BETON

La consistance du béton est déterminée par un essai d'affaissement au cône d'Abrams "Slump test". L'essai est effectué conformément à la norme NF P 18-45 [9].

II.5.2. TENEUR EN AIR DANS LE BETON FRAIS

La mesure de la teneur en air total du béton frais est réalisée suivant la méthode gravimétrique décrite par la norme ASTM C 139-92 [6]. La méthode gravimétrique consiste à comparer la masse volumique du béton compacté contenant de l'air, à la masse volumique théorique du béton sans air. La teneur en air est donnée par la relation suivante:

$$A(\%) = \left(1 - \frac{\rho_{reel}}{\rho_{th}} \right) \cdot 100 \dots \dots \dots II.10$$

A (%): teneur en air exprimée en pourcentage du volume total du béton.

$\rho_{\text{réel}}$: masse volumique réelle du béton mesurée en laboratoire sur un volume de béton frais environ de 6.00l.

ρ_{th} : masse volumique théorique sans air.

II.5.3. RESISTANCE MECANIQUE

II.5.3.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION

La résistance à la compression est déterminée sur des éprouvettes cubiques de dimensions (10x10x10) cm³. Après le démoulage, les éprouvettes sont conservées à l'eau à une température T=20 ± 2°C pendant 28 jours. L'écrasement des éprouvettes est réalisé sur une presse hydraulique.

Au moment de la rupture, la force et la contrainte sont affichées sur l'écran de l'imprimante de la presse:

Où:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{A} \dots\dots\dots \text{II.11}$$

σ_r : contrainte à la rupture en MPA.

A : section de l'éprouvette en mm².

F_r : force appliquée à la rupture en N.

La presse utilisée est montrée sur la photo 3.



Photo 3 : La presse utilisée pour la compression.

II.5.3.2. RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION [27]

La résistance à la traction par flexion est mesurée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (7x7x28) cm³. Le dispositif d'essai est montré sur la figure II.2.

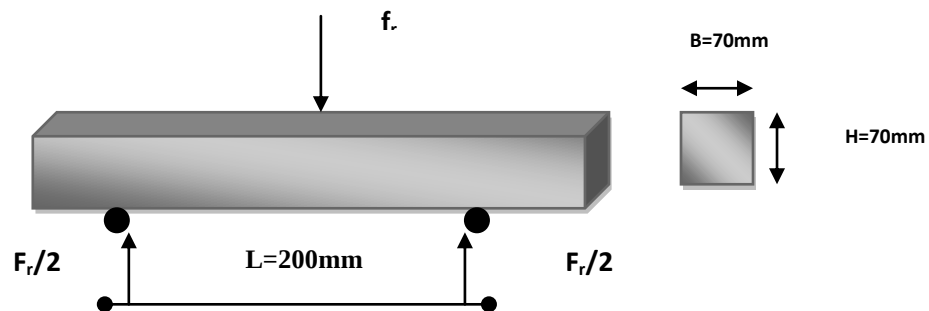


Figure II.2 : dispositif d'essai.

La contrainte de traction est donnée par :

$$\sigma_{rf} = \frac{1.5 \cdot f_r \cdot L}{b^3} \dots\dots\dots II.12$$

f_r :force de la rupture en flexion (N).



Photo 4: La presse utilisée pour la flexion.

II.5.4 ESSAI DE L'AUSCULTATION DYNAMIQUE (ESSAI NON DESTRUCTIF)

L'essai est réalisé conformément à la norme **P 18 –418 [31]**. L'appareil utilisé est appelé **Ultrason** (photo 5). La méthode consiste à mesurer le temps nécessaire à une impulsion dynamique pour traverser le volume du béton (éprouvette).

MODE OPERATOIRE :

1. Placer l'émetteur et le récepteur sur les deux extrémités de l'éprouvette en béton.
2. lire la valeur du temps de la première impulsion des ondes longitudinales générées par le transducteur entre deux points déterminés dans le béton.

• **VITESSE DE SON :**

$$V = \frac{L}{t} \dots\dots\dots II.13$$

1. V : vitesse du son exprimée en m/s.
2. L : distance entre les deux capteurs exprimée en m.
3. t : temps mesuré exprimé en μ s.



Photo 5: Appareil à ultrason.

II.5.5. RETRAIT DE SECHAGE

- **PROCEDURE EXPERIMENTALE**

La mesure de retrait est effectuée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (7x7x28) cm jusqu'à l'âge de 150 jours. Les déformations des éprouvettes sont mesurées à l'aide d'un rétractomètre de (précision 10^{-3} mm). La mesure de référence est à l'âge d'un jour.

Les pertes relatives de masse sont également calculées à partir du suivi de la masse des éprouvettes. Les pesées sont réalisées à la précision de 0.1g.

La photo 6 montre l'appareil utilisé pour mesurer le retrait de séchage.



Photo 6 : Appareil utilisé pour mesurer le retrait de séchage.

II.5.6 ABSORPTION

II.5.6.1. ABSORPTION TOTALE [6]

L'absorption totale du béton est mesurée à partir d'un essai d'immersion sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28 cm) préalablement séchées à l'issue de la cure (conservées 28 jours dans l'eau), en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de masse exprimée en pourcentage de la masse sèche.

II.5.6.2. ABSORPTION CAPILLAIRE [6]

L'essai d'absorption capillaire est réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 7x7x28 cm conservées dans l'eau pendant 28 jours, à l'issue de la cure les éprouvettes sont séchées à une température de 80°C dans l'étuve, puis enveloppées immédiatement dans un papier d'aluminium pour éviter les échanges d'humidité et d'assurer un écoulement unidimensionnel. Par la suite, les

éprouvettes sont immergées dans l'eau ou la profondeur de contact est d'environ de 0.5 cm (voir figure II.3).

Le coefficient de capillarité C_c est donné par la formule suivante :

$$C_c = \frac{100.M}{S.\sqrt{t}} \dots\dots\dots II.14$$

M : Masse de l'eau absorbée par les éprouvettes en béton.

S : Section de l'éprouvette

t : Temps de contact avec l'eau.

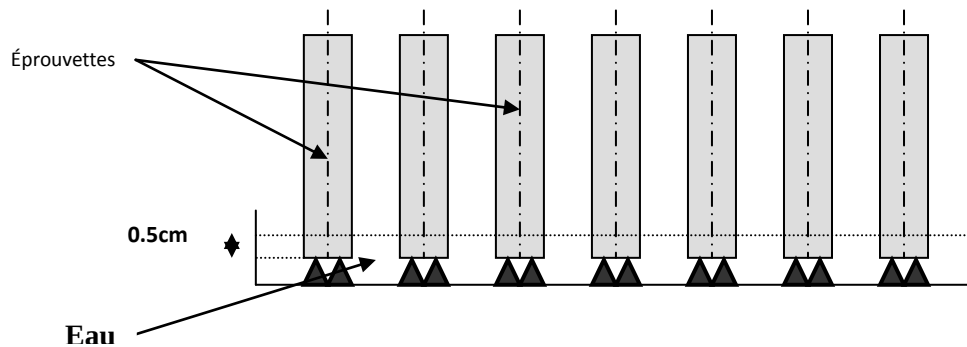


Figure II.3 : Essai d'absorption capillaire

II.5.7. RESISTANCE A LA PROPAGATION DES FISSURES

• DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'énergie de fissuration est déterminée conformément aux recommandations **RILEM** [24] par un essai de flexion trois points sur des éprouvettes entaillées âgées de 90 jours.

L'énergie de fissuration notée G_f est donnée par la formule suivante :

$$G_f = \frac{A + m.g.f_{\max}}{h_0.b} \quad (J / m^2) \dots\dots\dots II.15$$

A : Air sous la courbe effort-flèche en [joule].

$f_{\max}$: Flèche maximale exprimée en [m].

g : Accélération de la pesanteur en $[m/s^2]$.

m : Masse de l'éprouvette en [kg].

h_0 : Hauteur de ligament non entaillé de l'éprouvette en [m].

b : Largeur de l'éprouvette en [m].

La mesure de la courbe effort-flèche est déterminée sur des éprouvettes prismatiques entaillées de dimensions 10x10x50 cm, la profondeur de l'entaille est de 3 cm et la portée entre axes est de 40 cm (voir figure II.4).

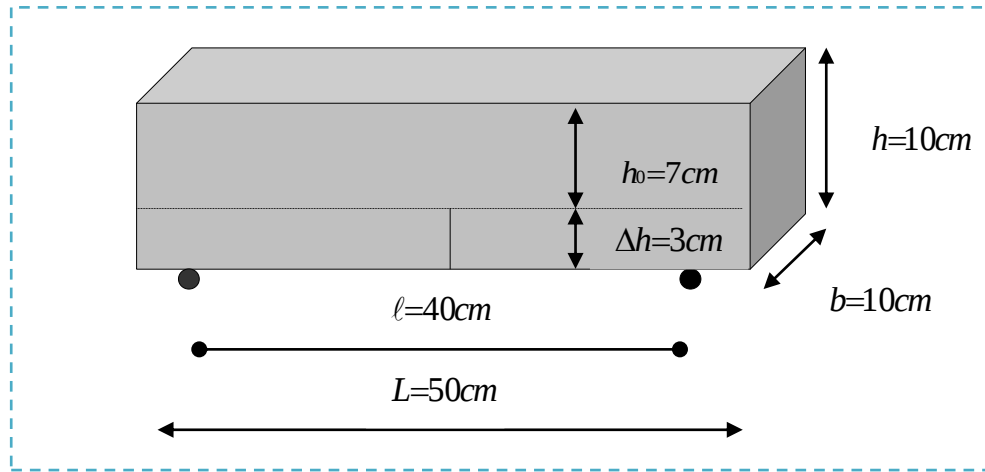


Figure II.4 : Dimensions de l'éprouvette.

Les essais sont réalisés sur une presse électrique de flexion par trois points de capacité 60 kN où la vitesse de chargement est égale à 2 mm/min. Un comparateur a été placé sur la surface non entaillée de l'éprouvette pour suivre l'évolution de la flèche (voir photo 8).



Photo 7 : Appareil utilisé pour la réalisation de l'entaille.

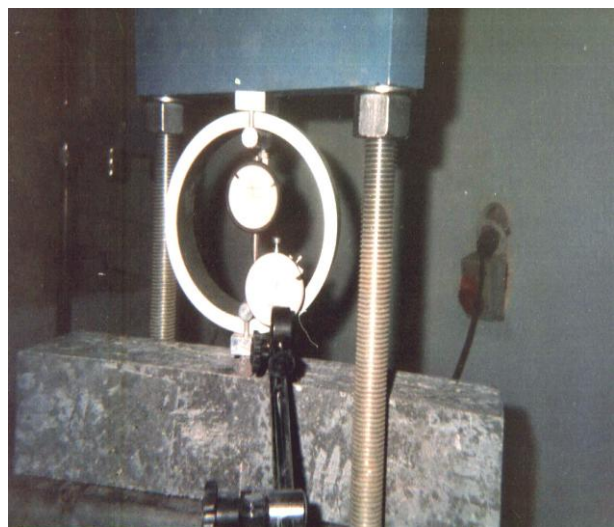


Photo 8 : Dispositif de mesure.

II.5.8. ESSAI REALISE POUR LA DETERMINATION DE LA DURABILITE DU BETON**. ATTAQUE DU BETON PAR L'ACIDE SULFURIQUE H_2SO_4**

La résistance du béton à l'acide sulfurique est mesurée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 7x7x28 cm. En conservant les éprouvettes dans une solution d'acide sulfurique dosée à 4% par litre d'eau.

II.6. SYNTHESE DU CHAPITRE :

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des différents protocoles expérimentaux utilisés pour la caractérisation des constituants de base (ciment, sables, graviers et adjuvants) et des bétons utilisés. Ces essais ont été effectués conformément aux normes en vigueur. L'essai permettant l'étude de la durabilité du béton confectionné, en milieu très agressif (vis-à-vis des attaques des acides), est présenté en fin de chapitre.

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX DE BASES

III.1 INTRODUCTION

Avant la fabrication du béton, il est nécessaire d'estimer le taux des fines calcaires dans les sables de concassage provenant des différentes carrières qui existent dans la région de Laghouat, par la suite on va contrôler la qualité des matériaux utilisés, pour cette raison un ensemble d'essais sur les granulats, ciment, fines calcaires, eau de gâchage et adjuvant sont pratiqués en laboratoire dont le but est d'identifier les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques des matériaux employés. Dans ce chapitre nous présentons les résultats des différents essais effectués sur les matériaux utilisés dans la fabrication du béton.

III.2. CARACTERISATION DES SABLES CALCAIRES DE LA REGION DE LAGHOUAT AVANT ELIMINATION DES FINES CALCAIRES

III.2.1 ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SABLES CALCAIRES DE LA REGION DE LAGHOUAT AVANT ELIMINATION DES FINES CALCAIRES :

Dans ce qui suit nous présentons les courbes granulométriques des trois sables calcaires provenant des carrières suivantes :

1. Carrières de l'oued M'zi
2. Carrière de l'oued Morra
3. Carrière de Sidi Makhlouf

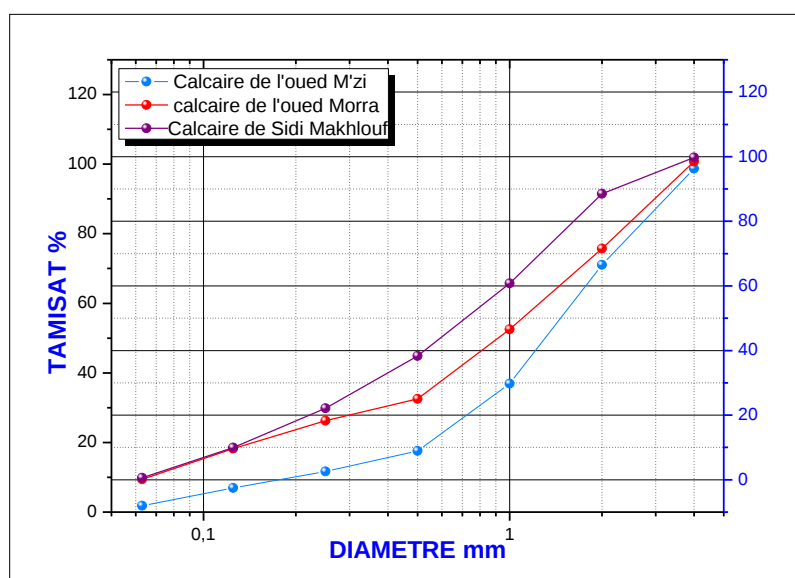


Figure III. 1 : Analyse granulométriques des sables calcaires

II.2 .2. DIFFERENTES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SABLES CALCAIRES :

Tableau III.1 : Caractéristiques physiques des sables calcaires

CARACTERISTIQUES DES SABLES	SABLES CALCAIRES		
	OUED M'ZI	SIDI MAKHLOUF	OUED MORRA
Pourcentage des fines %	9.82	8.75	10.61
Masse volumique apparente g/cm ³	1.47	1.55	1.55
Masse volumique absolue g/cm ³	2.63	2.72	2.68
Compacité C% : $C = \frac{\gamma_{app}}{\gamma_{abs}} . 100$	56.05	56.99	57.84
Porosité P% : $P = 1 - C$	43.95	42.59	42.16
Coefficient d'uniformité $Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	12	8	10.8

D'après les résultats obtenus par essais, on a constaté que les trois sables calcaires ont des caractéristiques physiques (taux des fines, masses volumique, compacité, porosité et le coefficient d'uniformité) semblables. Les valeurs des coefficients d'uniformité indiquent que les sables calcaires à l'état brut ont une granulométrie uniforme voir tableau III.1.

Les courbes granulométriques des sables avec fines (voir figure III.1) sont considérées continues respectent les caractéristiques spécifiées par la norme européenne EN 12620:2002 voir tableau III.2.

- POURCENTAGE DES FINES DANS LE SABLE:**

$$f = \frac{(M - M') + P}{M} . 100 \dots \dots \dots III.1$$

M : masse de la prise d'essai en g.

M' : masse du refus à 0.063 mm en g.

P : masse du tamisât restant dans le fond en g.

- POURCENTAGE DES FINES DANS LE SABLE OUED M'ZI:**

$$f = \frac{(1583.5 - 1430.5) + 2.5}{1583.5} . 100 = 9.82\% \approx 10\%$$

- **POURCENTAGE DES FINES DANS LE SABLE OUED MORRA:**

$$f = \frac{(1496.2 - 1346.8) + 9.4}{1496.2} \cdot 100 = 10.61\%$$

- **POURCENTAGE DES FINES DANS LE SABLE SIDI MAKHLOUF:**

$$f = \frac{(1496.1 - 1392.1) + 26.9}{1496.1} \cdot 100 = 8.75\%$$

Le taux de fines dans les sables calcaires est de l'ordre de 10%. Cette quantité indique que les sables sont riches en éléments fins.

- **MODULE DE FINESSE MF**

Plus que le module de finesse est faible plus le sable est riche en éléments fines. Les sables avant le tamisage présentent des modules de finesse MF variant entre 2.8 et 3.3.

$$FM = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0.125 - 0.25 - 0.5 - 1 - 2 - 4\} \dots \dots \dots III.2$$

Lorsque MF est comprise entre:

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

- **CARACTERISTIQUES SPECIFIEES PAR LA NORME EUROPEENNES EN 12620:2002**

Tableau III.2 : Caractéristiques spécifiées par la norme européennes EN 12620:2002

	VALEURS OBTENUES PAR ESSAI			NORME EUROPEENNE EN 12620:2002
	CARRIERES DE L'OUED M'ZI	CARRIERE DE L'OUED MORRA	CARRIERE DE SIDI MAKHLOUF	
Passant à 2D	100%	100%	100%	100%
Passant à 1.4D	100%	100%	100%	95% à 100%
Passant à D	98.5%	99.8%	98.7%	85% à 99%
Module de finesse Mf	3.3	2.80	3.57	-
Catégorie G	G _F 85	G _F 85	G _F 85	

III.3. MATERIAUX UTILISES POUR LA CONFECTION DU BETON ETUDIE :

III.3.1. GRANULATS

Les granulats retenus pour notre étude expérimentale sont des granulats calcaires concassés provenant de la région de Laghouat: Carrière de L'oued Mzi..

- **DIFFERENTES CLASSES DE GRANULATS EMPLOYES:**

1. Sable calcaire concassé : 0/4.
2. Gravier calcaire concassé : 4/8.
3. Gravier calcaire concassé : 8/15.
4. Gravier calcaire concassé : 15/20.

III.3.2. CIMENT

Le ciment utilisé est un CPJ CEM II A 42.5 qui provient de la cimenterie Algérien ciment company (ACC) wilaya de M'SILA.

III.3.3. ADJUVANT

L'adjuvant employé dans la composition du béton est un super-plastifiant MEDAPLAST SP fabriqué par l'entreprise Algérienne GRANITEX.

III.3.4. EAU DE GACHAGE

L'eau de gâchage utilisée dans la confection du béton est l'eau potable de robinet.

III.3.5. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SABLES CALCAIRES DE L'OUED M'ZI SANS FINES CALCAIRES (0%) :

Les résultats d'essai sont regroupés dans le tableau.6 de l'annexe 02 et la figure III.2.

La courbe granulométrique du sable (après tamisage) est considérée discontinue pauvre en éléments fins. Cette courbe granulométrique respecte les caractéristiques spécifiées par la norme européenne **EN 12620:2002** voir tableau III.3.

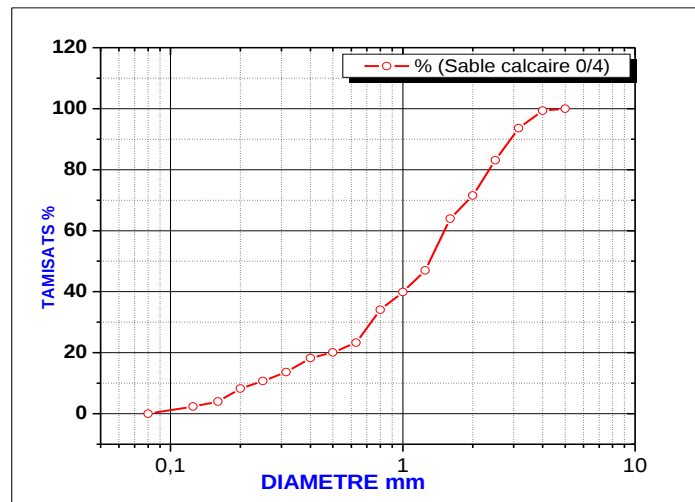


Figure III.2 : Analyse granulométrique du sable sans fines calcaires.

❖ CARACTERISTIQUES SPECIFIEES PAR LA NORME EUROPEENNES EN 12620:2002:

Tableau III.3 : Caractéristiques spécifiées par la norme européennes EN 12620:2002

	VALEURS OBTENUS PAR ESSAI CARRIERES DE L'OUED M'ZI	NORME EUROPEENNE EN 12620:2002
Passant à 2D	100%	100%
Passant à 1.4D	100%	95% à 100%
Passant à D	99.4%	85% à 99%
Module de finesse Mf	3.56	
Catégorie G	G_r85	

• COEFFICIENT D'UNIFORMITE C_u :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{1.7}{0.25} = 6.8 > 2 \Rightarrow \text{Granulométrie uniforme}$$

• MODULE DE FINESSE M_f :

Le sable est caractérisé par un module de finesse $M_f=3.56$. Ce sable est pauvre en éléments fins.

III.3.6. PROPRIETES PHYSIQUES DU SABLE SANS FINES CALCAIRES

Les Propriétés physiques du sable sans fines calcaires sont résumées dans le tableau III.4.

Tableau III.4 : Caractéristiques physiques des sables calcaires sans fines.

Masse volumique apparente g/cm ³	Masse volumique absolue g/cm ³	Compacité du sable	Porosité du sable %	Coefficient d'absorption %	VB	Equivalent de sable	
						ESV	ES
1.413	2.61	54.14	45.86	2.5	0.25	80.95	74.29

VB=0.25 : Apparition de la sensibilité du sable à l'eau.

- Le sable calcaire est caractérisé par une masse volumique absolue semblable à celle d'un sable naturel.
- Le sable calcaire est caractérisé par une porosité importante.
- Le sable calcaire a une absorption remarquable comparativement au sable naturel des rivières. Cette absorption est due à la présence des éléments fins dans le sable.
- Les valeurs de l'équivalent du sable montrent que le sable calcaire sans fines est très propre.

III.3.7. EFFET DES FINES CALCAIRES SUR LES PROPRIETES PHYSIQUE DU SABLE

Le tableau III.5 et les figures III.3 et III.4 montrent l'effet des fines calcaires sur les propriétés physiques du sable.

Tableau III. 5 : Effet des fines calcaires sur les propriétés physiques du sable.

Pourcentages des fines calcaires dans le sable %	Masse volumique apparente g/cm ³	Masse volumique absolue g/cm ³	Equivalent de sable		Compacité C %	Porosité P %
			Visuel ESV	Piston EV		
0	1.413	2.61	80.95	74.29	54.14	45.86
5	1.47	2.61	72.32	68.75	56.32	43.68
10	1.474	2.63	69.96	66.37	56.05	43.95
15	1.45	2.6	54.69	50.78	55.77	44.23
20	1.36	2.6	46.10	43.66	52.31	47.69
25	1.34	2.6	45.39	43.32	51.15	48.46

La figure III.3 représente l'évolution de la compacité du sable en fonction des fines. En observant cette courbe, on constate que la compacité du sable optimale est obtenue pour

un taux de fines de l'ordre de 5 à 10%. A partir de 15% la compacité diminuée avec l'augmentation des fines calcaires dans le sable.

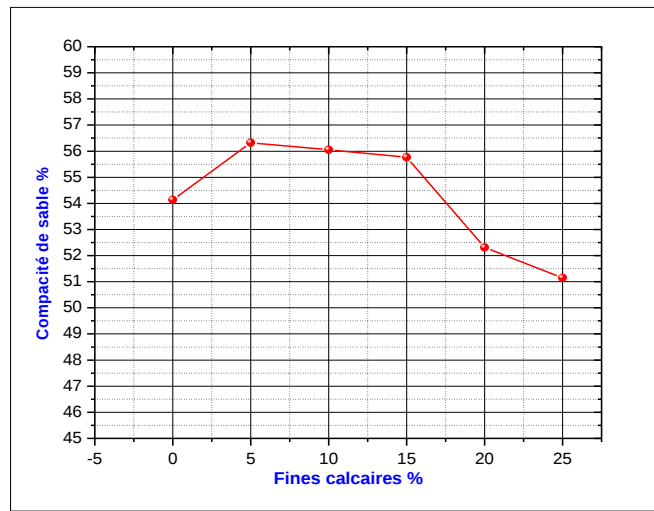


Figure III.3 : Compacité du sable avec des pourcentages variés en fines (0% à 25 %).

La figure III.4 représente la variation de l'équivalent du sable visuel et à piston en fonction des fines calcaires. Selon ces courbes, nous avons constaté que la propreté du sable est diminuée avec l'augmentation des fines dans le sable. En plus, les valeurs de l'équivalent du sable **ESV** et **ES** restent supérieures à la valeur limite donnée par la norme **NF P 18-598** jusqu'à un pourcentage des fines de **10%**.

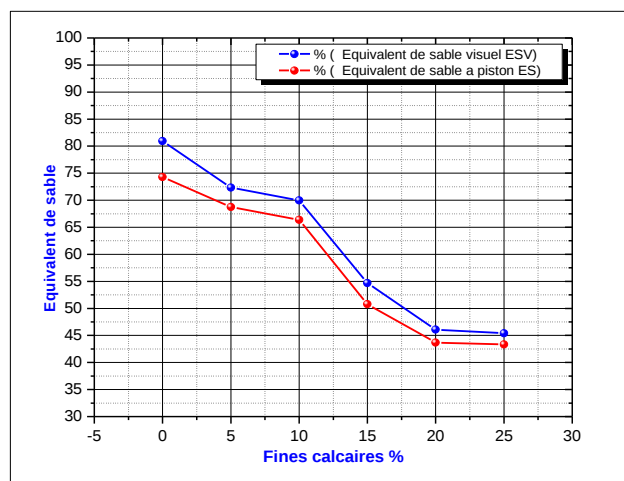


Figure III.4 : Equivalent du sable avec des pourcentages variés en fines (0% à 25 %)

III.3.8. FINES CALCAIRES

III.3.8. 1.ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTATIO

Le tableau.9 de l'annexe 02 et la figure III.5 résument les résultats d'essai.

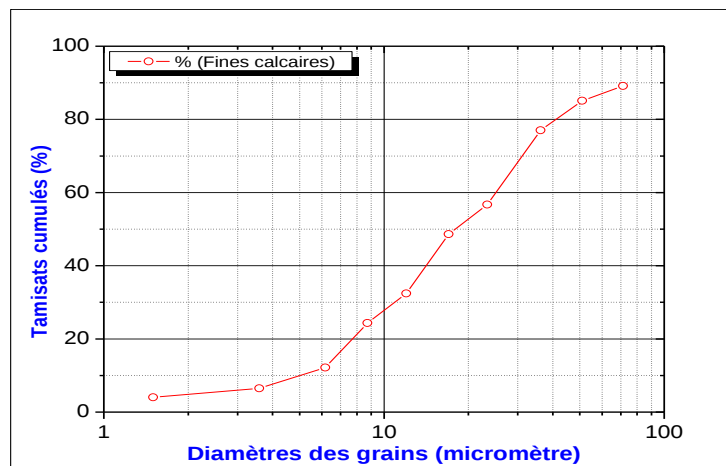


Figure III.5. : Analyse granulométrique par sédimentation

III.3.8.2. PROPRIETES PHYSIQUES DES FINES CALCAIRES

Les propriétés physiques des fines calcaires sont résumées dans le tableau III.6

Tableau III.6 : Propriétés physiques des fines calcaires

Masse volumique apparente des fines g/cm^3	1.1125
Masse volumique absolue des fines g/cm^3	2.6
Surface spécifique des fines calcaires cm^2/g	3100

III.3.9 GRAVIER

III.3.9.1 ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Les résultats d'essai sont illustrés dans le tableau.10 de l'annexe et la figure III.6.

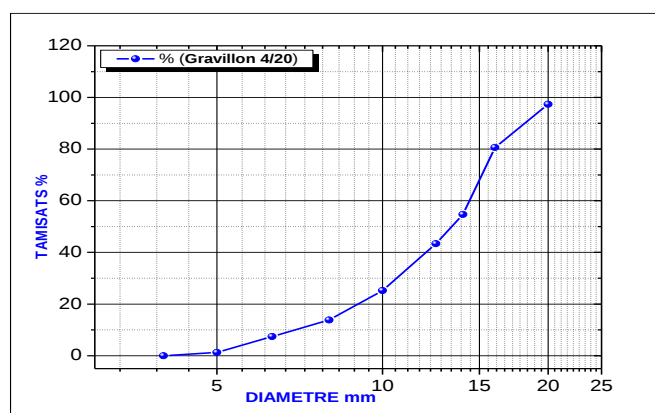


Figure III.6 : Analyse granulométrique du gravier 4/20.

❖ CARACTERISTIQUES SPECIFIEES PAR LA NORME EUROPEENNES EN 12620:2002

Tableau III.7 : Caractéristiques spécifiées par la norme européennes EN 12620:2002

	NORME EUROPEENNE EN 12620:2002	VALEURS OBTENUS PAR ESSAI
Passant à 2D	100%	100%
Passant à 1.4D	98% à 100%	100%
Passant à D	90% à 99%	97.4%
Passant à d	0 % à 15%	0%
Passant à d/2	0 % à 5%	0%
Passant à D/2	25% à 70%	25.2%
Catégorie G	G _c 90/15	

Selon la figure III.6, la courbe granulométrie du gravier est considérée continue et respecte la norme européenne **EN 12620:2002** (voir tableau III.7).

III.3.9.2. ABSORPTION

Le tableau suivant résume les valeurs de la teneur en eau et l'absorption du gravier.

Tableau III.8 : Teneur en eau et absorption du gravier.

Teneur en eau W (%)	Absorption (%)
0.12	1.3

III.3.9.3. MASSES VOLUMIQUES DES GRAVIERS

Les masses volumiques apparentes et absolues des différentes classes des graviers sont résumées dans le tableau suivant : Le tableau III.9 montre que la masse volumique absolue de gravier augmente avec l'augmentation des dimensions des granulats.

Tableau III.9 : Masses volumiques des graviers.

Classe de gravier	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Masse volumique absolue (g/cm ³)
Gravier 4/8	1.38	2.65
Gravier 8/15	1.362	2.68
Gravier 15/20	1.35	2.72

III.3.9.4. COMPACTITES ET POROSITES DES GRAVIERS

Le tableau III.10 regroupe les valeurs des compacités, porosités et la dureté des graviers obtenus par essais.

Tableau III.10 Compacités et porosités du gravier.

Classe de gravier	L _A	Compacité C %	Porosité P %
Gravier 4/8	24	52.07	47.92
Gravier 8/15		50.82	49.18
Gravier 15/20		49.63	50.37

III.3.10. CIMENT

III.3.10.1. PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES DU CIMENT

Les propriétés physico-mécaniques du ciment sont regroupées dans le tableau III.11.

Tableau III.11: Propriétés physico-mécaniques de ciment.

Masse volumique apparente g/cm ³	1.65
Masse volumique absolue g/cm ³	3.00
Surface spécifique cm ² /g	4010.07
Consistance normale %	25.20
Début de prise	2h:41
Fin de prise	3h:37
Résistance à la compression: classe vrai MPA	2 jours :23.28
Stabilité à chaud (mm)	0.6

III.3.10.2. COMPOSITION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DU CIMENT

L'analyse chimique est réalisée par laboratoire central à BOUMERDES les résultats d'essai sont résumés dans le tableau III.12 et le tableau III.13.

Tableau III.12: Propriétés chimiques de ciment CPJ CEM II A 42.5 (ACC) [33].

Composition chimique de ciment		Composition minéralogique	
SiO ₂	19.7	LSF	96.49
Al ₂ O ₃	4.52	SM	2.46

Fe₂O₃	3.49	AM	1.29
CaO	62.15	C₃S	61.40
MgO	1.79	C₂S	10.50
SO₃	2.27	C₃A	6.07
K₂O	0.49	C₄AF	10.62
Na₂O	0.25		
Cl	0.02		
LOI	5.83		
CaO_{libre}	1.00		
LR	1.56		

III.3.10.3. COMPOSITION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DU CLINKER

La composition minéralogique du ciment et du clinker est déterminée suivant la formule de BOGUE. Le ciment et le clinker sont composés principalement de la chaux CaO et de la silice SiO₂ tableau III.13

Tableau III.13: Composition chimique et minéralogique du clinker [33].

Composition chimique du clinker		Composition minéralogique du clinker	
SiO₂	21.94	LSF	94.59
Al₂O₃	4.82	SM	2.50
Fe₂O₃	3.94	AM	1.23
CaO	65.90	C₃S	60.31
MgO	1.65	C₂S	17.41
SO₃	0.48	C₃A	6.13
K₂O	0.60	C₄AF	11.97
Na₂O	0.10	HM	2.15
Cl	0.02		

III.3.11. SUPERPLASTIFIANT

L'adjuvant employé dans la composition du béton est un super-plastifiant **MEDAPLAST SP** fabriqué par l'entreprise Algérienne **GRANITEX**. Les caractéristiques de super-plastifiant sont résumées dans le tableau III.14.

Tableau III.14 : Caractéristiques de super-plastifiant.

Type de l'adjuvant : Super-plastifiant MEDAPLAST SP					
Densité p	Teneur en solide S (%)	PH	Forme	Couleur	Teneur en chlore g/l
1.2	37.8	7-8	liquide	Marron	<1

III.3.12. EAU DE GACHAGE

La composition chimique de l'eau est résumée dans le tableau III.15

Tableau III.15 : Composition chimique de l'eau.

Nature de point d'eau	Robinet « Date de prélèvement 20-6-2004 »				
Ca en mg/l	119.04	Balance des cations m.ég/l 15.10		5.94	
Mg en mg/l	32.93			2.71	
Na en mg/l	144.90			6.30	
K en mg/l	5.69			0.14	
Cl en mg/l	169.96	Balance des anions m.ég/l 16.24		4.79	
SO4 en mg/l	420			8.75	
CO3 en mg/l	-			-	
HCO3 en mg/l	153.80			2.52	
NO3 en mg/l	11.07			0.18	
Conductivité en 1/10 ms/cm à 25 °C 16.30	PH=7.77	Dureté totale 43.25	Minimalisation 1010.6	Résidu sec à 105°C 1172mg/l	Test chlore en mg/l 0.3 mg/l
T.H 66°F	T.A.C 12.60	S.A.F 67.70	I.S 45.05	SiO2 4.45 mg/l	M.O milieu acide en O2 8.53
Cations	Ca=39.34%		Na+K=43.01%		Mg=18%
Anions	SO4=53.8%		Cl+NO3=30.6%		HCO3=15.5%

L'analyse chimique de l'eau est réalisée au niveau du laboratoire **E.P.D.E.M.I.A.** Elle indique que l'eau a une potabilité passable et que le pourcentage des sulfates est élevé.

III.4. SYNTHÈSE DU CHAPITRE

Après avoir abordé l'étude bibliographique et l'exposé des différentes techniques expérimentales suivies dans l'étude expérimentale, on a commencé à caractériser les matériaux de base utilisés dans l'élaboration des bétons.

La caractérisation des matériaux nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Analyse granulométrique :

1. Analyse granulométrique du sable : elle a été effectuée sur trois sables de carrières existant dans la région de Laghouat :

- ◆ Carrières de l'oued M'zi
- ◆ Carrière de l'oued Morra
- ◆ Carrière de Sidi Makhlouf

Les courbes granulométriques des sables sont considérées continues respectant les caractéristiques spécifiées par la norme européenne **EN 12620:2002** . Le taux des fines dans les trois sables étudiés est de l'ordre de **10%**. En outre, on a constaté que les trois sables calcaires ont des caractéristiques physiques masses volumique, compacité, porosité et coefficient d'uniformité semblables.

2. Analyse granulométrique du gravier : la courbe granulométrie du gravier est considérée continue et respecte la norme européenne **EN 12620:2002**.

- Selon les résultats obtenus lors de caractérisation des granulats qui provenant des carrières de la région de Laghouat, Nous avons constaté que les propriétés du sable respectent les normes et dans ce cas le sable et le gravier calcaire peuvent être utilisés pour fabriquer le béton

Chapitre IV : Formulation du béton élaboré

VI.1 INTRODUCTION

La formulation du béton adjuvanté s'appuie sur des résultats expérimentaux tels que les masses volumiques absolues des matériaux utilisés, courbes granulométriques, squelette granulaire optimisé, et la dose de saturation déterminée à partir de la méthode des coulis.

VI.2. PRESENTATION DE LA METHODE DE FORMULATION

La méthode de formulation du béton comporte six étapes essentielles qui sont résumées dans l'organigramme présenté dans la figure IV.1.

ETAPE 1 : PREPARATION DU MATERIAU :

- **Tamissage du sable** : Il s'agit de tamiser une quantité de 800 kg de sable calcaire séché préalablement à l'étuve à travers un tamis de diamètre 0.08mm dont le but est de ramener le taux des fines dans le sable à 0%.
- **Lavage du sable** : Le lavage du sable est effectué dans une série de tamis de diamètres 2, 1, 0.08 mm à l'aide d'un jet d'eau pour éliminer toutes les particules argileuses et fines calcaires qui peuvent être adhérentes sur la surface des grains de sable. Par la suite le sable est séché à une température de 105°C.

ETAPE 2 : PROPORTION DE DIFFERENTS CONSTITUANTS DU BETON :

- **Dosage en ciment C** : Le dosage en ciment est fixé à **470 kg/m³**.
- **Dosage en granulats** : Le squelette granulaire est déterminé à partir de la méthode **Dreux Gorisse [9]**. La figure IV. 2 représente la composition granulaire à partir d'un sable et un gravillon.
- **Dosage en superplastifiant SP** : Un large dosage de superplastifiant est utilisé avant d'étudier le système ciment-fines-superplastifiant. Soit **SP=1.5%** d'extrait sec par rapport au poids du ciment.

- **Teneur en eau :** La teneur en eau de gâchage est réglée expérimentalement jusqu'à l'obtention de la consistance recherchée.

ETAPE 3 : OPTIMISATION DU SQUELETTE GRANULAIRE :

Le squelette granulaire est optimisé par la méthode expérimentale **Baron Lesage** qui est effectuée sur un béton ordinaire (on a pratiqué la méthode de composition du béton **Dreux Gorisse**).

ETAPE 4 : COMPOSITION DE REFERENCE :

C'est la composition du béton avant l'étude du système ciment-fines-superplastifiant.

ETAPE 5 : GACHEE D'ESSAI :

Il s'agit de vérifier la consistance du béton "affaissement au cône **d'Abrams**".

ETAPE 6 : ETUDE DU SYSTEME CIMENT-SUPERPLASTIFIANT :

L'objectif de cette étude expérimentale est de déterminer la dose de saturation en utilisant la méthode des coulis.

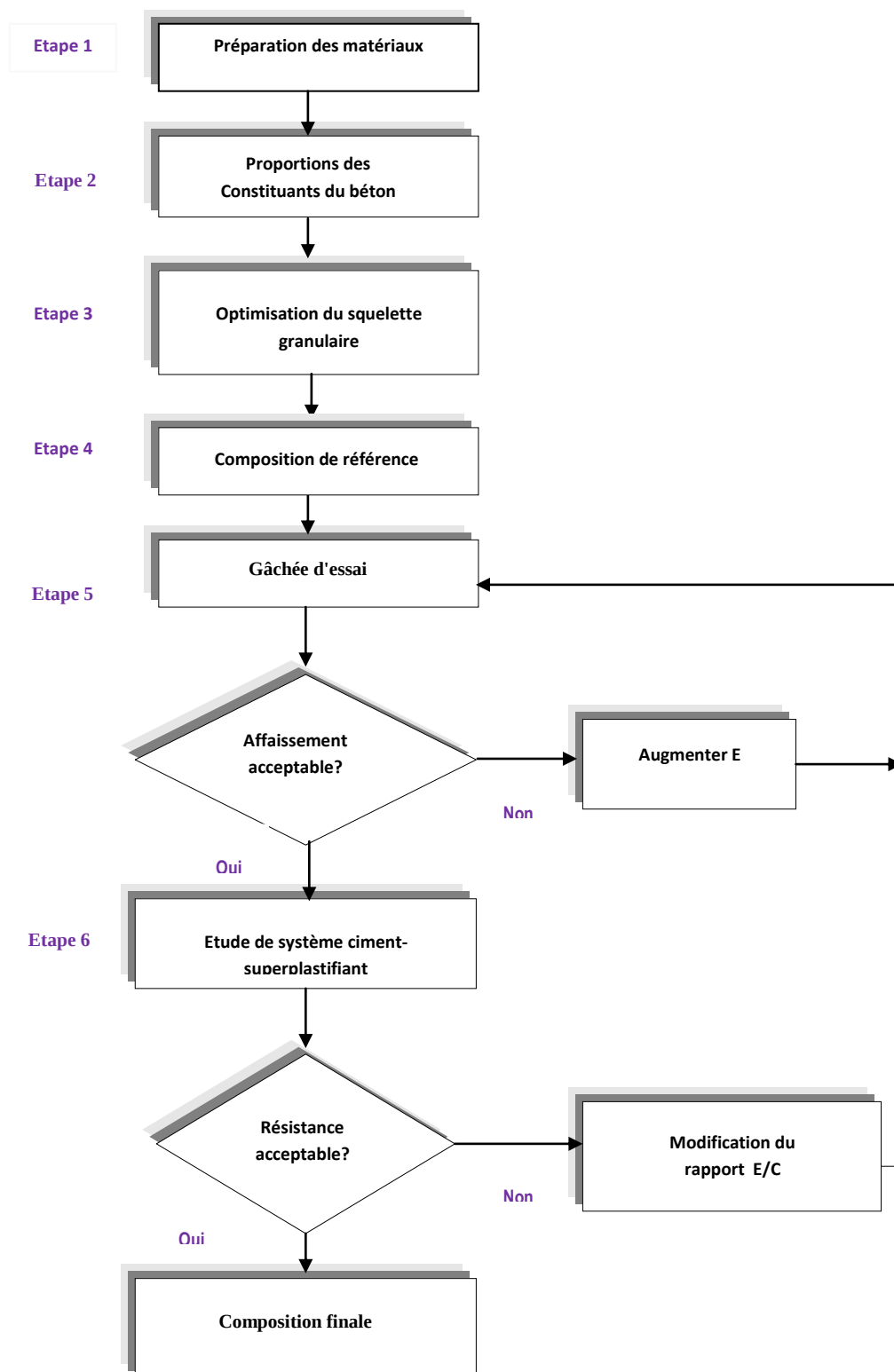


Figure VI.1 : Méthode de formulation du béton

IV.3. RESULTATS

IV.3.1. COMPOSITION GRANULAIRE

◆ Tracé de la courbe granululaire de référence OAB :

Soit :

B : est le point d'ordonnée 100%

A : est l'ordonnée de l'abscisse $D/2$ et en abscisse $Y = 50 - \sqrt{D} + K$

où :

D : est le diamètre maximal du granulat = 20mm.

K : est un terme correctif qui est égal à 3 pour le granulat concassé.

$$Y = 50 - \sqrt{20} + 3 = 42.53\%$$

La courbe granululaire est bien définie, il reste à définir les proportions de sable et de gravier dans le graphe.

S : est le point sur la courbe granulométrique du sable correspondant à un tamisat de 95% et g le point sur la courbe granulométrique du gravier correspondant à un tamisat de 05%. La droite qui joint les deux points s et g coupe la courbe de référence OAB, l'ordonnée de ce point correspond aux pourcentages de sable et de gravier.

$$S=41\% \text{ et } G=59\%$$

La figure IV.2 représente la composition granululaire déterminée à partir de la méthode **Dreux Gorisse [9]**.

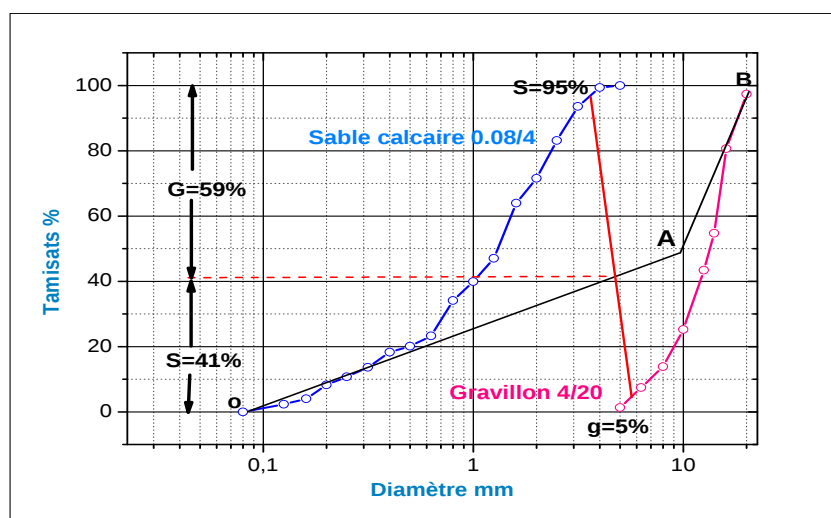


Figure IV. 2: Composition granululaire à partir d'un sable et un gravillon.

IV. 3.2 OPTIMISATION DU SQUELETTE GRANULAIRE:

Le squelette granulaire est optimisé par la méthode expérimentale **Baron Lesage** qui est effectuée sur un béton ordinaire "**Méthode Dreux Gorisse**" [11].

IV.3.2.1 COMPOSITION DU BETON ORDINAIRE "BETON NON ADJUVANTE" SELON LA METHODE DREUX GORISSE

On désire réaliser un béton dont la résistance à la compression à 28 jours $f_{c28}=37\text{MPa}$ et son affaissement au cône d'Abrams égale à **9 cm**.

Le ciment utilisé est un **CPJ CEM II 42.5** et des granulats calcaires concassés. Leur diamètre maximal $D_{\max}=20$ mm.

● Détermination du rapport C/E

$$f_{c28} = G \cdot \sigma_{c28} \cdot \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

f_{c28} : La résistance à compression à 28 jours.

G : Le coefficient granulaire.

σ_{c28} : La classe vraie du ciment.

Soit :

G=0.5 et $\sigma_{c28}=52.5\text{MPa}$ [10]

$$\frac{C}{E} = \frac{f_{c28}}{G \cdot \sigma_{c28}} + 0.5 = \frac{37}{0.5 \cdot 52.5} + 0.5 = 1.9$$

● **Dosage en eau** : $E=210.53 \text{ l/m}^3$.

● **Dosage en ciment** : $C=400 \text{ Kg/m}^3$

● **Dosage en granulats**

Soit:

V_T : est le volume total des matériaux secs "ciment+sable+gravier"

où:

$$V_T = \gamma \cdot 1000$$

γ : Coefficient de compacité du matériau sec.

Pour $D_{\max}=20\text{mm} \Rightarrow \gamma=0.82-0.03=0.795$ cas des granulats de concassage

Le volume des granulats (sable + gravier) noté V_{S+G} devient:

$$V_{S+G}=V_T - V_C$$

V_C : est le volume de ciment utilisé.

$$V_C = \frac{C}{\rho_C} = 133.33\text{l}$$

$$V_{S+G}=795-133.33=662\text{ l}$$

● Volumes absolus des granulats:

Sable calcaire "0.08/4" : $V_S = 41\%.662=271.4\text{ l/m}^3$

Gravier calcaire "4/8" : $V_{G4/8}=15\%.59\%.662=58.6\text{ l/m}^3$

Gravier calcaire "8/15" : $V_{G8/15}=45\%.59\%.662=175.8\text{ l/m}^3$

Gravier calcaire "15/20" : $V_{G15/20}=40\%.59\%.662=156.2\text{ l/m}^3$

● Quantités des granulats exprimées en masse par un mètre cube de béton

Sable calcaire "0.08/4" : $M_S = 41\%.2.61.662=708.4\text{ Kg/m}^3$

Gravier calcaire "4/8" : $M_{G4/8}=15\%.59\%.2.65.662=155.3\text{ Kg/m}^3$

Gravier calcaire "8/15" : $M_{G8/15}=45\%.59\%.2.68.662=471\text{ Kg/m}^3$

Gravier calcaire "15/20" : $M_{G15/20}=40\%.59\%.2.72.662=425\text{ Kg/m}^3$

● Détermination de dosage en eau réel

Soit:

Dosage réel en eau	=	Eau de gâchage	+	Eau absorbée par les granulats
-------------------------------	---	---------------------------	---	---

$$E_h = E_{TOT} - E_{abs} \qquad M_{SSS} = \frac{M}{(1 + E_h)} \qquad [8]$$

$$M_E = M_{SSS} - M$$

M_{SSS} : masse des granulats à l'état SSS (saturés superficiellement secs) exprimée en Kg/m^3 .

M : masse des granulats à l'état naturel exprimée en Kg/m^3 .

E_{TOT} : teneur en eau total dans les granulats exprimée en %.

E_h : humidité des granulats exprimée en %.

E_{abs} : quantité d'eau absorbée par les granulats exprimée en %.

● **Exemple:** Correction de l'humidité pour un rapport G/S=1.00.

Masse de sable : $M_S=879.83 \text{ kg/m}^3$

Masse de gravier : $M_G=879.83 \text{ kg/m}^3$

● **Masse d'eau absorbée par le gravier**

$$M_{SSG} = \frac{879.83}{\left(1 + \left(\frac{-1.16}{100}\right)\right)} = 890.16 \text{ kg/m}^3 \approx 890.2 \text{ kg/m}^3$$

Donc la masse d'eau absorbée par le gravier est égale à:

$$M_{EG} = 890.16 - 879.83 = 10.33 \text{ l/m}^3$$

● **Masse d'eau absorbée par le sable**

$$M_{SSS} = \frac{879.83}{\left(1 + \left(\frac{-2.5}{100}\right)\right)} = 902.39 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{ES} = 902.39 - 879.83 = 22.56 \text{ l/m}^3$$

Le volume d'eau réel devient :

$$E_{\text{réel}} = 210.53 + 10.33 + 22.56 = 243.42 \text{ l/m}^3$$

Le rapport **Gravillon/Sable** a été modulé de 1 à 2 dont les compositions des bétons sont les suivantes:

Tableau IV.1 : Composition du béton ordinaire.

CONSTITUANTS	RAPPORT G/S			
	1.00	1.25	1.48	2.00
Ciment kg/m^3	400	400	400	400
Sable kg/m^3	879.8	782.1	708.4	586.6
Gravillon kg/m^3	879.8	977.6	1051.3	1173.1
Eau l/m^3	210.5	210.5	210.5	210.5
Eau réel l/m^3	243.4	242.1	241.00	239.3
RESULTATS				
Rapport G/S	1.00	1.25	1.48	2.00
Affaissement en "mm"	20.00	80.00	120.00	90.00

La figure montre que le rapport optimum pour lequel l'affaissement est maximal se situe à 1.48.

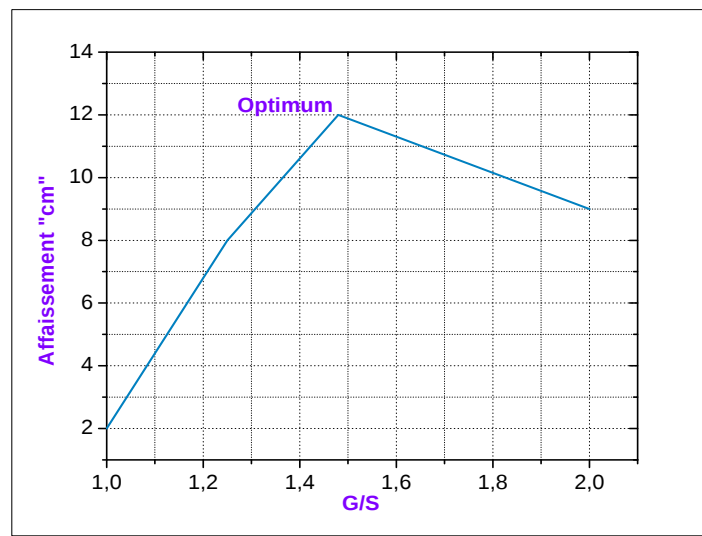


Figure IV. 3 : Optimisation du squelette granulaire

IV.3.3 COMPOSITION DE REFERENCE

On désire fabriquer un béton dont la résistance en compression à 28 jours atteint **60 MPA** et une consistance dont son affaissement est supérieur à 150 mm .En utilisant les proportions des constituants suivants:

- ◆ **Ciment** : $C=470\text{kg/m}^3$. $E/C=0.36$ premier choix, $E=170\text{l/m}^3$.
- ◆ **Super-plastifiant** : $SP=1.5\%$ d'extrait sec par rapport au poids de ciment.

Les caractéristiques de super-plastifiant sont résumées dans le tableau VI.2.

Tableau IV. 2 : Caractéristiques de super-plastifiant MEDAPLAST SP (Dosage =1.5% C)

Super-plastifiant		$M_{sol} = C \cdot \frac{SP}{100} \left(\text{kg} / \text{m}^3 \right)$	$V_{liq} = \frac{M_{sol}}{S \cdot d_{sup}} \left(\text{l} / \text{m}^3 \right)$	$V_E = V_{liq} \cdot d_{sup} \cdot \left(\frac{100-S}{100} \right) \left(\text{l} / \text{m}^3 \right)$	$V_{sol} = V_{liq} - V_E$
Densité p	Teneur en solides S"%"				
1.2	37.8	7.1	15.5	12	4

M_{Sol} : masse de la matière solide dans le super-plastifiant
 V_{liq} : volume de super-plastifiant liquide
 V_E : volume d'eau dans le super-plastifiant
 V_{Sol} : volume de la matière solide dans le super-plastifiant

IV.3.3.1 VOLUME ABSOLU DE CIMENT:

$$V_c = \frac{C}{\rho_c} = \frac{470}{3}$$

$$V_c = 156.66 \approx 157l$$

IV.3.3.2 VOLUMES ABSOLUS DES GRANULATS:

$$V_{S+G}=795-157=638 l$$

$$\text{Sable calcaire "0.08/4" : } V_S = 41\%.638=261.6 l/ m^3$$

$$\text{Gravier calcaire "4/8" : } V_{G4/8}=15\% .59\%.638=56.5 l/ m^3$$

$$\text{Gravier calcaire "8/15" : } V_{G8/15}=45\%.59\%.638=169.4 l/ m^3$$

$$\text{Gravier calcaire "15/20" : } V_{G15/20}=40\%.59\%.638=150.6 l/ m^3$$

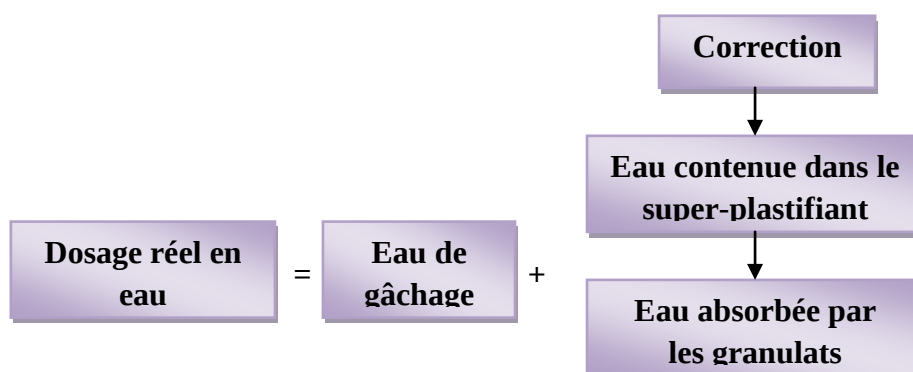
IV.3.3.3 QUANTITES DES GRANULATS EXPRIMEES EN MASSE PAR UN METRE CUBE DE BETON

$$\text{Sable calcaire "0.08/4" : } M_S = 41\%.2.61.638=683 Kg/m^3$$

$$\text{Gravier calcaire "4/8" : } M_{G4/8}=15\%.59\%.2.65.638=149.6 Kg/m^3$$

$$\text{Gravier calcaire "8/15" : } M_{G8/15}=45\%.59\%.2.68.638=454 Kg/m^3$$

$$\text{Gravier calcaire "15/20" : } M_{G15/20}=40\%.59\%.2.72.638=409.5 Kg/m^3$$

IV.3.3.4 DETERMINATION DE DOSAGE EN EAU REEL

• Eau contenue dans le super-plastifiant:

Le volume d'eau contenue dans le super-plastifiant $V_E=12 l$ (voir tableau IV.2)

● Ajustement d'humidité dans les granulats

Le but de cette correction est le calcul de la composition d'un mètre cube de béton dans les conditions SSS "granulats saturés superficiellement secs".

1. Masse d'eau absorbée par le gravier

$$M_{SSS_g} = \frac{1013.13}{\left(1 + \left(\frac{-1.16}{100}\right)\right)} = 1025.43 \text{ kg/m}^3$$

Donc la masse d'eau absorbée par le gravier égale à:

$$M_{EG} = 1025.43 - 1013.13 = 12.3 \text{ l/m}^3$$

2. Masse d'eau absorbée par le sable

$$M_{SSS_s} = \frac{683}{\left(1 + \left(\frac{-2.5}{100}\right)\right)} = 700.5 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{ES} = 700.5 - 683 = 17.5 \text{ l/m}^3$$

Le volume d'eau réel devient:

$$V_{E_{reel}} = 170 - 12 + 12 + 18 = 188 \text{ l/m}^3$$

Le tableau IV.3 regroupe les résultats de calcul de la composition de référence

Tableau IV.3 : Composition de référence.

		1	2	3	4
Matériaux		Dosage Kg/m ³	Volume l/m ³	Correction d'humidité l/m ³	Composition /1m ³ "Etat SSS"
Eau		170	170		188
Ciment		470	157		470
Gravier	G 4/8	149.6	56.5	+12	149.6
	G 8/15	454	169.4		454
	G15/20	409.5	150.6		409.5
Sable		638	261.6	+18	683
Fines calcaires		0.00	0.00	0.00	0.00
Super-plastifiant		Pourcentage	15.5	-12	15.5
		1.5%C=7.1 kg/m ³			
Air		-	19.4		
Total		2298.2	1000	+18	

IV.3.4 GACHEE D'ESSAI

L'objectif de cette mesure est de vérifier la consistance du béton, pour cette raison, on doit fabriquer un volume de béton égal à 6.6 l dont la composition est résumée dans le tableau suivant:

Tableau IV.3.1 : Composition de gâchée d'essai (volume de béton =6.6 l).

Ciment en Kg	Eau en L	Sable en Kg	Fines en Kg	G _{4/8} en Kg	G _{8/15} en Kg	G _{15/20} en Kg	SP en g	Affaissement en mm
3.1	1.2	4.5	0.00	1.00	3.00	2.7	32.6	170

Les résultats d'essai montrent que la consistance de ce béton est acceptable. On cherche ensuite à déterminer les points de saturation.

IV.3.5. ETUDE DE SYSTEME CIMENT-SUPER-PLASTIFIANT [12] et [8]

IV.3.5.1.COMPOSITION DES COULIS

La composition des coulis est déduite de celle du béton de référence en enlevant tous les éléments supérieurs à 2 mm.

Les proportions des différents constituants des coulis sont regroupées dans le tableau IV.4.

IV.3.5.2. MESURE DU TEMPS D'ECOULEMENT AU CONE DE MARSH

Le temps d'écoulement au cône de **Marsh** est mesuré aux échéances suivantes: **t₀+ 5 min, t₀+ 15 min et t₀+ 60 min**. Les résultats de mesures sont regroupés dans les tableaux IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, IV.9 et IV.10.

IV.3. 5.3. COURBES DE SATURATION

Les figures IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, IV.9, et IV.10 illustrent les courbes de saturation obtenues pour six compositions de béton.

Composition N°=1: 0% des fines

Constituants	Masse en g
Sable 0.08/4	870
Ciment CPJ CEM II /A 42.5	940
Fines	0.00
Eau	400-V _E
Super-plastifiant	Variable

Composition N°=2: 5% des fines

Constituants	Masse en g
Sable 0.08/4	826.5
Ciment CPJ CEM II /A 42.5	940
Fines	68.3
Eau	400-V _E
Super-plastifiant	Variable

Composition N°=3: 10% des fines

Constituants	Masse en g
Sable 0.08/4	783
Ciment CPJ CEM II /A 42.5	940
Fines	136.6
Eau	400-V _E
Super-plastifiant	Variable

Composition N°=4: 15% des fines

Constituants	Masse en g
Sable 0.08/4	740
Ciment CPJ CEM II /A 42.5	940
Fines	205
Eau	400-V _E
Super-plastifiant	Variable

Composition N°=5: 20% des fines

Constituants	Masse en g
Sable 0.08/4	696
Ciment CPJ CEM II /A 42.5	940
Fines	273
Eau	400-V _E
Super-plastifiant	Variable

Composition N°=6: 25% des fines

Constituants	Masse en g
Sable 0.08/4	652.5
Ciment CPJ CEM II /A 42.5	940
Fines	341.5
Eau	400-V _E
Super-plastifiant	Variable

Tableau IV.4 : Compositions des coulis.

Dosage d'extrait sec (%)	Temps d'écoulement (S)		
	T ₀ +5min	T ₀ +15min	T ₀ +60min
0.5	15.8	16	16
0.8	14	14	14.5
1.0	12	12	12
1.05	11	11	11
1.08	11	11	11
1.125	11	11	11
1.5	10.5	11	11

Tableau IV.5 : Temps d'écoulement au cône de Marsh C01.

Dosage d'extrait sec (%)	Temps d'écoulement (S)		
	T ₀ +5min	T ₀ +15min	T ₀ +60min
1.00	12	10	12
1.05	11	9.5	11
1.08	8.5	8.5	8.5
1.125	8	8.5	8
1.2	8	8.5	8.2

Tableau IV.6 : Temps d'écoulement au cône de Marsh C02.

Dosage d'extrait sec (%)	Temps d'écoulement (S)		
	T ₀ +5min	T ₀ +15min	T ₀ +60min
1.05	14	13	13.5
1.125	15	14	15
1.2	12	12	12
1.275	11.5	12	12
1.35	11.8	12	12

Tableau IV.7 : Temps d'écoulement au cône de Marsh C03.

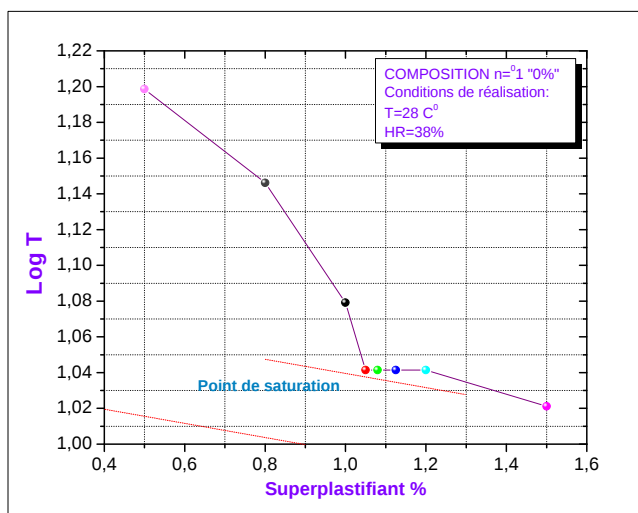


Figure IV.5 : Courbe de saturation n=1: (0% des fines calcaires).

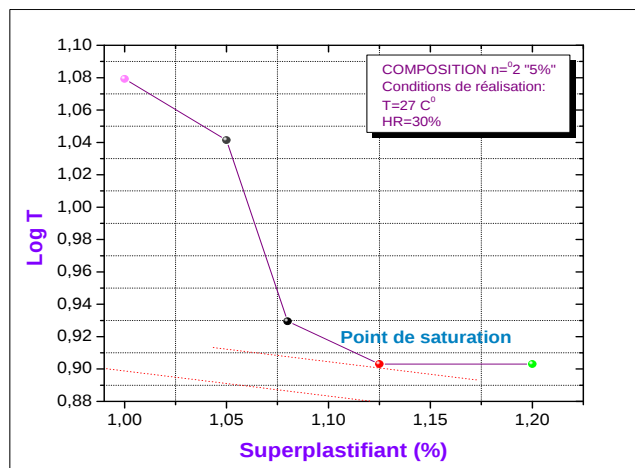


Figure IV.6 : Courbe de saturation n=2: (5% des fines calcaires).

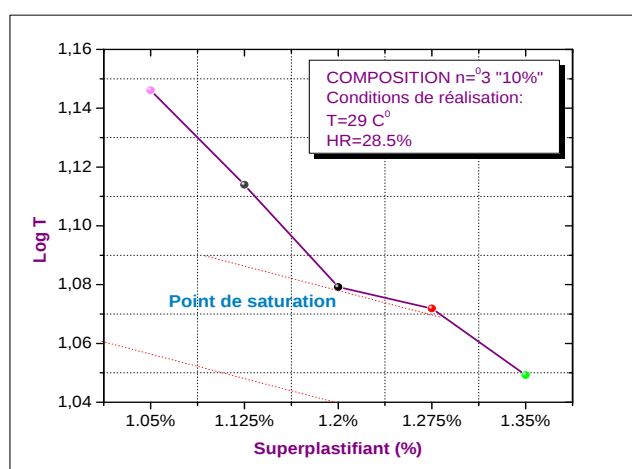


Figure IV.7 : Courbe de saturation n=3: (10% des fines calcaires).

Dosage d'extrait sec (%)	Temps d'écoulement (S)		
	T ₀ +5min	T ₀ +15min	T ₀ +60min
1.125	14.5	15.5	14.5
1.2	13.5	15	13.5
1.275	12.5	14	13
1.35	12.5	14	12.5
1.4	12.3	14	12.5
1.45	12.2	14	12.5

Tableau IV.8 : Temps d'écoulement au cône de Marsh Co04.

Dosage d'extrait sec (%)	Temps d'écoulement (S)		
	T ₀ +5min	T ₀ +15min	T ₀ +60min
1.2	15.5	16	16
1.275	14	14	14.5
1.35	12	12	12
1.4	11	11	11
1.45	11	11	11
1.5	11	11	11

Tableau IV.9 : Temps d'écoulement au cône de Marsh Co05.

Dosage d'extrait sec (%)	Temps d'écoulement (S)		
	T ₀ +5min	T ₀ +15min	T ₀ +60min
1.35	18.5	19	21
1.4	16	17	17.5
1.45	16	18	17.8
1.5	13.5	15	15
1.6	22	22	20
1.65	22	22	20

Tableau IV.10 : Temps d'écoulement au cône de Marsh Co06.

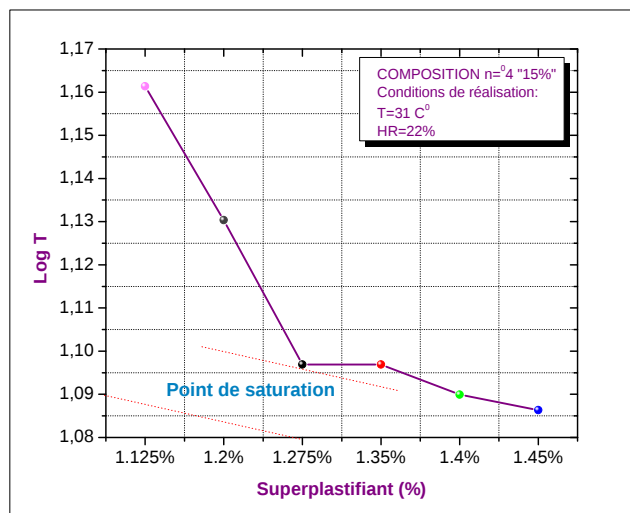


Figure IV.8 : Courbe de saturation n=°4: (15% des fines calcaires).

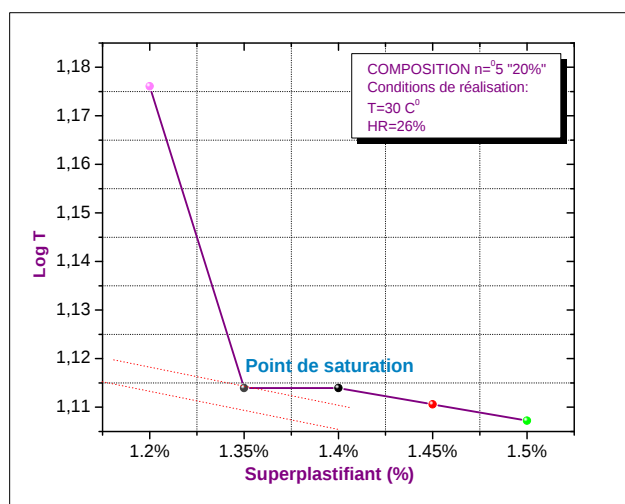


Figure IV.9 : Courbe de saturation n=°5: (20% des fines calcaires).

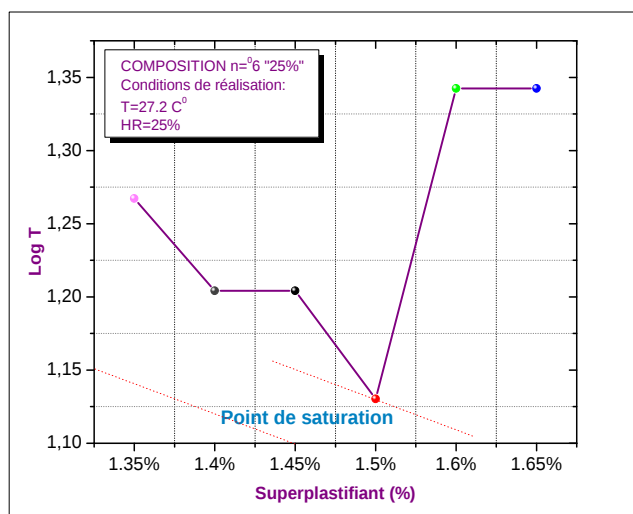


Figure IV.10 : Courbe de saturation n=°6: (25% des fines calcaires).

Tableau IV. 11 : Caractéristiques de super-plastifiant MEDAPLAST SP pour les six compositions du béton.

N° Composition	% SP	$M_{sol} = C \cdot \frac{SP}{100} (kg / m^3)$	$V_{liq} = \frac{M_{sol}}{S \cdot d_{sup}} (l / m^3)$	$V_E = V_{liq} \cdot d_{sup} \cdot \left(\frac{100 - S}{100} \right) (l / m^3)$	$V_{sol} = V_{liq} - V_E$
Composition N°1	1.050	4.940	10.890	8.130	2.760
Composition N°2	1.125	5.288	11.660	8.700	2.960
Composition N°3	1.200	5.640	12.440	9.280	3.160
Composition N°4	1.275	5.990	13.210	9.860	3.350
Composition N°5	1.350	6.345	13.990	10.440	3.550
Composition N°6	1.500	7.050	15.550	11.60	3.950

M_{sol} : masse de la matière solide dans le super-plastifiant

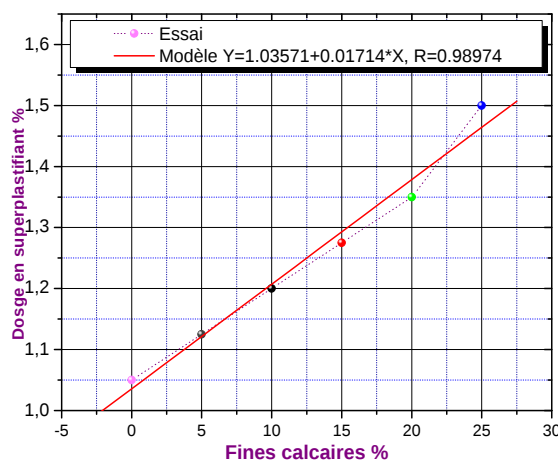
V_{liq} : volume de super-plastifiant liquide

V_E : volume d'eau dans le super-plastifiant

V_{sol} : volume de la matière solide dans le super-plastifiant

IV.4. INTERPRETATION DES RESULTATS

L'étude du système **ciment-fines-super-plastifiant** nous a montré que la dose de saturation augmente avec l'augmentation du pourcentage des fines calcaires dans le sable. L'évolution de la dose de saturation en fonction des taux de fines calcaires dans le sable est une fonction linéaire figure IV.11. L'augmentation des dosages en super-plastifiant en fonction des fines calcaires dans le sable peut être expliquée comme suit : les molécules du super-plastifiant sont adsorbées à la surface des particules du ciment et fines calcaires et de leurs donner une charge négative figure IV.12, de sorte qu'ils se repoussent les uns les autres, conduisant à une défloculation des grains de ciment et fines calcaires Figure IV.13b.

**Figure IV.11:** Evolution de la dose de saturation.

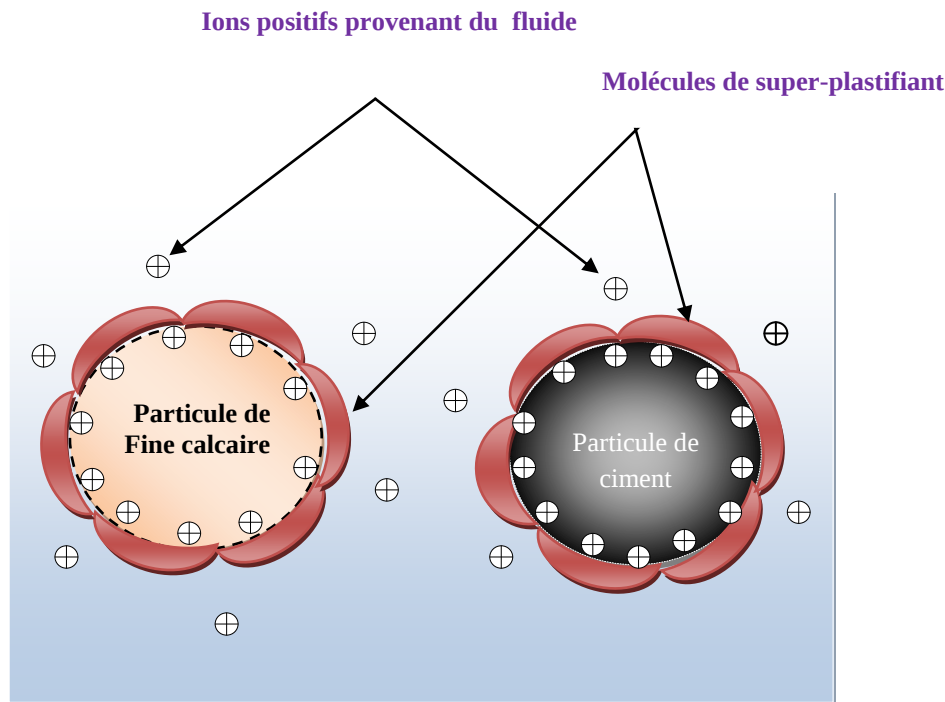


Figure V.12 : Action des molécules de super-plastifiant sur les particules du ciment et fines calcaires.

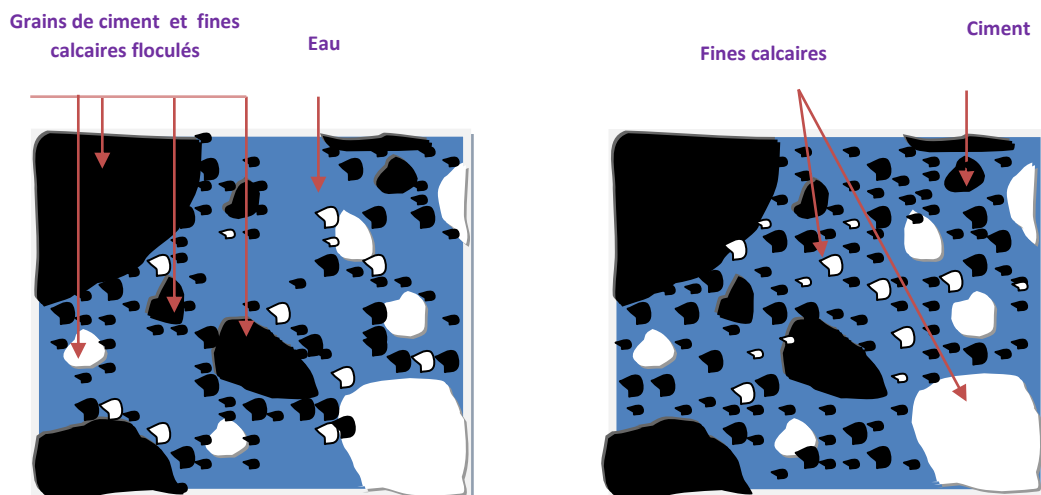


Figure IV.13a : Détail de la pâte fraîche non super-plastifiée de ciment et les particules des fines calcaires.

Figure IV.13b : Détail de la pâte fraîche super-plastifiée de ciment et les particules des fines calcaires.

IV.5. SYNTHESE DU CHAPITRE

Ce chapitre est entièrement consacré à l'étude de la formulation de bétons à base de sables issus de la région de Laghouat. Pour la détermination de la phase inerte optimale (mélange sable + gravier) nous avons utilisé la méthode graphique de **Dreux Gorisse**. Cette méthode est actuellement très utilisée dans les chantiers. Le dosage en liant a été maintenu fixe et égal à 470 kg/m³. Concernant le dosage en super-plastifiant, il a été déterminé par la méthode des coulis élaboré au laboratoire central des ponts et chaussées. Les résultats obtenus montrent que le dosage de saturation en adjuvant augmente de manière concomitante que les pourcentages de fines calcaires présentes dans le sable. Cette évolution peut être considérée comme linéaire.

Les compositions des différents bétons formulés et qui vont faire l'objet d'étude de caractérisation tant à l'état frais que durci sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.13: Composition finale du béton

N° Composition	Eau L/m ³	Eau réel L/m ³	Sable Kg/m ³	Fines %	Fines Kg/m ³	Gravier 4/8 Kg/m ³	Gravier 8/15 Kg/m ³	Gravier 15/20 Kg/m ³	Ciment CEM II 42.5 Kg/m ³	SP "extrait sec" Kg/m ³	SP solution l/m ³
Composition N°1	170	191.9	683	0	0	149.3	454	410	470	4.9	10.9
Composition N°2	170	191.3	648.9	5	34.2	149.3	454	410	470	5.3	11.7
Composition N°3	170	190.7	614.7	10	68.3	149.3	454	410	470	5.6	12.4
Composition N°4	170	190.1	580.6	15	102.5	149.3	454	410	470	6.0	13.2
Composition N°5	170	189.6	546.4	20	136.6	149.3	454	410	470	6.4	14
Composition N°6	170	188.4	512.3	25	170.8	149.3	454	410	470	7.1	15.6

CHAPITRE V : PROPRIETES DES BETONS A L'ETAT FRAIS ET DURCIS

V.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus par des essais physico-mécaniques effectués sur des éprouvettes de béton. Les techniques expérimentales utilisées sont exposées dans le deuxième chapitre. Nous avons préparé six mélanges en utilisant la formulation présentée dans le quatrième chapitre.

Les différents points que nous avons analysés dans cette étude expérimentale sont :

- Evolution de l'air occlus en fonction des taux de fines calcaires.
- Evolution de l'affaissement au cône d'Abrams en fonction des doses de superplastifiant et des taux de fines calcaires.
- Evolution de la résistance à la compression en fonction des taux de fines et du temps.
- Evolution de la résistance à la flexion en fonction des taux de fines et du temps.
- Evolution de retrait de séchage en fonction des taux de fines et du temps.
- Evolution de l'énergie de la rupture en fonction des taux de fines calcaires.

Une synthèse des résultats est présentée à la fin de ce chapitre.

V. 2. PROPRIETES DU BETON FRAIS

V.2.1 AIR OCCLUS :

Les résultats de cet essai sont résumés dans le tableau V.1

Tableau V.1 : Propriétés du béton frais

MASSE VOLUMIQUE (Kg/m ³)	POURCENTAGES DES FINES CALCAIRES					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
$\rho_{théorique}$	2410.7	2412.5	2413.8	2415.1	2417.2	2420.4
$\rho_{réelle}$	2338	2340.6	2348.2	2351.3	2364	2369.6
$\beta = \frac{\rho_{réelle}}{\rho_{théorique}}$	0.9698	0.9702	0.9728	0.97358	0.97799	0.97902
$(1 - \beta).100$	3 %	2.98%	2.72%	2.64%	2.2%	2.1%

- Détermination de la masse volumique théorique $\rho_{theorique}$
- Exemple pour Composition N°01 :

$$\rho_{th} = \frac{(m_c + m_e + m_s + m_G + m_a)}{V_{th}}$$

$$V_{th} = \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_e}{\rho_e} + \frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_{G_{4/8}}}{\rho_{G_{4/8}}} + \frac{m_{G_{8/15}}}{\rho_{G_{8/15}}} + \frac{m_{G_{15/20}}}{\rho_{G_{15/20}}} + \frac{m_a}{\rho_a}$$

$$V_{th} = \frac{470}{3} + \frac{191.87}{1} + \frac{683}{2.61} + \frac{149.63}{2.65} + \frac{453.96}{2.68} + \frac{409.54}{2.72} + \frac{4.94}{1.79} = 990.05l$$

$$V_{th} = (157 + 191.87 + 262 + 56.46 + 169.39 + 150.57 + 2.76) = 990.05l$$

$$\rho_{th} = \frac{470 + 191.87 + 683 + 1013.13 + 4.94}{990.05} \cdot 10^3 = 2386.70kg / m^3$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 990.05l \rightarrow \rho = 2386.70kg / m^3 \\ 1000l \rightarrow \rho = x \end{array} \right\} \Rightarrow x = 2410.69kg / m^3 \approx 2410.70kg / m^3$$

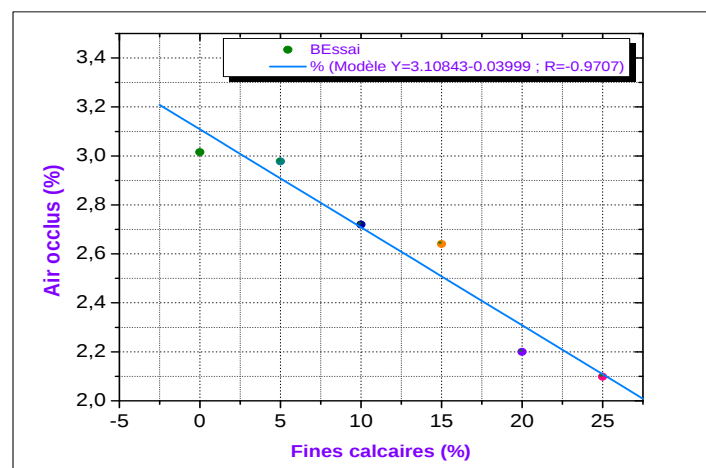


Figure V.1 : Variation du pourcentage d'air occlus en fonction des taux de fines calcaires.

D'après les résultats illustrés dans le tableau V.1 et la figure V.1 nous avons constaté que le pourcentage de l'air occlus diminue avec l'augmentation des fines calcaires dans le sable. Ainsi, nous remarquons que l'évolution de l'air occlus en fonction des taux de fines calcaires est une fonction décroissante linéaire en fonction des fines calcaires. La diminution de l'air occlus peut être expliquée comme suit : du fait que les fines calcaires remplacent ; lors du compactage du béton les vides occupés par les bulles d'air à l'intérieur du béton. Dans ce cas, on prévoit un dégagement d'air vers l'extérieur du béton frais.

Les résultats de mesure de l'air occlus dans le béton frais nous ont montré que la teneur en air diminue avec l'augmentation des fines calcaires dans le sable. Le taux de variation de l'air occlus est déterminé par rapport à la composition de base (**composition N°1**).

$$TV_{air} = \frac{tsp_i - tsp_0}{tsp_0}$$

TV_{air} : Taux de variation de l'air occlus dans le béton frais.

tsp_i : Teneur en air dans la **composition N°i** (i=2 à 6)

tsp₀ : Teneur en air dans la **composition N°1**.

Les résultats du calcul sont regroupés dans le tableau V.2 et l'histogramme de la figure V.2.

Tableau V.2 : Taux de variation de l'air occlus dans le béton

Fines calcaires %	5	10	15	20	25
Taux de variation de l'air occlus en %	-1.227%	-9.78%	-12.44%	-12.81%	-30.41%

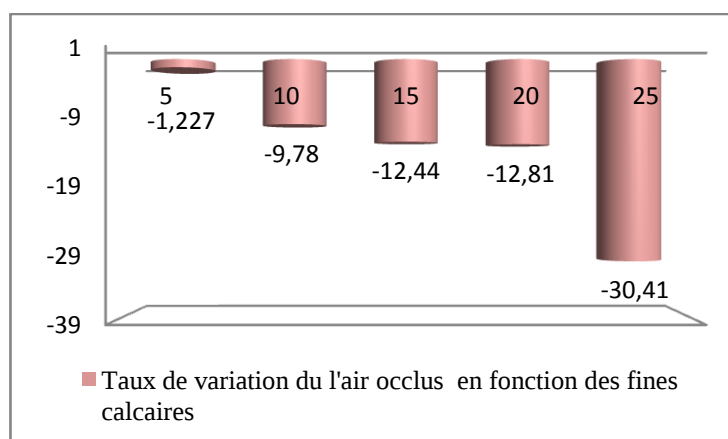


Figure V.2 : Taux de variation de l'air occlus dans le béton.

V.2.2 AFFAISSEMENT AU CONE D'ABRAMS

Le tableau V.3 résume les valeurs de l'affaissement au cône d'**Abrams** des différentes compositions du béton.

Tableau V.3 : Affaissement au cône d'Abrams.

	POURCENTAGES DES FINES CALCAIRES					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Super-plastifiant % C	1.05	1.125	1.200	1.275	1.35	1.5
Affaissement mm	170	175	178	180	202	230

Il est connu que l'augmentation des fines dans le sable provoque une diminution de la maniabilité du béton (absorption importante des fines). Cependant, l'étude des coulis nous a montré que le dosage en super-plastifiant augmente avec l'augmentation des fines calcaires dans le sable et, par conséquent l'augmentation de la maniabilité voir figures V.3a et V.3b.

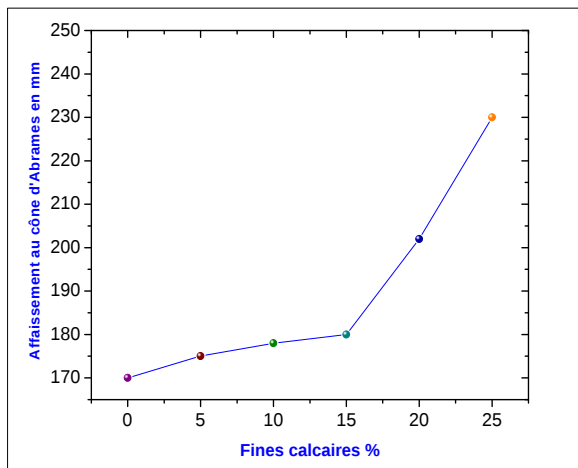


Figure V.3a : Variation de l'affaissement au cône d'Abrams en fonction du taux de fines calcaires.

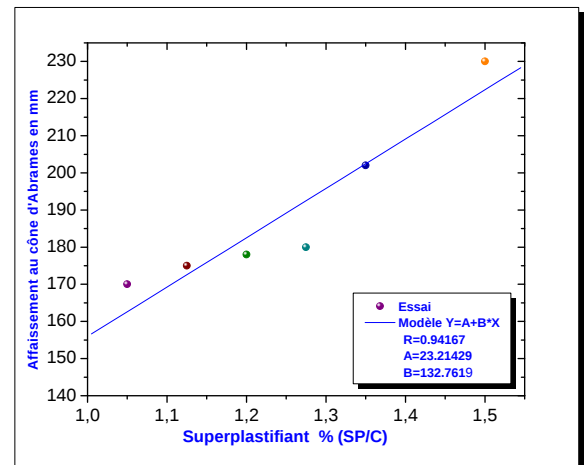


Figure V.3b : Variation de l'affaissement au cône d'Abrams en fonction des doses de superplastifiant.

L'évolution de l'affaissement au cône d'Abrams est une fonction croissante en fonction de l'augmentation des taux de fines calcaires et le dosage en super-plastifiant. Le taux de variation de l'affaissement est illustré dans le tableau V.4 et dans la figure V.4.

$$TV_A = \frac{A_i - A_0}{A_0}$$

TV_A : Taux de la variation de l'affaissement au cône d'Abrams.

A_i : Affaissement du béton de la **composition N°i (i=2, à6).**

A₀ : Affaissement du béton de la **composition N°1.**

Tableau V.4 : Taux de variation de l'affaissement au cône d'Abrams.

Fines calcaires %	5	10	15	20	25
Taux de variation de l'affaissement	+2.94%	+4.71%	+5.88%	+18.82%	+35.29%

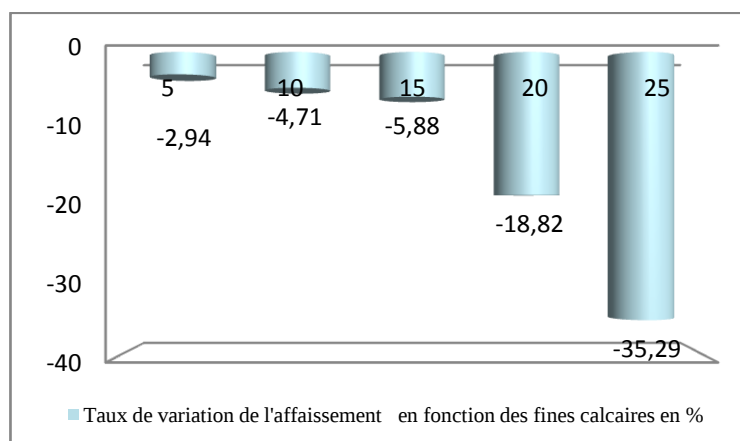


Figure V.4 : Taux de variation de l'affaissement.

V.3. RESISTANCE MECANIQUE

V.3.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION

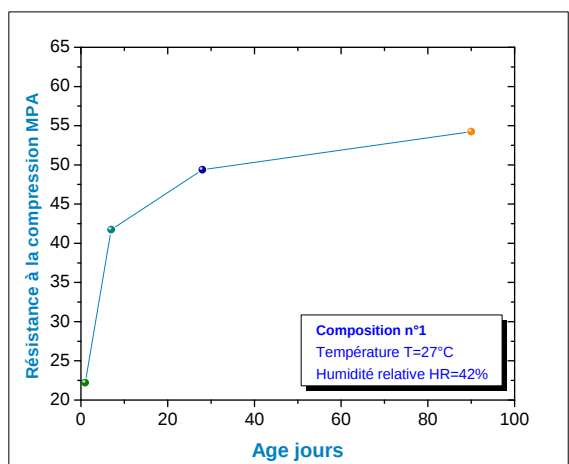
EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DU TEMPS

L'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cubiques de dimensions (10x10x10cm³) âgées de 1j, 7j, 28j et 90 jours voir chapitre II.

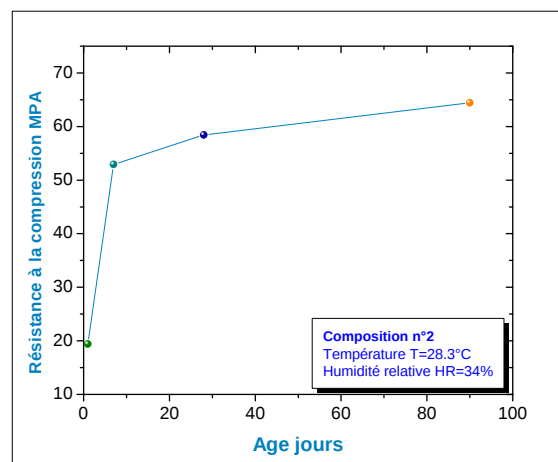
Le tableau V.5 regroupe les valeurs de la résistance à la compression en fonction des taux des fines calcaires et du temps.

Tableau V.5: Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps

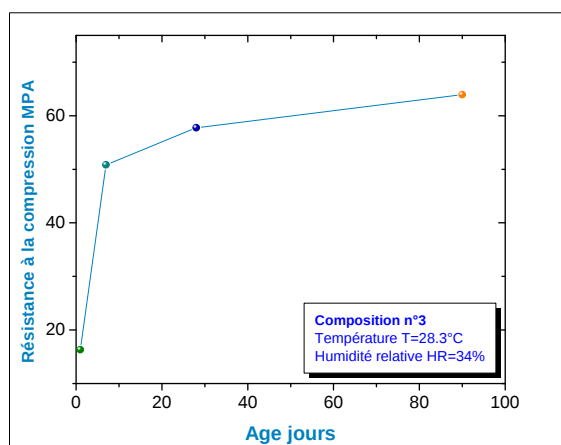
RESISTANCE A LA COMPRESSION MPA				
Fines %	Age "jours"			
	1j	7j	28j	90j
0	22.20 ±0.570	41.74 ±1.830	49.37 ±2.75	54.23 ±3.4
5	19.41 ±0.930	52.93 ±2.90	58.43 ±2.67	64.42 ±2.16
10	16.30 ±0.710	50.85 ±1.270	57.77 ±0.390	63.92 ±1.48
15	14.90 ±0.280	43.4 ±1.820	53.33 ±1.21	59.24 ±3.27
20	15.34 ±0.620	43.95 ±1.30	52.10 ±2.59	63.12 ±2.91
25	16.80	42.78	51.86	62.34



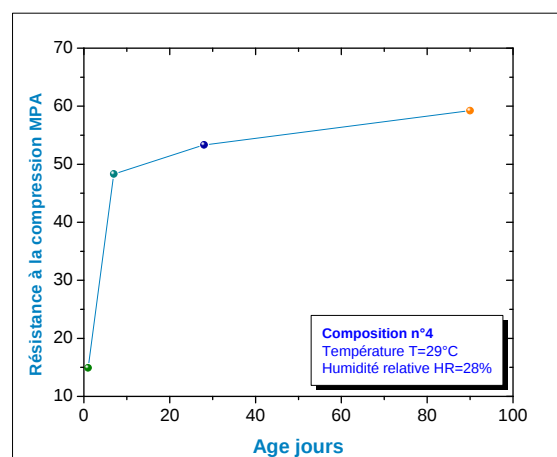
Figures V.5 : Courbe d'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps (**composition n°1**).



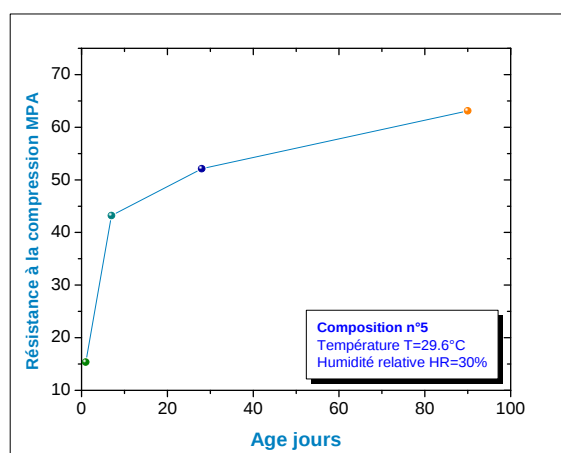
Figures V.6 : Courbe d'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps (**composition n°2**).



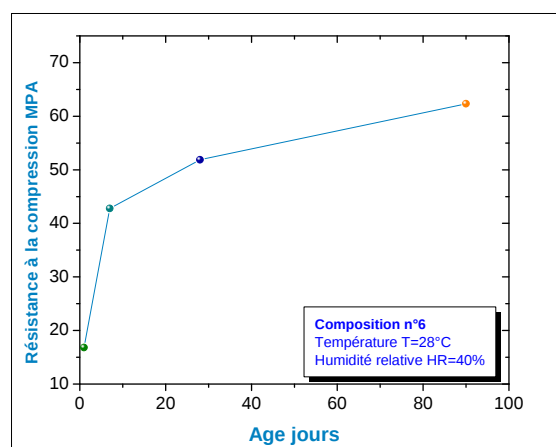
Figures V.7 : Courbe d'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps (**composition n°3**).



Figures V.8 : Courbe d'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps (**composition n°4**).



Figures V.9 : Courbe d'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps (**composition n°5**).

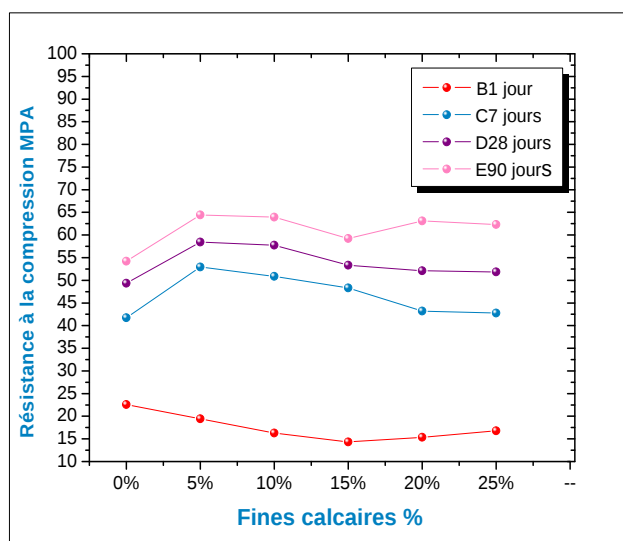


Figures V.10 : Courbe d'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps (**composition n°6**).

Les figures V.5 à V.10 représentent les courbes expérimentales donnant l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps.

Nous avons observé que les courbes d'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps présentent la même allure quel que soit la teneur en fines calcaires dans le sable.

L'évolution de la résistance à la compression est une fonction croissante en fonction du temps. Cette fonction varie linéairement pendant les premiers jours de durcissement (Figure V.5 à V.10). Au premier jour, la résistance à la compression du béton sans fines calcaires est meilleure à celle du béton avec fines calcaires sa valeur varie entre 15 à 22 MPA. Par contre après sept jours de durcissement la résistance à la compression de béton sans fines calcaires est inférieure à celle des bétons avec fines. De plus, les courbes expérimentales (figure V.11) montrent que l'optimum de remplacement du sable calcaire par des fines correspond à des teneurs de l'ordre de 5 à 10% ou la résistance à la compression atteint à l'âge de 90 jours 64.42 MPA. Au delà de ce taux de substitution, nous avons constaté que la résistance à la compression décroît en fonction des teneurs des fines calcaires, mais elle reste toujours supérieure à la résistance de la composition de base (sans fines calcaires dans le sable).



Figures V.11 : Courbes d'évolution de la résistance à la compression en fonction des teneurs en fines calcaires.

Après 24 heures de durcissement la résistance du béton à la compression sans substitution des fines calcaires est meilleure que les bétons avec des pourcentages variés en fines. Le taux de diminution de la résistance varie entre -13% et -32.89% .

A l'âge de 7 jours, la substitution de 5% des fines améliore la résistance d'un taux de +26.8% et de +18.35% à l'âge de 28 jours, après 90 jours de durcissement le taux d'amélioration est de l'ordre de +18.79% (figure V.12).

$$TVR_{Cji} = \frac{R_{Cji} - R_{Cj0}}{R_{Cj0}}$$

TVR_{Cji}: Taux de variation de la résistance à la compression R_{Cji}.

R_{Cj0}: Résistance à la compression de la **composition N°1** (0% des fines calcaires), j=1j, 7j, 28j et 90j.

R_{Cji}: Résistance à la compression de la **composition N°i** (I=2 à 6), j=1j, 7j, 28j et 90j.

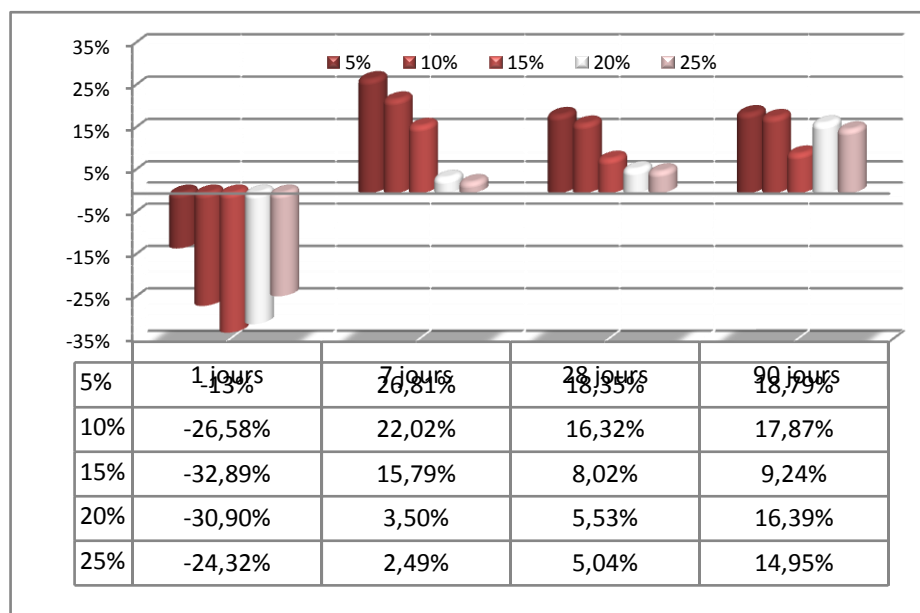


Figure V.12: Taux de variation de la résistance à la compression.

V.3.2 RESISTANCE A LA FLEXION

V.3.2.1. EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA FLEXION EN FONCTION DU TEMPS

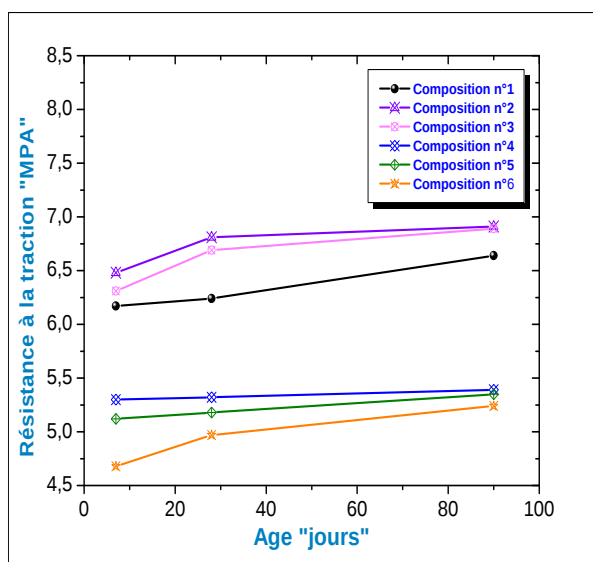
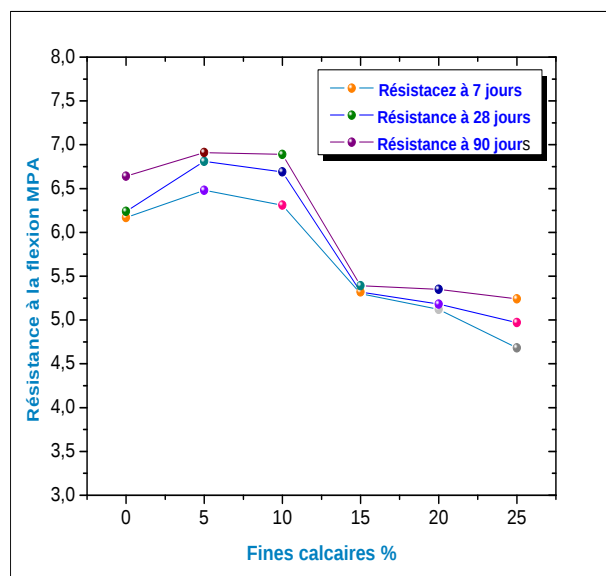
L'essai de flexion des trois points est effectué sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm âgées de 7, 28, et 90 jours (voir chapitre II).

Les résultats d'essais sont regroupés dans le tableau V.6.

Tableau V.6 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du temps.

RESISTANCE A LA FLEXION "MPA".			
Fines %	Age "jours"		
	7j	28 j	90 j
0	6.17 ±0.66	6.24 ±0.72	6.64 ±0.36
5	6.48 ±0.17	6.81 ±0.104	6.91 ±0.092
10	6.31 ±0.54	6.69 ±0.028	6.89 ±0.03
15	5.30 ±0.11	5.32 ±0.2	5.39 ±0.12
20	5.12 ±0.32	5.18 ±0.26	5.35 ±0.169
25	4.68 ±0.21	4.97 ±0.12	5.24 ±0.171

Comme dans le cas de la compression, les courbes expérimentales (figures V.13 et V.14) montrent que la meilleure résistance est obtenue avec une teneur de 5 à 10% des fines calcaires. Au delà de 10% la résistance à la flexion commence à diminuer avec l'augmentation des taux de fines dans le sable.

**Figures V.13 :** Courbes d'évolution de la résistance à la traction en fonction du temps.**Figures V.14 :** Courbe d'évolution de la résistance à la flexion en fonction des teneurs en fines calcaires

Le taux d'amélioration optimal de la résistance à la flexion est obtenu pour un pourcentage de substitution des fines calcaires de l'ordre de 5 à 10% (voir figure V.15).

$$TVR_{f_{ji}} = \frac{R_{f_{ji}} - R_{f_0}}{R_{f_0}}$$

TVR_{f_{ji}} : Taux de variation de la résistance à la flexion.

R_{f₀} : Résistance à la flexion de la **composition N°1** (0% des fines calcaires), j=7j, 28j et 90j.

R_{f_{ji}} : Résistance à la flexion de la **composition N°i** (i=2 à 6), j=7j, 28j et 90j.

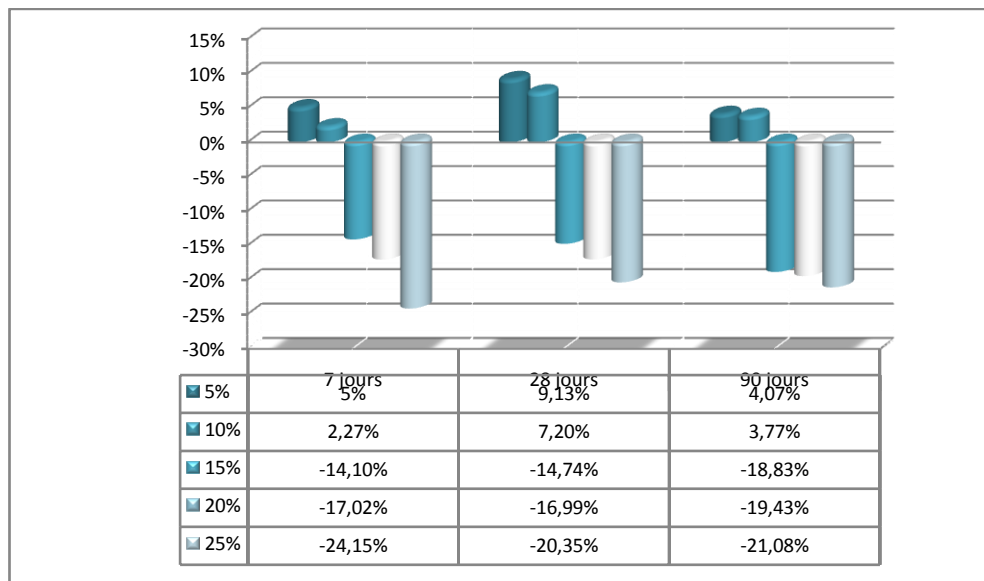


Figure V.15: Taux de variation de la résistance à la flexion.

V.3.3. INTERPRETATION DES RESULTATS :

Une meilleure résistance à la compression à l'âge d'un jour est expliquée comme suit : Le superplastifiant introduit dans le béton pour améliorer la mise en œuvre. Ainsi, l'étude du système ciment-fines-superplastifiant nous a montré que la dose de saturation augmente avec l'augmentation des taux fines calcaires dans le sable. Les superplastifiants augmentent le temps de prise et par conséquent le retard de la précipitation des hydrates. Pour cette raison la résistance mécanique du béton sans fines calcaires est meilleure à celle de béton avec fines au jeune âge. Après 07 jours de durcissement : La présence des fines calcaires dans le sable avec des pourcentages de l'ordre de 5 à 10% améliore l'adhérence pâte hydratée-fines et la compacité du béton et par conséquent une augmentation de la résistance mécanique (résistance à la compression et à la flexion).

Un taux élevé en fines calcaires dans le sable (15 à 25%) influent négativement sur la compacité du béton (augmentation de la porosité du béton) et par conséquent une diminution de la résistance mécanique du béton.

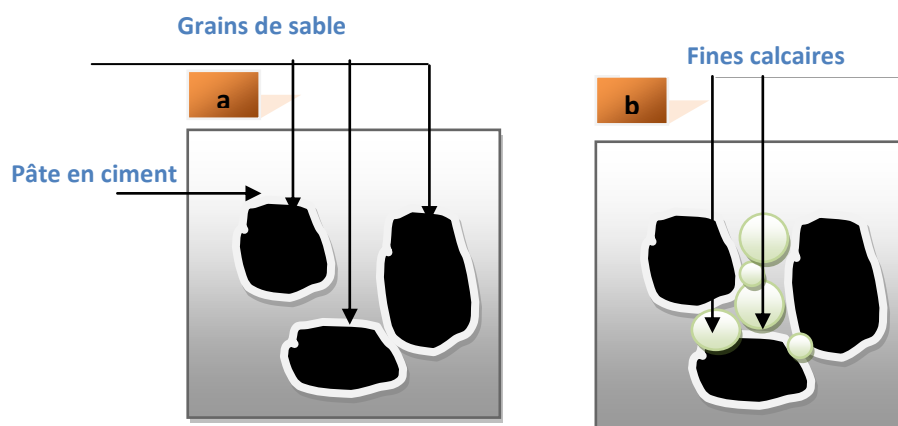


Figure V.16 : a) béton sans fines calcaires.
b) béton avec 5 à 10 % de fines calcaires.

V.4.RETRAIT DE SECHAGE

La mesure du retrait est effectuée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $(7 \times 7 \times 28)$ cm³ jusqu'à l'âge de 150 jours. Les déformations des éprouvettes sont mesurées à l'aide d'un rétractomètre de (précision 10^{-3} mm). La mesure de référence est à l'âge d'un jour.

V.4.1 PERTE RELATIVE EN MASSE

Les pertes relatives en masse sont également calculées à partir du suivi de la masse des éprouvettes. Les pesées sont réalisées avec une précision de 0.1g.

La perte relative en masse évolue rapidement pendant les premiers jours de durcissement ; ceci est dû à la consommation de l'eau pour l'hydratation du ciment. Après un mois de durcissement la perte de masse commence à se stabiliser.

Tableau V.7: Perte relative en masse.

Age	PERTE RELATIVE EN MASSE "% "					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
2j	0.43	0.815	0.765	0.34	1.583	1.039
7j	0.98	1.335	1.16	1.615	1.928	1.775
28j	1.47	1.875	1.491	2.518	2.371	2.321
90j	1.66	2.07	1.56	2.69	2.49	2.37

Le tableau V.7 et les figures V.17 à V.22 présentent l'évolution moyenne de la quantité d'eau évaporée en fonction du temps de conservation des éprouvettes à l'air libre.

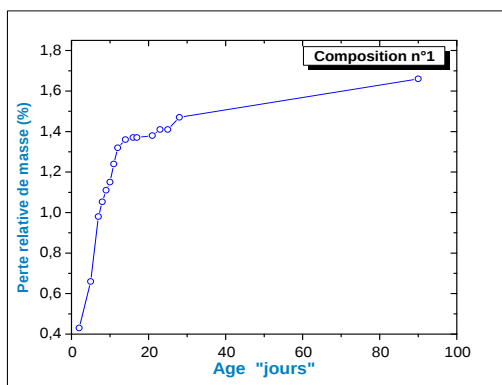


Figure V.17 : Perte relative de masse en fonction du temps (Composition N°1).

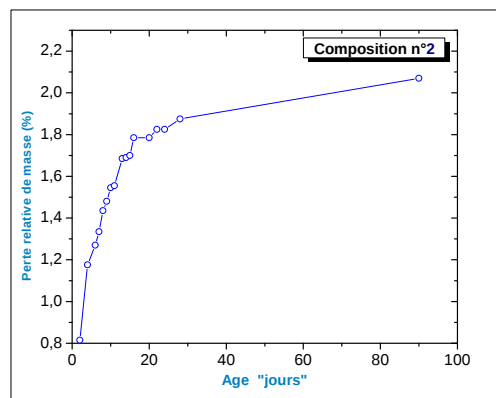


Figure V.18 : Perte relative de masse en fonction du temps (Composition N°2).

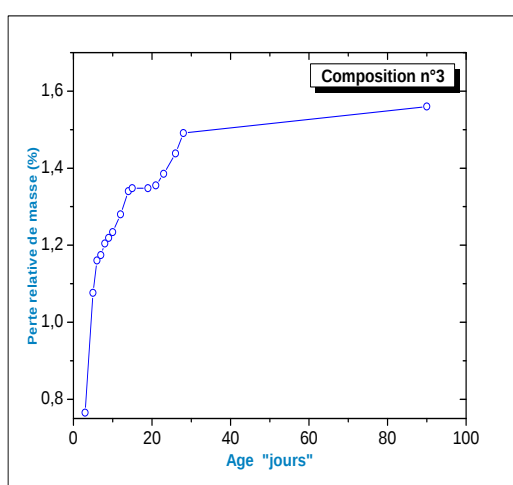


Figure V.19 : Perte relative de masse en fonction du temps (Composition N°3).

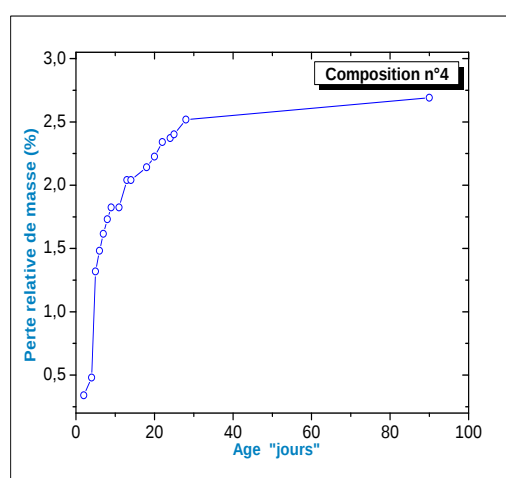


Figure V.20: Perte relative de masse en fonction du temps (Composition N°4).

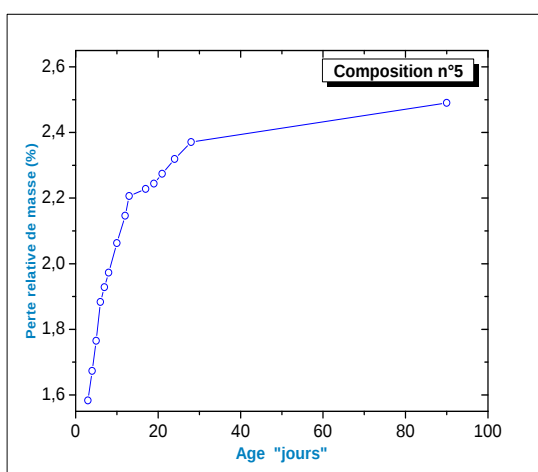


Figure V.21 : Perte relative de masse en fonction du temps (Composition N°5).

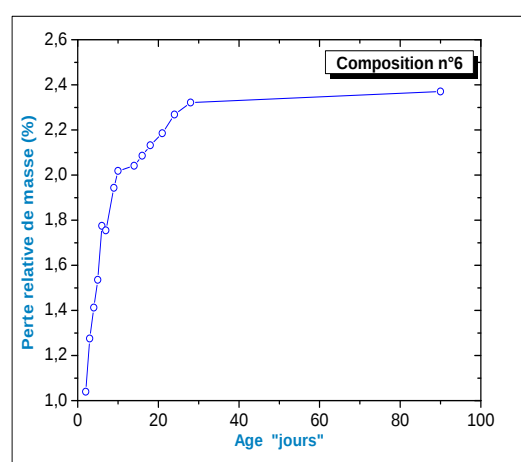


Figure V.22 : Perte relative de masse en fonction du temps (Composition N°6).

V.4.2. EVOLUTION DU RETRAIT DE SECHAGE EN FONCTION DU TEMPS

Les valeurs du retrait de séchage sont résumées dans le tableau V.8.

Tableau V.8 : Evolution du retrait de séchage en fonction du temps.

Fines %	Déformations de retrait $\mu\text{m/m}$			
	Age "jours"			
	7 j	28 j	90 j	150 j
0	268	508	564	580
5	450	595	678	689
10	394	546	580	594
15	315	485	545	555
20	280	416	479	496
25	230	300	335	345

Les figures V.23 à V.28 représentent l'évolution du retrait en fonction du temps. Nous avons observé que ces courbes présentent la même allure quel que soit le pourcentage des fines calcaires. Les courbes d'évolution du retrait sont partagées en deux parties principales:

- ❶. **Première partie OA :** le retrait évolue linéairement et rapidement avec le temps.
- ❷. **Deuxième partie AB :** les déformations de retrait commence à se stabiliser jusqu'à 150 jours la valeur finale de mesure.

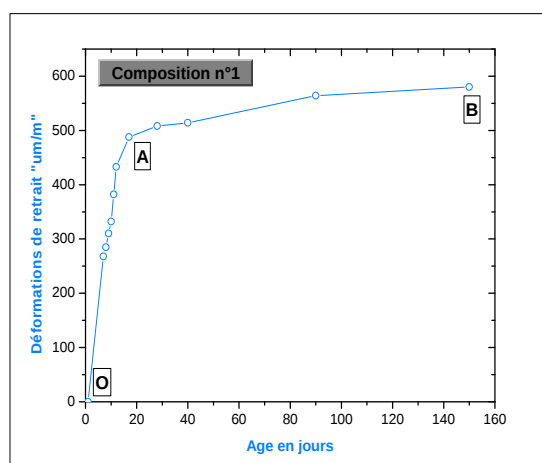


Figure V.23 : Evolution du retrait de séchage en fonction du temps : Composition N°1.

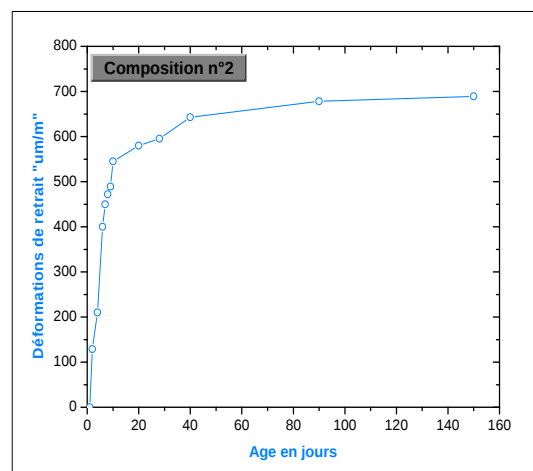


Figure V.24: Evolution du retrait de séchage en fonction du temps : Composition N°2.

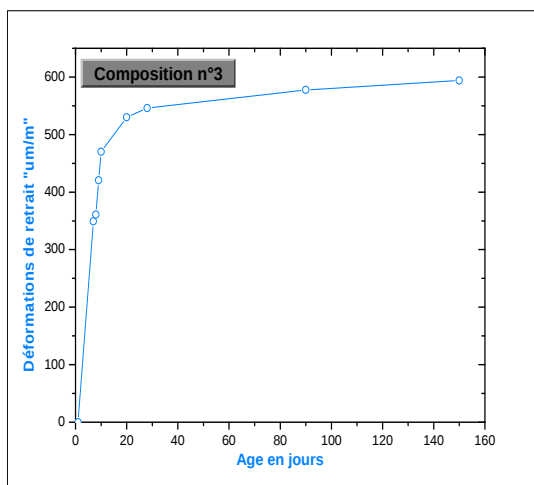


Figure V.25 : Evolution du retrait de séchage en fonction du temps : Composition N°3.

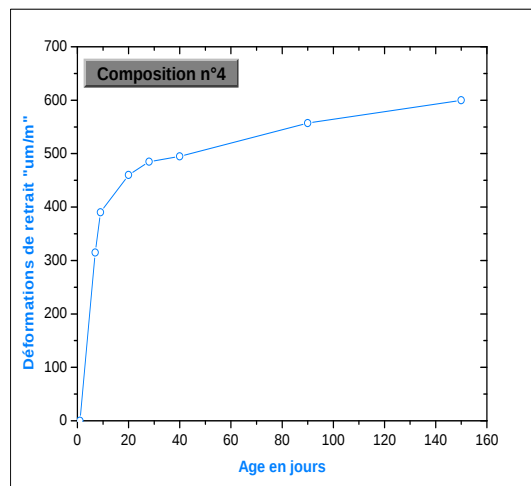


Figure V.26 : Evolution du retrait de séchage en fonction du temps : Composition N°4.

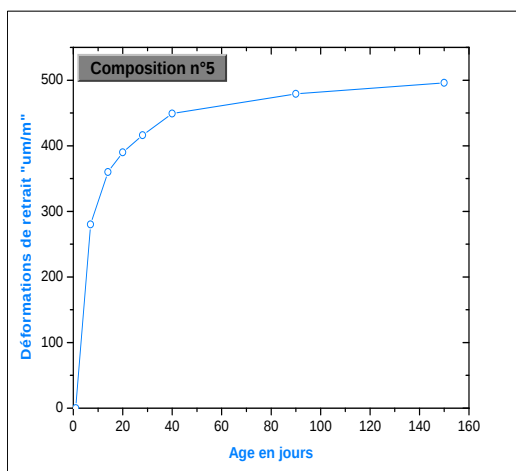


Figure V.27 : Evolution du retrait de séchage en fonction du temps : Composition N°6.

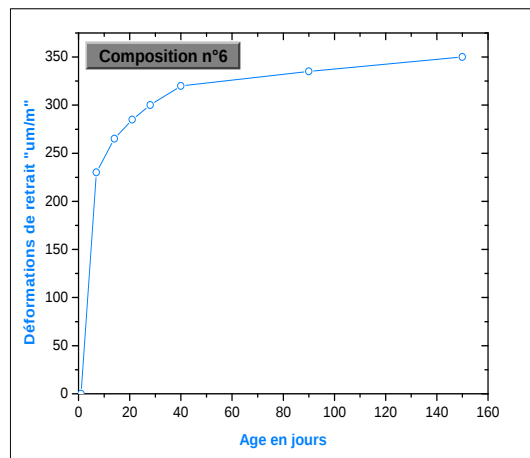


Figure V.28: Evolution du retrait de séchage en fonction du temps : Composition N°6.

V.4.3. EVOLUTION DU RETRAIT DE SECHAGE EN FONCTION DES FINES

Comme il est montré dans la figure V.29 l'amplitude maximale du retrait est observée dans la composition qui présente la meilleure résistance mécanique (**composition N°2**).

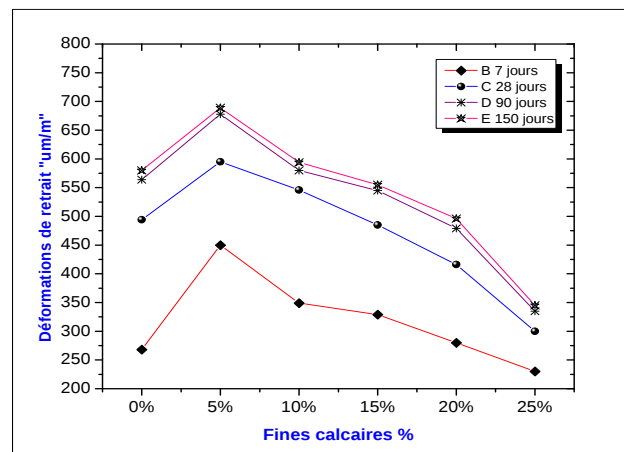


Figure V.29 Courbes d'évolution du retrait de séchage en fonction des fines.

Les résultats nous ont montré que l'amplitude maximale du retrait de séchage est observée dans la **composition N°2** (5% des fines calcaires). A l'âge de 7 jours, le taux d'augmentation de retrait atteint **+67.91%**, **+17.13%** à 28 jours, **+20.21%** à 90 jours et **+18.79%** à l'âge de 150 jours. Pour les autres compositions, le taux de variation de retrait est résumé dans le tableau **V.16** et illustré graphiquement dans l'histogramme **V.30**.

$$TV_{\mu} = \frac{\mu_{ji} - \mu_{j0}}{\mu_{j0}}$$

TV_μ : Taux de variation du retrait de séchage.

μ_{j0} : Retrait de séchage de la **composition N°1** (0% des fines calcaires), j=7j, 28j, 90j et 150j.

μ_{je} : Retrait de séchage de la **composition N°i** (I=2 à 6), j=7j, 28j, 90j, 150j.

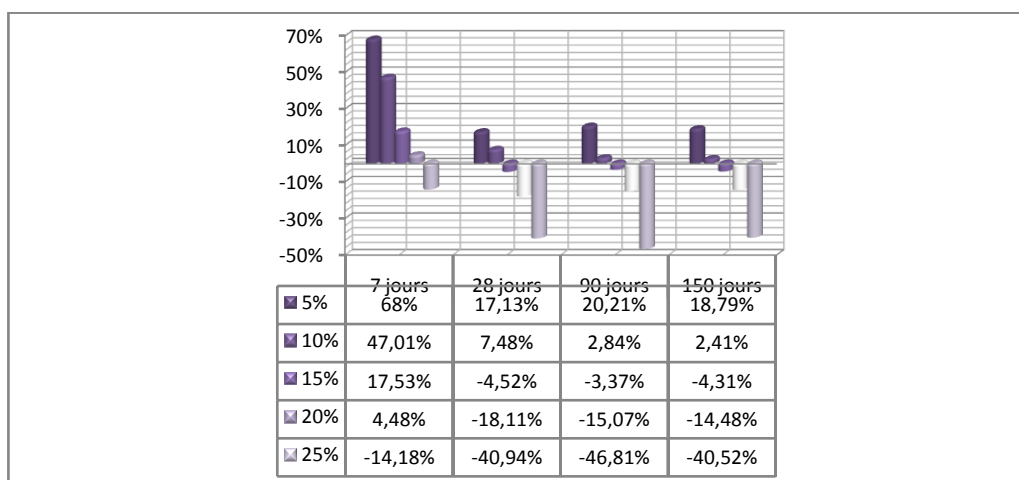


Figure V.30 : Taux de variation du retrait de séchage.

V.4.4 INTERPRETATION DES RESULTATS :

La consommation de l'eau présente dans les pores capillaires (figure V.31.a) pour l'hydratation du ciment provoque leur assèchement, ceci conduit à la formation de ménisque figure V.31b. Les pressions capillaires et le départ de l'eau présente dans le béton par évaporation sont des facteurs principaux pour le développement du retrait.

La substitution de 5% des fines calcaires dans le sable améliore la compacité du béton voir figure V.32. Lors du suivi de la masse des éprouvettes, on constate que la perte en poids dans ce béton est presque identique avec les **compositions N°4, 5 et 6**. La porosité du béton à 5% des fines calcaires (**composition N°2**) est minimale comparativement aux **compositions N°4, 5 et 6** et par conséquent les pressions capillaires sont importantes dans ce béton, nous pensons que l'augmentation des pressions capillaires est le facteur principal dans le développement du retrait dans ce béton (**composition N°2**).

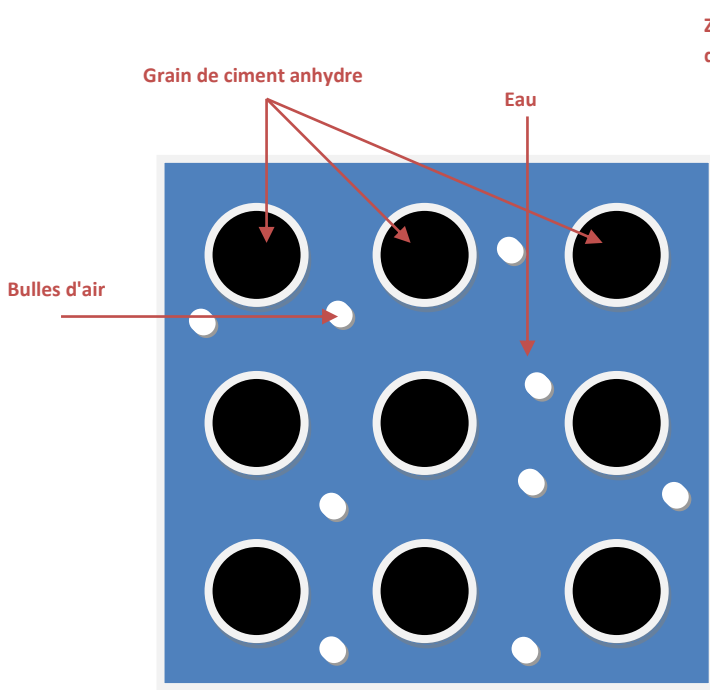


Figure V.31.a : structure de la pâte de ciment avant l'hydratation.

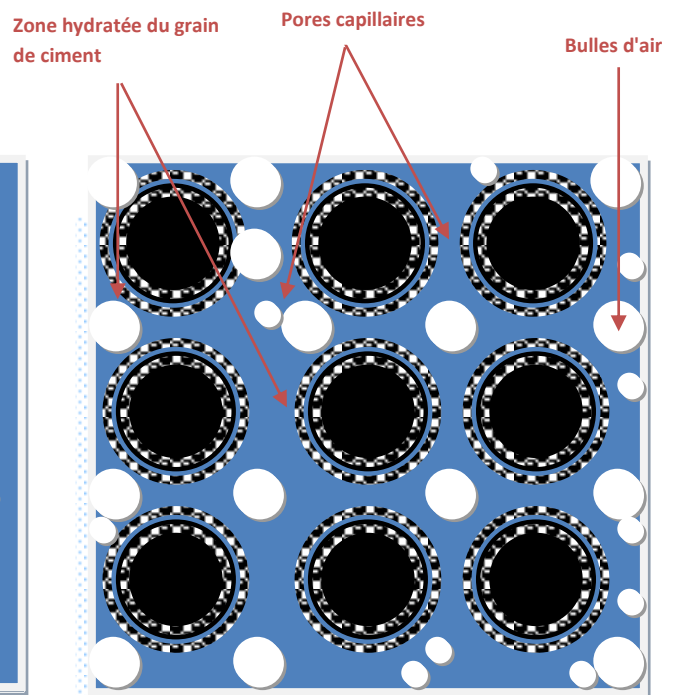


Figure V.31.b : structure de la pâte de ciment au cours de l'hydratation.

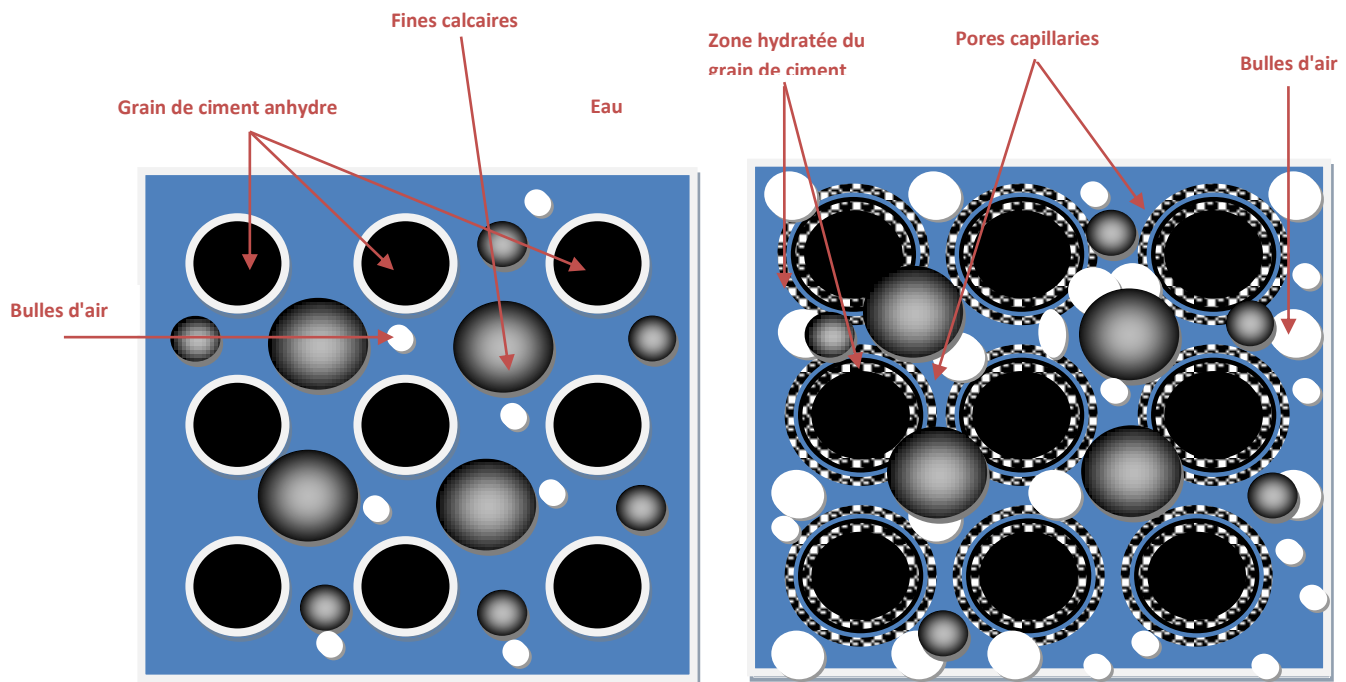


Figure V.32.a : structure de la pâte de ciment avant l'hydratation.

Figure V.32.b : structure de la pâte de ciment au cours de l'hydratation.

V.5. MECANIQUE DE LA RUPTURE

Le but essentiel de ce travail est d'étudier expérimentalement l'évolution de l'énergie de fissuration G_f et le facteur d'intensité des contraintes K en fonction des pourcentages variés en fines calcaires dans le sable.

V.5.1. RESULTATS:

La figure V.33 représente les faciès de rupture de béton.

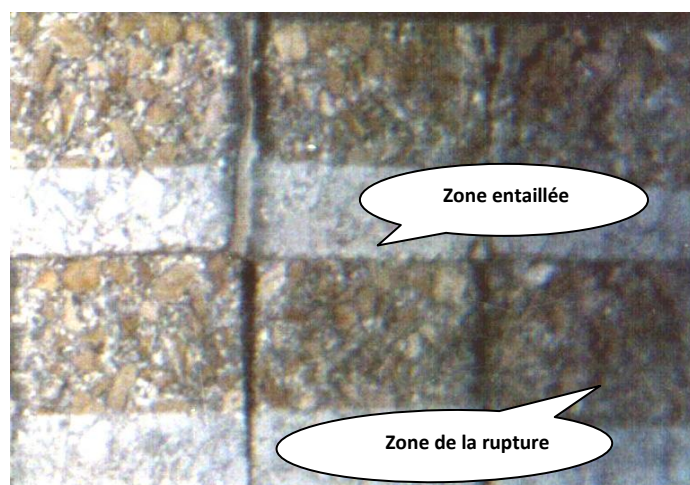


Figure V.33: Faciès de rupture de béton.

V.5.1. EVOLUTION DE L'EFFORT DE FLEXION EN FONCTION DE LA FLECHE

Les figures V.34 à V.39 montrent l'allure des courbes expérimentales "effort-flèche».

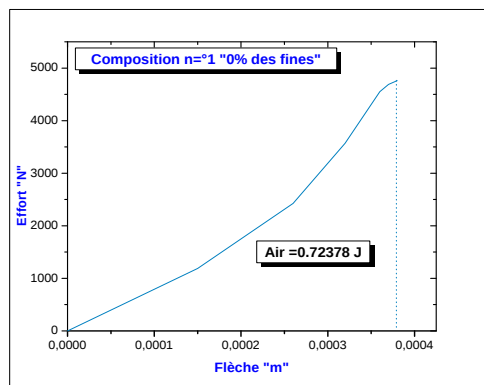


Figure V.34: Courbes effort-flèche (composition N°1).

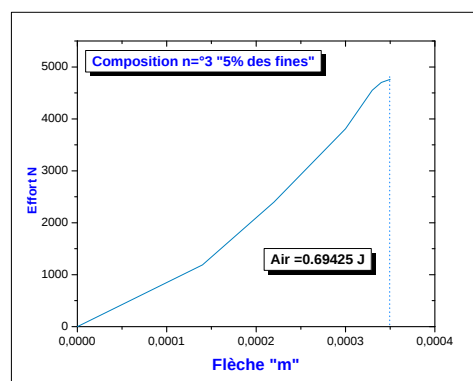


Figure V.35 : Courbes effort-flèche (composition N°2).

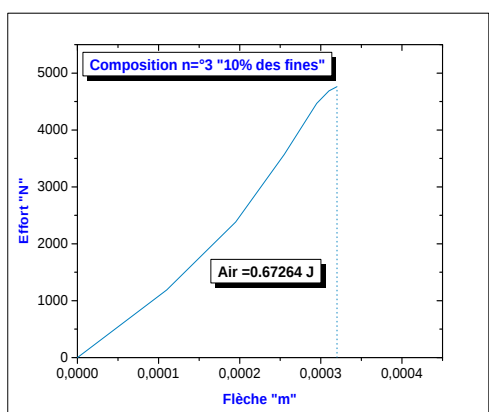


Figure V.36 : Courbes effort-flèche (composition N°3).

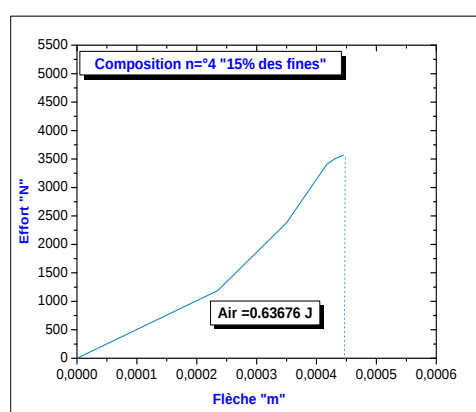


Figure V.37 : Courbes effort-flèche (composition N°4).

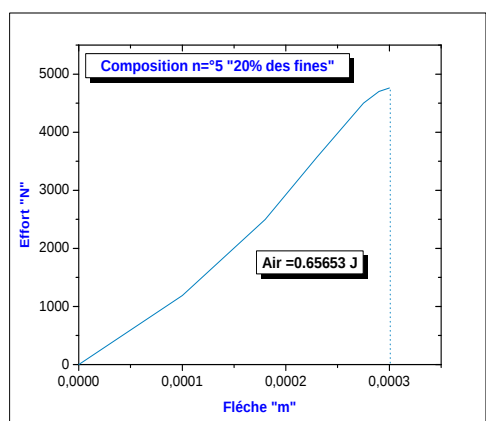


Figure V.38 : Courbes effort-flèche (composition N°5).

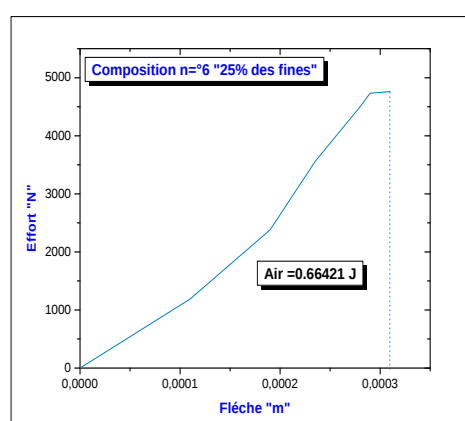


Figure V.39 : Courbes effort-flèche (composition N°6).

En observant ces courbes, on constate que l'effort de flexion et de flèche sont légèrement influencés par le pourcentage des fines calcaires dans le sable, sauf dans la composition N°4 où une diminution de l'effort de flexion et une augmentation de la flèche sont observées, donc une diminution de la fragilité de ce béton. Ces résultats peuvent être liés à la structure poreuse de ce béton; donc il est possible qu'il existe des microfissures au voisinage de l'entaille qui augmentent la surface de la zone micro-fissurée.

V.5.2 EVOLUTION DE L'ENERGIE DE FISSURATION EN FONCTION DES TAUX DES FINES CALCAIRES

La figure V.40 montre l'évolution de l'énergie de fissuration en fonction des taux des fines calcaires dans le sable.

Tableau V.9 : Energie de fissuration.

Fines "%" "	0	5	10	15	20	25
G_f "J/m ² "	109.72	105.08	101.54	98.42	98.74	99.99

La figure V.40, montre que l'évolution de l'énergie de fissuration en fonction des taux des fines calcaires est une fonction décroissante. L'énergie de fissuration est influencée négativement par le taux des fines calcaires dans le sable. Ceci peut être expliqué par la taille des granulats de sable qui joue un rôle important dans l'évolution de l'énergie de fissuration.

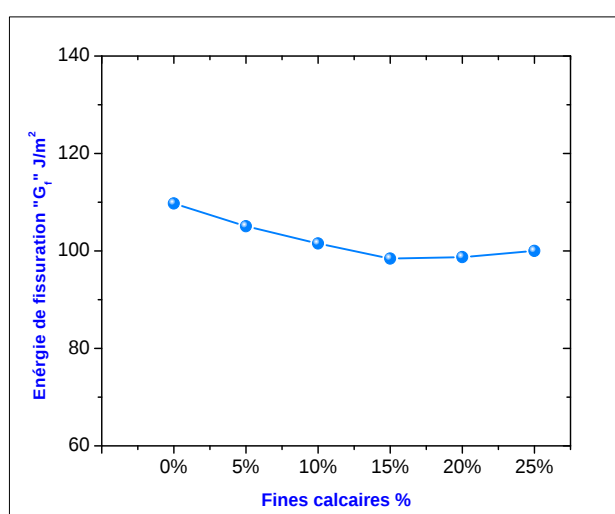


Figure V.40 : Evolution de l'énergie de fissuration en fonction des taux de fines calcaires.

V.5.3. EVOLUTION DU FACTEUR D'INTENSITE DES CONTRAINTES EN FONCTION DES TAUX DES FINES CALCAIRES:

Le facteur d'intensité des contraintes est donné par la relation suivante [15]:

$$K_1^2 = G_f . E . \sqrt{m}$$

Où :

m : mode de rupture.

E: est le module de **YOUNG** donné par la formule empirique suivante selon le règlement BAEL91 :

$$E = 11000 \sqrt{f_{cj}}$$

Les résultats du calcul sont regroupés dans le tableau V.10.

Tableau V.10 : Evolution du facteur d'intensité des contraintes en fonction du taux de fines.

Fines %	0	5	10	15	20	25
G_f "J/m ² "	109.72	105.08	101.54	98.42	98.74	99.99
E "MPa"	41636.34	44096.04	43981.66	42880.95	43797.4	43616.25
K "MPa"	2.137	2.15	2.11	2.054	2.08	2.09

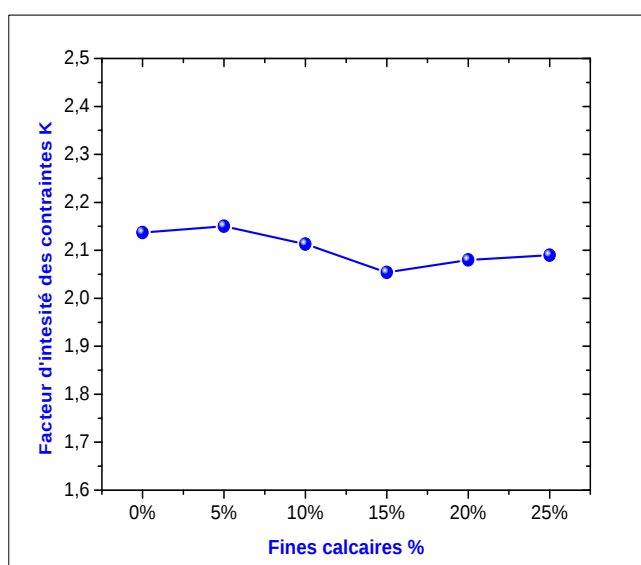


Figure V.41: Evolution du Facteur d'intensité des contraintes en fonction des taux de fines calcaires.

La figure V.41 illustre l'évolution du facteur de l'intensité des contraintes K en fonction des taux des fines. Selon cette courbe, on remarque que le facteur d'intensité des contraintes prend sa valeur maximale lorsque le taux de substitution des fines calcaires dans le sable atteint les 5% (composition N°2).

L'étude expérimentale montre que l'énergie de la rupture diminue avec l'augmentation des pourcentages des fines calcaires dans le sable. Le tableau V.11 et la figure V.42 représentent le taux de variation de l'énergie de la rupture pour les différentes compositions.

$$TVG_f = \frac{G_{fi} - G_{f0}}{G_{f0}}$$

TVG_f : Taux de variation de. L'énergie de la rupture.

G_{f0} : Energie de la rupture de la **composition N°1** (0% des fines calcaires).

G_{fi} : Energie de la rupture de la **composition N°i** (i=2 à 6).

Tableau V.11 : Taux de variation de l'énergie de la rupture.

Fines calcaires %	5	10	15	20	25
Taux de variation du G _f	-4.23%	-7.46%	-10.3%	-10%	-8.87%

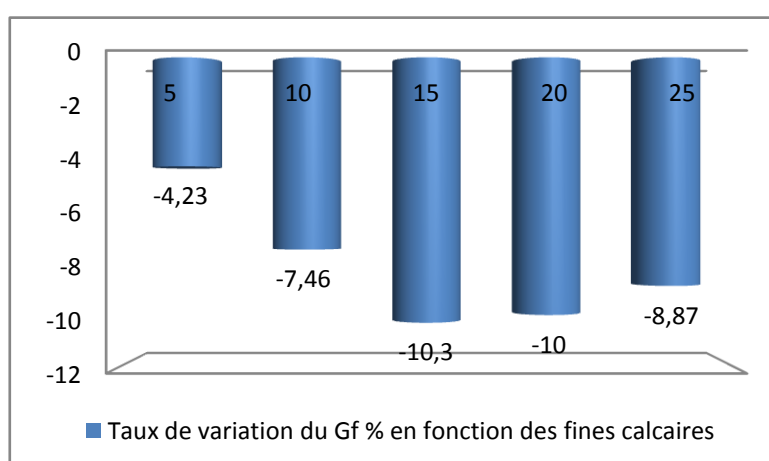


Figure V.42 : Taux de variation de l'énergie de la rupture.

V.6. SYNTHESE DU CHAPITRE :

A l'issue de l'étude des propriétés des bétons à l'état frais et durcis, on peut présenter les conclusions suivantes :

- L'évolution de l'air occlus en fonction du taux de fines calcaires est une fonction décroissante linéaire.
- L'évolution de l'affaissement au cône d'Abrams est une fonction croissante en fonction de l'augmentation des taux de fines calcaires et le dosage en super-plastifiant. Ainsi, le béton étudié présente une fluidité très élevée (varie entre 170- 230 mm), ce qui assure un remplissage parfait des moules avec des surfaces lisses après durcissement.
- Une performance au jeune âge car la résistance à la compression après 24 heures du durcissement atteint **22 MPA** ; ce qui permet d'un décoffrage rapide et un délai de réalisation minimale que ce soit dans le chantier ou dans les usines pour la réalisation des éléments préfabriqués. Après 07 jours de durcissement la résistance mécanique à la compression atteint **53 MPA**, **60 MPA** à 28 jours et **65 MPA** à l'âge de 90 jours de durcissement, ces résistances élevées nous a permis de réduire les sections des éléments porteurs et d'économiser l'acier utilisé pour le ferrailage des éléments en béton.
- L'optimum de la résistance à la compression, la résistance à la flexion, le retrait de séchage et l'énergie de la rupture en fonction des taux de fines et du temps a été observé dans la composition N°2 (5% des fines calcaire).

CHAPITRE VI: DURABILITE DU BETON A BASE DE SABLE FIN EN MILIEU ACIDE

VI.1 INTRODUCTION

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de l'étude de la durabilité du béton vis-à-vis à l'absorption d'eau totale et capillaires. Une caractérisation de la résistance chimique vis-à-vis à l'attaque de l'acide sulfurique H_2SO_4 a été présentée à la fin de ce chapitre. Les éprouvettes prismatiques de dimensions ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) sont démoulées après 24h et conservées à l'air libre. Après 90 jours de durcissement, les éprouvettes sont immergées dans une solution de 4% d'acide sulfurique durant 120 jours ; par la suite les éprouvettes sont nettoyées avec de l'eau et séchées à l'étuve jusqu'à un poids constant.

Les différents points traités dans ce chapitre sont:

- Evolution de l'absorption à l'eau en fonction des taux de fines et du temps.
- Perte relative en masse à l'âge de 120 jours d'immersion dans la solution de 4% d'acide sulfurique.
- Variation dimensionnelles des éprouvettes après immersion dans la solution de 4% d'acide sulfurique
- Résistance à la compression après immersion dans la solution de 4% d'acide sulfurique.
- Résistance à la flexion après immersion dans la solution de 4% d'acide sulfurique.
- Mesure ultrasonique après immersion des éprouvettes dans la solution de 4% d'acide sulfurique.
- Analyse par **D.R.X.**

VI.2 ABSORPTION

VI.2.1 ABSORPTION CAPILLAIRE

Le coefficient de capillarité C_c est déterminé par un essai d'absorption capillaire sur des éprouvettes prismatiques de dimensions ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) âgées de 28 jours et puis séchées à l'étuve à une température $T=80 \text{ C}^0$ jusqu'à un poids constant (voir chapitre II).

Les résultats de cet essai sont regroupés dans le tableau VI.1 Les figures VI.1 à VI.6 illustrent les courbes donnant l'augmentation de la masse par unité de surface " g/mm^2 " en fonction de la racine carrée du temps. En observant ces figures, on constate que l'évolution de **100.M/S** en fonction de la racine carrée du temps est une fonction linéaire.

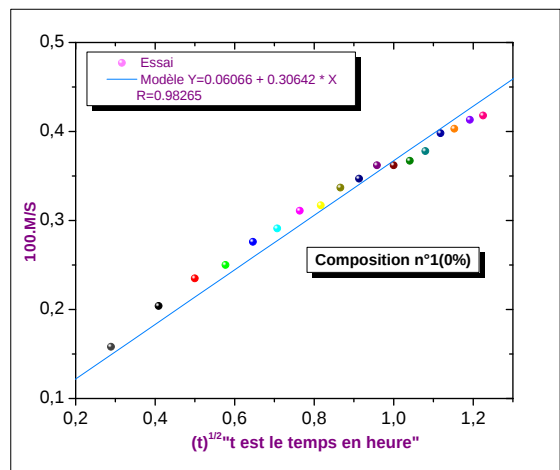


Figure VI.1: Evolution du taux d'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps (Composition N°1).

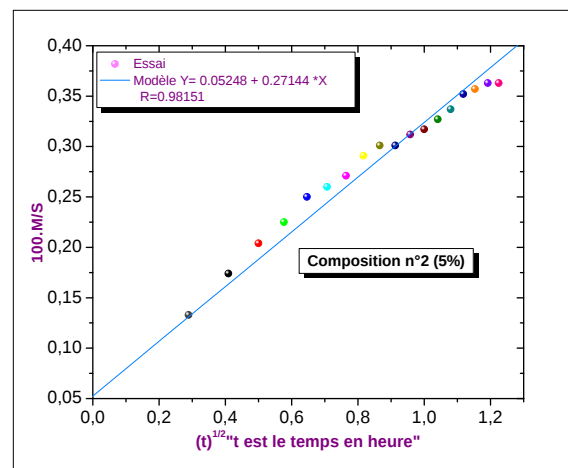


Figure VI.2: Evolution du taux d'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps (Composition N°2).

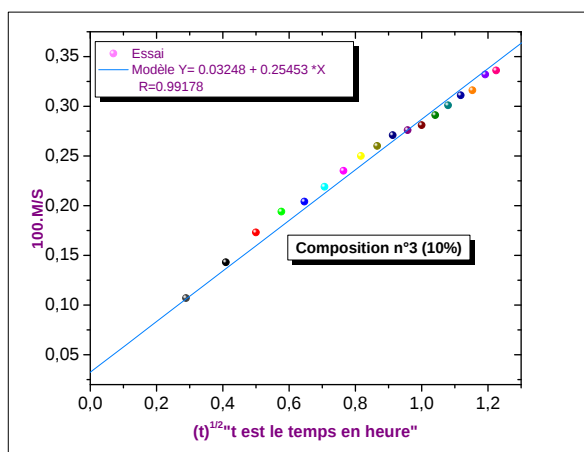


Figure VI.3 : Evolution du taux d'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps (Composition N°3).

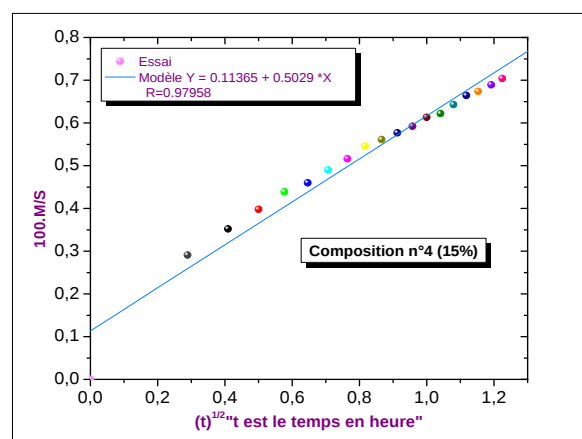


Figure VI.4: Evolution du taux d'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps (Composition N°4).

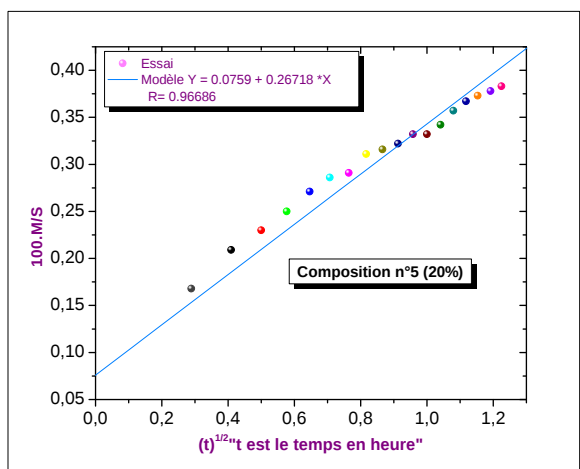
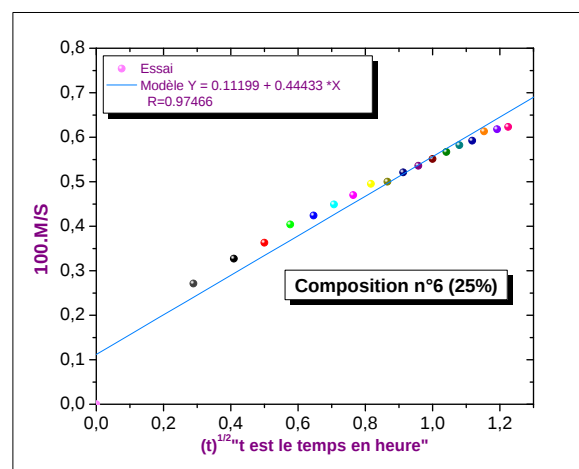


Figure VI.5: Evolution du taux d'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps (Composition N°5).



fonction de la racine carrée du temps (Composition N°6).

Composition N°01 : 0% des fines calcaires																			
Temps en minute	0	05	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
100.M/S moyenne	0	0.158	0.204	0.235	0.250	0.276	0.291	0.311	0.317	0.337	0.347	0.362	0.362	0.367	0.378	0.398	0.403	0.413	0.418
Composition N°02 : 0.5% des fines calcaires																			
Temps en minute	0	05	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
100.M/S moyenne	0	0.133	0.174	0.204	0.225	0.250	0.260	0.271	0.291	0.301	0.301	0.312	0.317	0.327	0.337	0.352	0.357	0.363	0.363
Composition N°03 : 1.0% des fines calcaires																			
Temps en minute	0	05	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
100.M/S moyenne	0	0.107	0.143	0.173	0.194	0.204	0.219	0.235	0.250	0.260	0.271	0.276	0.281	0.291	0.301	0.311	0.316	0.332	0.336
Composition N°04 : 1.5% des fines calcaires																			
Temps en minute	0	05	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
100.M/S moyenne	0	0.291	0.352	0.398	0.439	0.460	0.490	0.516	0.546	0.561	0.577	0.592	0.613	0.622	0.643	0.664	0.674	0.689	0.704
Composition N°05 : 2.0% des fines calcaires																			
Temps en minute	0	05	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
100.M/S moyenne	0	0.168	0.209	0.230	0.250	0.271	0.286	0.291	0.311	0.316	0.322	0.332	0.332	0.342	0.357	0.367	0.373	0.378	0.383
Composition N°06 : 2.5% des fines calcaires																			
Temps en minute	0	05	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
100.M/S moyenne	0	0.271	0.327	0.363	0.404	0.424	0.449	0.470	0.495	0.500	0.521	0.536	0.551	0.567	0.582	0.592	0.613	0.618	0.623

Tableau VI.1 : Augmentation de la masse par unité de surface " g/mm^2 " en fonction du temps.

Le tableau VI.2 et la figure VI.7 montrent la variation du coefficient de capillarité en fonction des taux de fines calcaires dans le sable.

Tableau VI.2: Valeurs moyennes du coefficient de capillarité C_c .

Fines calcaires	0%	5%	10%	15%	20%	25%
$C_c = \frac{100.M}{S.\sqrt{t}}$	0.306	0.271	0.254	0.503	0.267	0.444

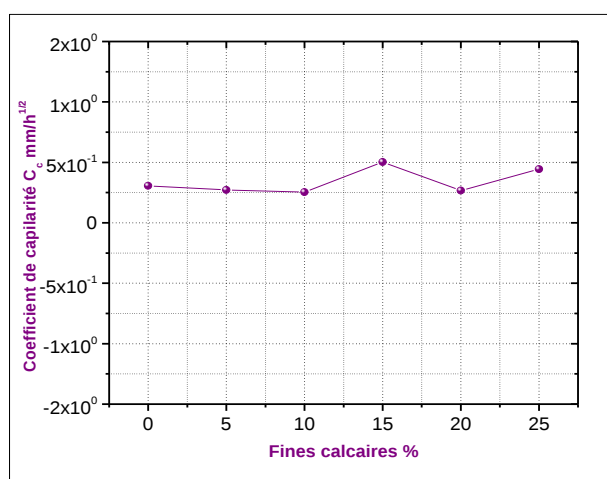


Figure VI.7 : Evolution du coefficient de capillarité C_c en fonction des taux de fines calcaires.

Les résultats montrent que le coefficient de capillarité de la **composition N°3** est le plus faible "comparativement aux autres compositions" ce qui représente une faible aptitude au transfert et une capacité de stockage d'eau au sein du béton.

Une augmentation du coefficient de capillarité est observée pour la **composition N°4** sa valeur atteint **0.503 mm/h^{1/2}** qui représente la facilité de transfert d'eau, ainsi une capacité de stockage élevée dans le volume des pores du béton.

Le coefficient de l'absorption capillaire minimal est remarqué dans la **composition N°3** (10% des fines calcaires) où le taux de variation du coefficient de capillarité par rapport à la composition de référence (0% des fines calcaires) est atteint le -16.93%. La valeur maximale est obtenue dans la **composition N°4** (15% des fines calcaires) car le taux de l'augmentation du coefficient de capillarité est de l'ordre de +64.12% ce qui montre la facilité de transfère d'eau dans le matériau. (Voir tableau VI.3 et figure VI.8).

$$TV_{C_C} = \frac{C_{C_i} - C_{C_0}}{C_{C_0}}$$

TV_{C_C} : Taux de variation du coefficient de capillarité C_C .

C_{C_0} : Coefficient de capillarité de la **composition N°1** (0% des fines calcaires),

C_{C_i} : Coefficient de capillarité de la **composition N°i** (i=2 à 6).

Tableau VI.3: Taux de variation du coefficient de capillarité C_C .

Fines calcaires %	5	10	15	20	25
Taux de variation de C_C	-11.42%	-16.93%	+64.12%	-12.81%	+45.01%

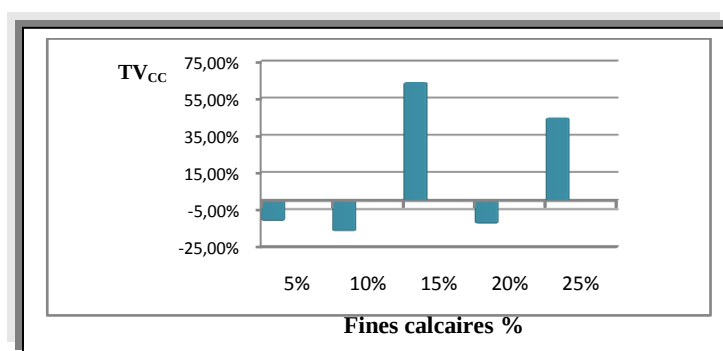


Figure VI.8: Taux de variation du coefficient de capillarité

VI.2.2 ABSORPTION TOTALE

VI.2.2.1 EVOLUTION DE L'ABSORPTION TOTALE EN FONCTION DU TEMPS

Les résultats de mesure sont résumés dans le tableau VI.4 et les figures VI.9 à VI.15.

Tableau VI.4: Evolution de l'absorption totale en fonction du temps

Pourcentage des fines %	0	5	10	15	20	25
Absorption après 30 minutes	2.254 ±0.42	2.041 ±0.042	2.31 ±0.036	3.3 ±0.042	2.17 ±0.129	3.15 ±0.290
Absorption après 1h	4.029 ±0.416	2.35 ±0.064	2.57 ±0.042	3.83 ±0.078	2.5 ±0.170	3.48 ±0.340
Absorption après 24h	4.36 ±0.411	3.99 ±0.153	3.82 ±0.031	5.51 ±0.157	3.95 ±0.320	5.17 ±0.110
Absorption après 72h	4.44 ±0.410	4.039 ±0.044	3.94 ±0.041	5.6 ±0.072	4.07 ±0.370	5.28 ±0.220
Absorption après 7 jours	4.48 ±0.420	4.14 ±0.046	4.002 ±0.039	5.65 ±0.064	4.1 ±0.350	5.35 ±0.250

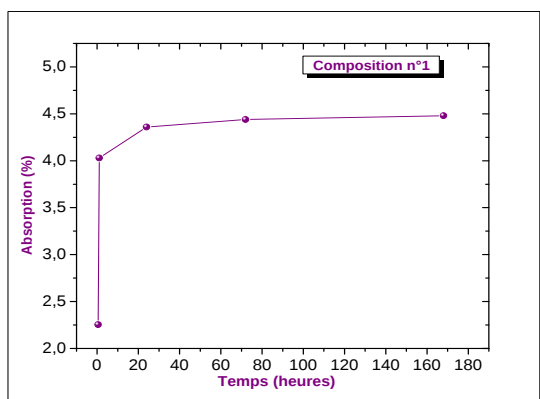


Figure VI.9: Evolution de l'absorption totale en fonction du temps (composition N°1).

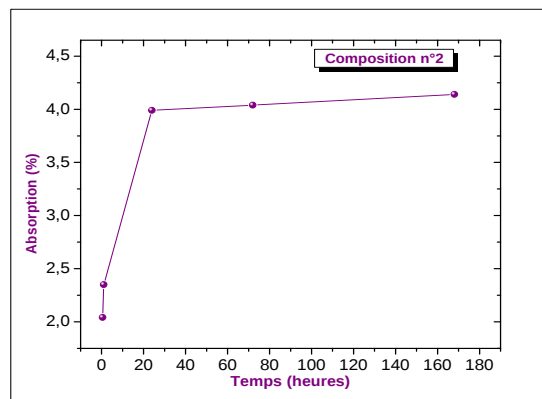


Figure VI.10: Evolution de l'absorption totale en fonction du temps (composition N°2).

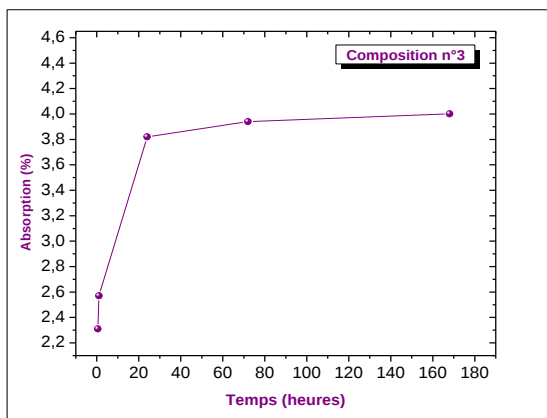


Figure VI.11 : Evolution de l'absorption totale en fonction du temps (composition N°3).

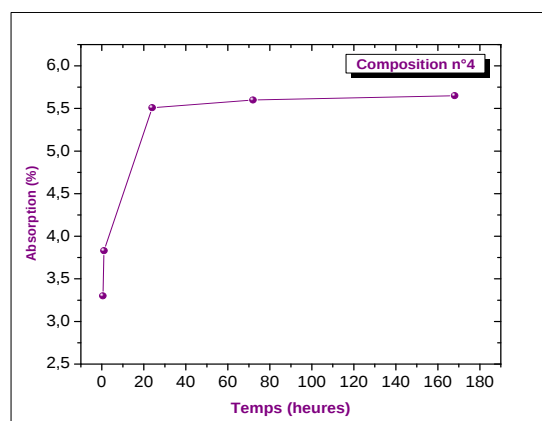


Figure VI.12: Evolution de l'absorption totale en fonction du temps (composition N°4).

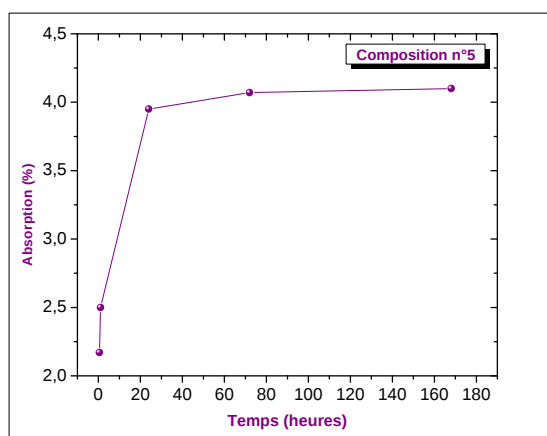


Figure VI.13 : Evolution de l'absorption totale en fonction du temps (composition N°5).

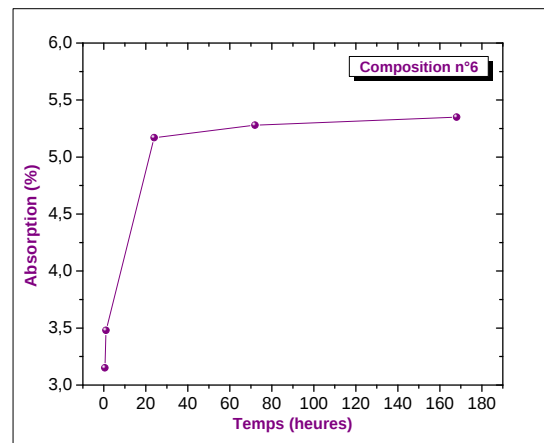


Figure VI.14 : Evolution de l'absorption totale en fonction du temps (composition N°6).

Les courbes d'évolution de l'absorption totale en fonction du temps présentent la même allure quel que soit le pourcentage des fines calcaires dans le sable.

VI.2.2.2 EVOLUTION DE L'ABSORPTION TOTALE EN FONCTION DES TAUX DES FINES CALCAIRES

Généralement l'absorption totale de toutes les compositions du béton est remarquable, sa valeur maximale ne dépasse pas les 5.65% voir le tableau VI.4 et la figure VI.15.

Comme dans le cas de l'absorption capillaire, l'absorption totale minimale est observée dans la **composition N°3** (10% des fines calcaires dans le sable). Les courbes d'évolution de l'absorption totale en fonction des taux de fines calcaires montrent que la vitesse d'infiltration de l'eau dans le béton est très rapide pour la **composition N°1** car elle atteint après 1 heure d'immersion dans l'eau 90% de l'absorption totale mesuré après 7 jours.

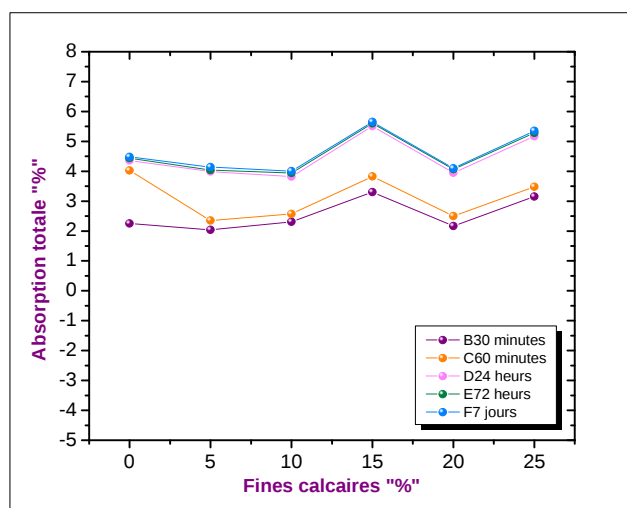


Figure VI.15 : Evolution l'absorption totale en fonction des taux de fines calcaires.

Comme dans le cas de l'absorption capillaire, le taux de diminution optimal de l'absorption totale est observé dans la **composition N°3** ou le taux de diminution atteint -10.67%. Ainsi une valeur d'absorption maximale a été remarquée dans la **composition N°4** ou à 7 jours d'immersion dans l'eau, le taux de variation de l'absorption totale égal $TV_{Abs} = +26.12\%$ (voir

figure VI.16).

$$TV_{Abs} = \frac{Abs_i - Abs_0}{Abs_0}$$

TV_{Abs} : Taux de variation de l'absorption totale.

Abs_0 : Absorption totale la **composition N°1** (0% des fines calcaires).), $j=30\text{min}$, 1 h, 24h, 72h et 7j.

Abs_i : Absorption totale de la **composition N°i** ($i=2$ à 6), $j=30\text{min}$, 1 h, 24h, 72h et 7j.

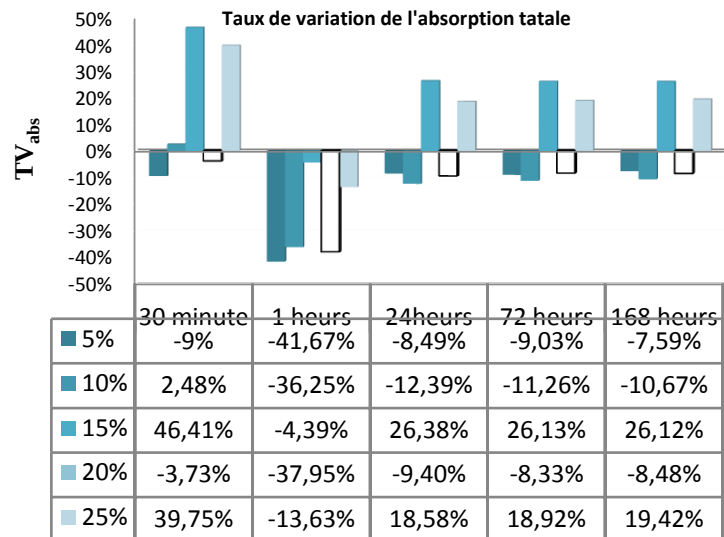


Figure VI.16 : Taux de variation de l'absorption totale.

VI.3.DURABILITE DU BETON AUX ATTAQUES PAR L'ACIDE SULFURIQUE

VI.3.1. ASPECT DES EPROUVETTES DU BETON APRES 120 JOURS D'IMMERSION DANS UNE SOLUTION DE 4% H_2SO_4

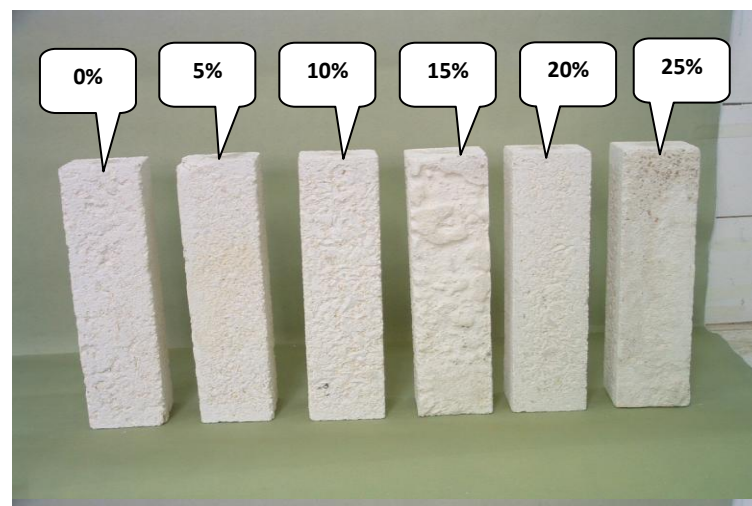
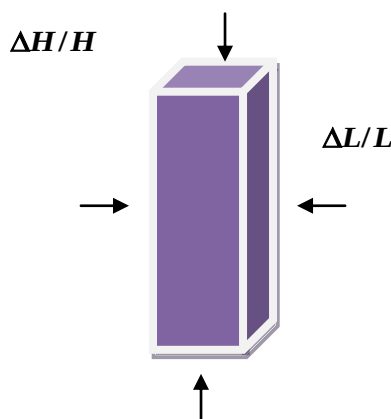


Figure VI.17 : L'état des éprouvettes après immersion de 120 jours dans une solution de 4% H_2SO_4 .

Les éprouvettes du béton attaqué par l'acide sulfurique sont caractérisées par un aspect blanchâtre avec une dégradation de la surface extérieure du béton. Le degré de dégradation est presque identique pour toutes les éprouvettes sauf celles qui contiennent 15% des fines (**composition N° 4**) où la dégradation est peu sévère comparativement aux autres éprouvettes (voir figure VI.17). L'aspect visuel interne du béton n'est pas affecté par l'acide sulfurique ceci due à la porosité faible du béton qui minimise la pénétration de l'acide sulfurique au sein du matériau.

VI.3.2. VARIATION DES DIMENSIONS DES EPROUVETTES

Les tableaux VI.5, VI.6 et la figure VI.18 représentent les déformations longitudinales et transversales des éprouvettes après 120 jours d'immersion dans la solution 4% H_2SO_4 . Les dimensions sont mesurées après séchage à l'aide d'un pied à coulisse.



VI.3.2.1. VARIATION DES DIMENSIONS LONGITUDINALES DES EPROUVETTES

Tableau VI.5 : Variation des dimensions longitudinales des éprouvettes (H=28.3cm).

FINES %	0%	5%	10%	15%	20%	25%
$\Delta H/H$	4.29%	4.065%	4.01%	4.045%	3.86%	3.9%

VI.3.2.2. VARIATION DES DIMENSIONS TRANSVERSALES DES EPROUVETTES

Tableau VI.6 : Variation des dimensions transversales des éprouvettes (L=7cm).

FINES%	0%	5%	10%	15%	20%	25%
$\Delta L/L$	14.86%	16.86%	17.13%	17.56%	17.76%	17%

Les résultats montrent que le taux de diminution des dimensions longitudinales et transversales est identique car il atteint les 4% dans le sens longitudinal et 17% dans le sens transversal.

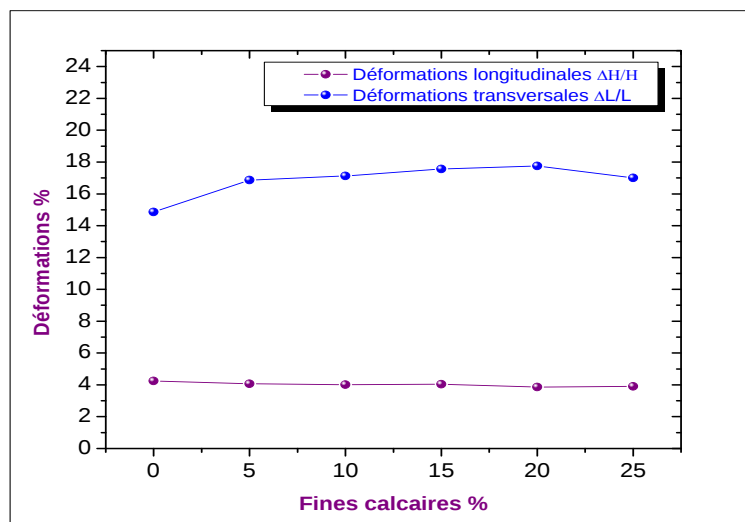


Figure VI.18 : Variation des dimensions longitudinales et transversales des éprouvettes à l'âge de 120 jours.

VI.3.3. PERTE RELATIVE EN MASSE

Les valeurs de la perte relative en masse sont regroupées dans le tableau VI.7 suivant :

Tableau VI.7 : Perte relative de masse.

FINES %	0%	5%	10%	15%	20%	25%
PERTE RELATIVE EN MASSE% $\Delta M / M$	3.93	3.83	3.93	6.35	2.34	2.85

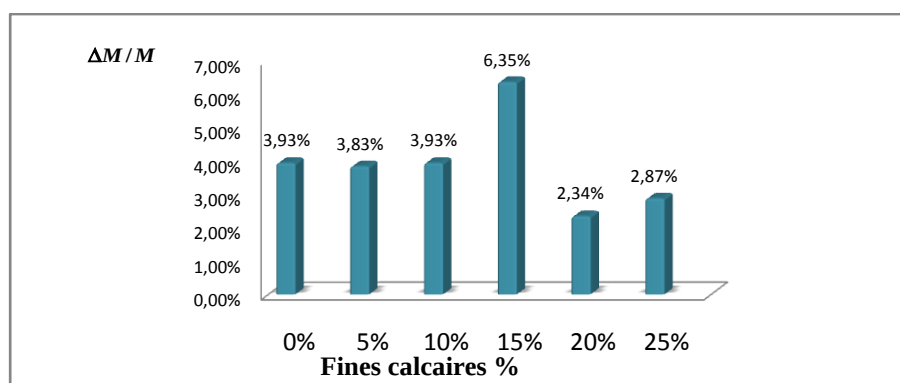


Figure VI.19 : pertes relatives de poids des éprouvettes à l'âge de 120 jours.

La figure VI.19, montre la variation de la perte relative en masse des éprouvettes en béton. La valeur minimale est observée pour la **composition N° 5** sa valeur atteint les **2.34%**.

Pour les autres compositions les pertes sont identiques. La valeur maximale de la perte est remarquée pour la **composition N° 4**.

VI.3.4. RESISTANCE MECANIQUE

VI.3.4.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION

Le tableau de la figure VI.20 résume les valeurs de la résistance à la compression des éprouvettes après 120j d'immersion dans une solution de $4\%H_2SO_4$ et les valeurs de la résistance en compression mesurées après 90 j de durcissement à l'air libre.

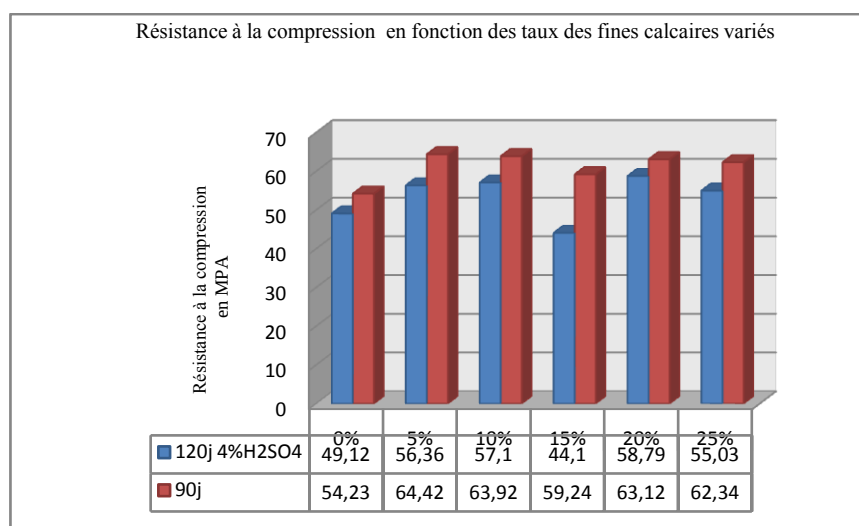


Figure VI.20 Résistance à la compression en fonction des taux de fines.

VI.3.4.2. RESISTANCE A LA FLEXION

Les valeurs de la résistance mécanique à la flexion sont résumées dans le tableau de la figure VI.21.

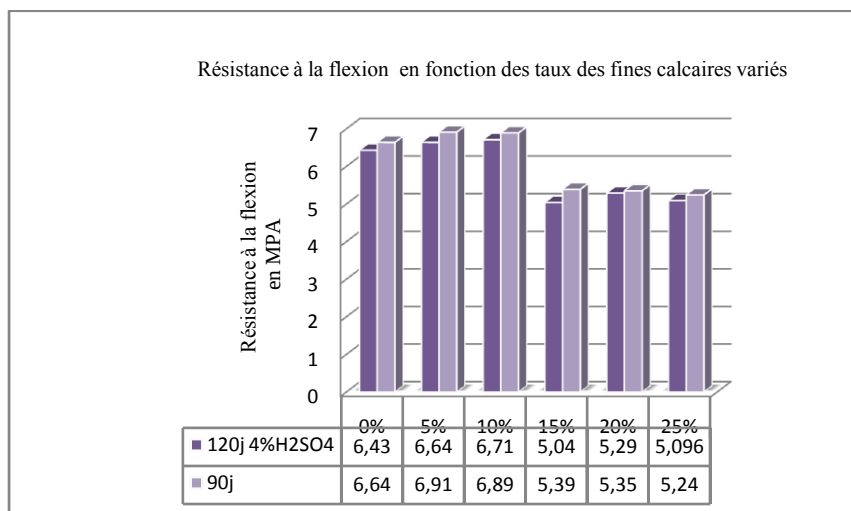


Figure VI.21 : Résistance à la flexion en fonction des taux des fines.

Une diminution de la résistance mécanique (compression et flexion) est observée pour toutes les compositions de bétons. Le taux de diminution maximal est observé pour la **composition N° 4** (15% des fines calcaires) ceci peut être expliqué que la résistance chimique du béton aux attaques des acides dépend aussi de la porosité du matériau.

Le taux de diminution est résumé dans les tableaux VI.8 VI.9 et les histogrammes VI.22, VI.23

Tableau VI.8 : Taux de diminution de la résistance à la compression.

Fines %	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Taux de variation de la résistance à la compression MPA	-9.43%	-12.51%	-10.67%	-25.56%	-6.86%	-11.73%

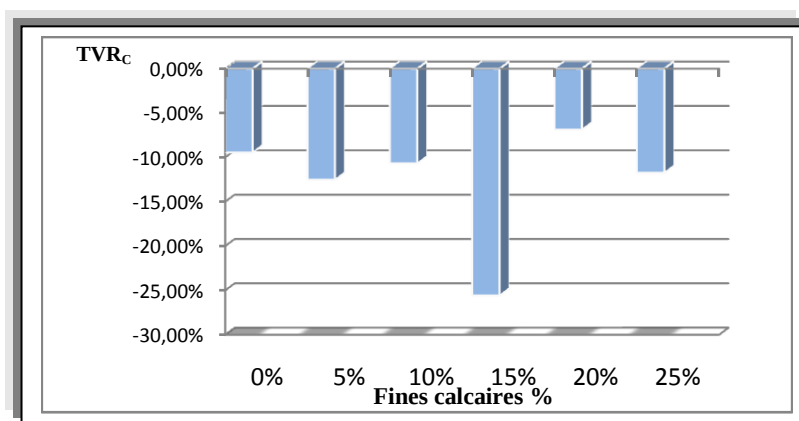
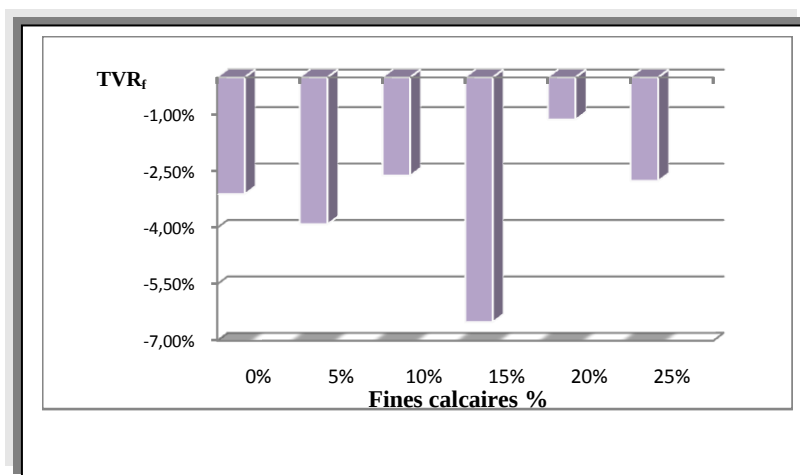


Figure VI.22 : Taux de diminution de la résistance à la compression.

Tableau VI. 9: Taux de diminution de la résistance à la flexion.

Fines %	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Taux de variation de la résistance à la flexion MPA	-3.1%	-3.9%	-2.61%	-6.5%	-1.12%	-2.75

**Figure VI.23 :** Taux de diminution de la résistance à la flexion.

VI.3.5. MESURE ULTRASONIQUE

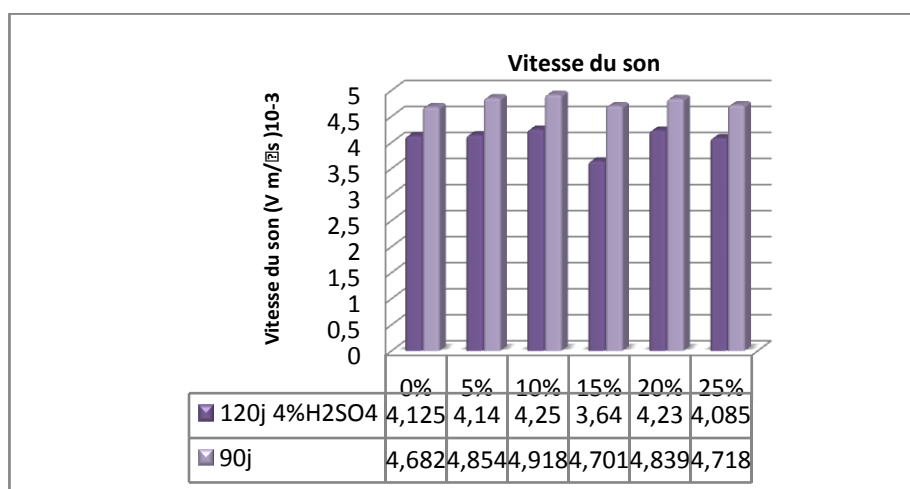
● VITESSE DU SON

Les valeurs de la vitesse du son obtenues pour les différentes compositions du béton sont résumées dans le tableau VI.10. La figure VI.24 montre l'évolution de la vitesse du son en fonction des pourcentages de fines calcaires.

D'après le tableau VI.10 et la figure VI.24, on constate que la vitesse du son diminue par rapport à la vitesse mesurée avant l'immersion des éprouvettes dans la solution de $4\% \text{H}_2\text{SO}_4$, et par conséquent l'augmentation de la porosité du béton. Cette augmentation résulte de la présence du **Gypse** (sulfate de calcium) et de la **Thaumasite** qui sont cristallisés dans les pores du béton.

Tableau VI.10: Valeurs de la vitesse du son.

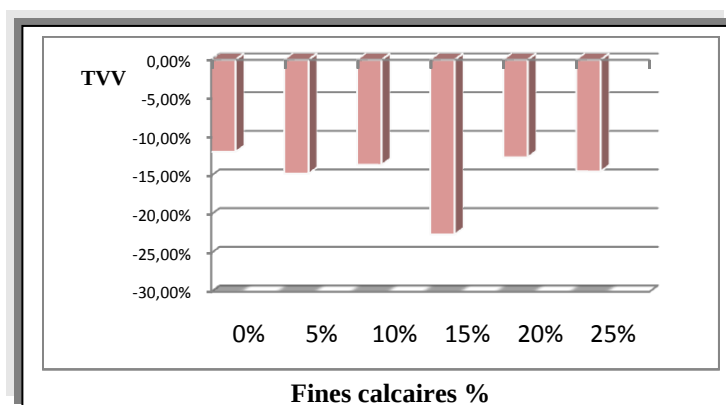
Les éprouvettes après immersion de 120 jours dans une solution de 4% H ₂ SO ₄ .						
Fines %	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Vitesse du son (V m/μs) 10 ⁻³	4.125	4.14	4.25	3.64	4.23	4.085
Les éprouvettes après 90 jours de durcissement.						
Vitesse du son (V m/μs) 10 ⁻³	4.682	4.854	4.918	4.701	4.839	4.718

**Figure VI.24 :** vitesse du son.

Le tableau VI.11 et la figure VI.25 représentent le taux de diminution de la vitesse du son pour les différentes compositions du béton.

Tableau VI.11 : Taux de diminution de la vitesse du son.

Fines %	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Taux de la variation de la vitesse du son TVV	-11.90%	-14.71%	-13.58%	-22.57%	-12.59%	-14.42%

**Figure VI.25 :** Taux de diminution de la vitesse du son.

VI.3.6. ANALYSE PAR D.R.X : L'analyse par D.R.X (voir figures VI.26 à VI.31) montre la cristallisation du **sulfate de calcium** (gypse) $2\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ et la **Thaumasite** $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_2(\text{SO}_4)(\text{CO}_3) \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ dans toutes les compositions du béton.

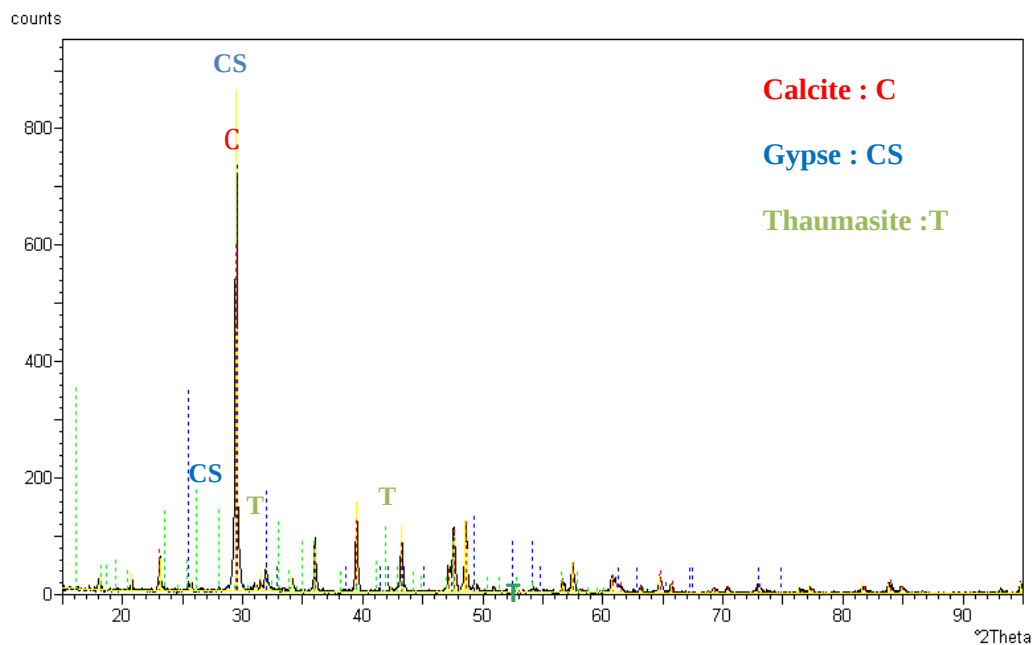


Figure VI.26 : Diffractogramme des rayons X « composition N°1 ».

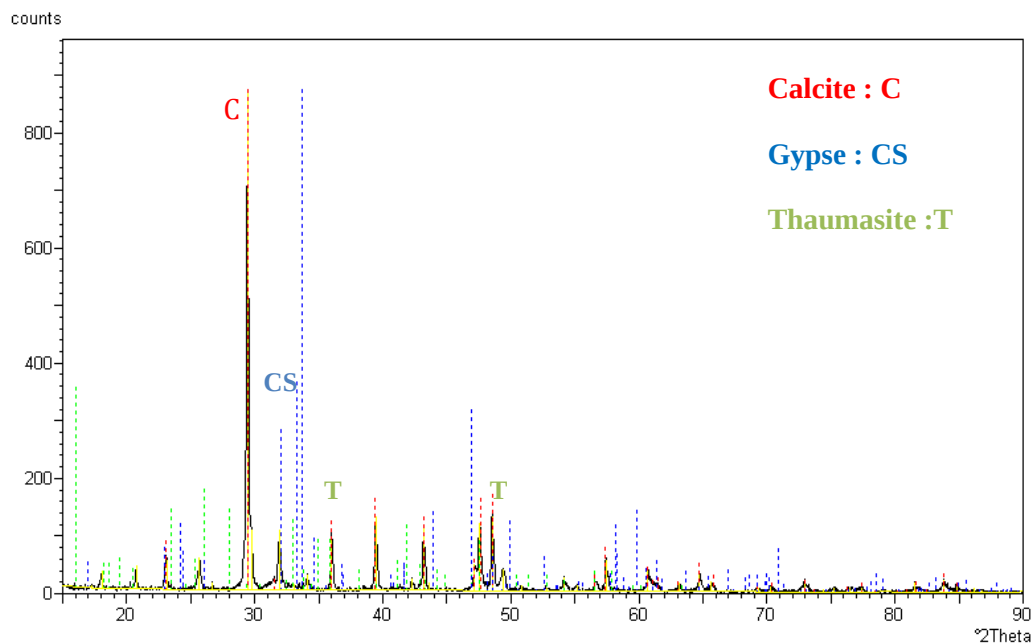


Figure VI.27 : Diffractogramme des rayons X « composition N°2 ».

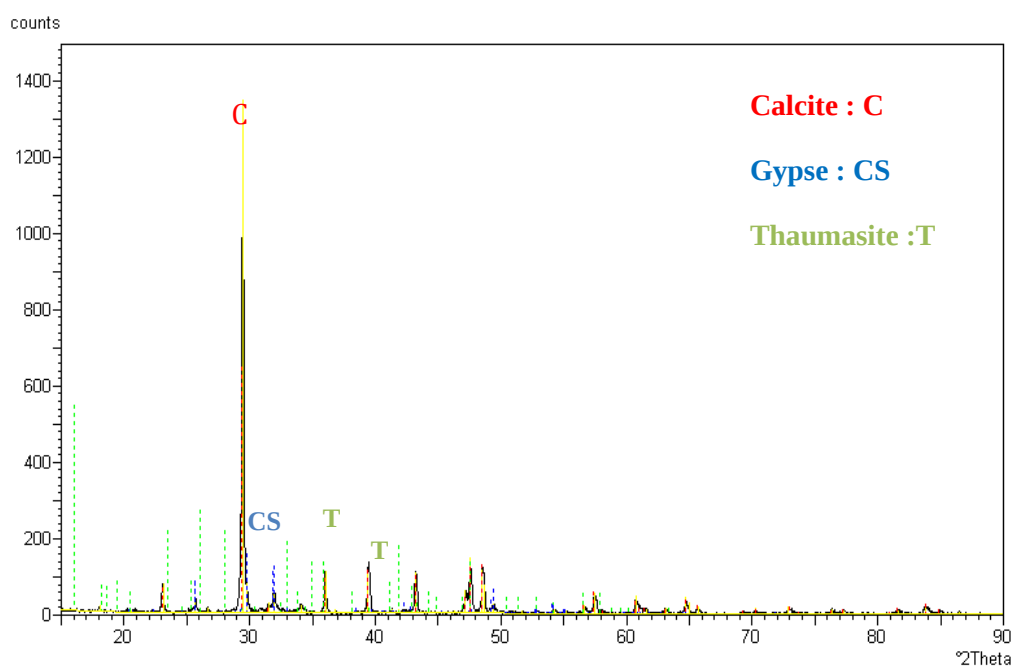


Figure VI.28 : Diffractogramme des rayons X « composition N°3 ».

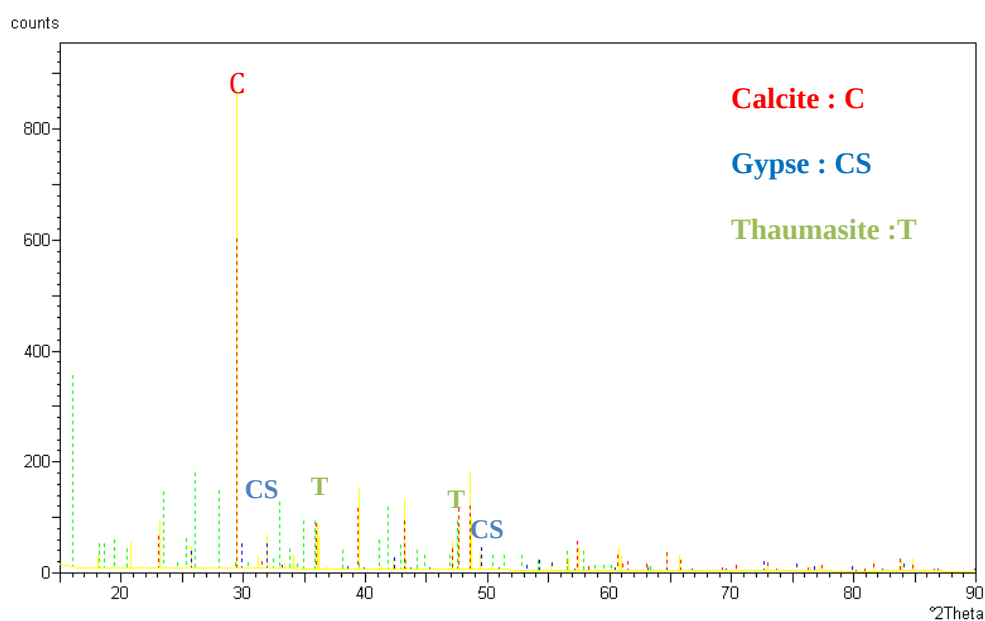


Figure VI.29 : Diffractogramme des rayons X « composition N°4 ».

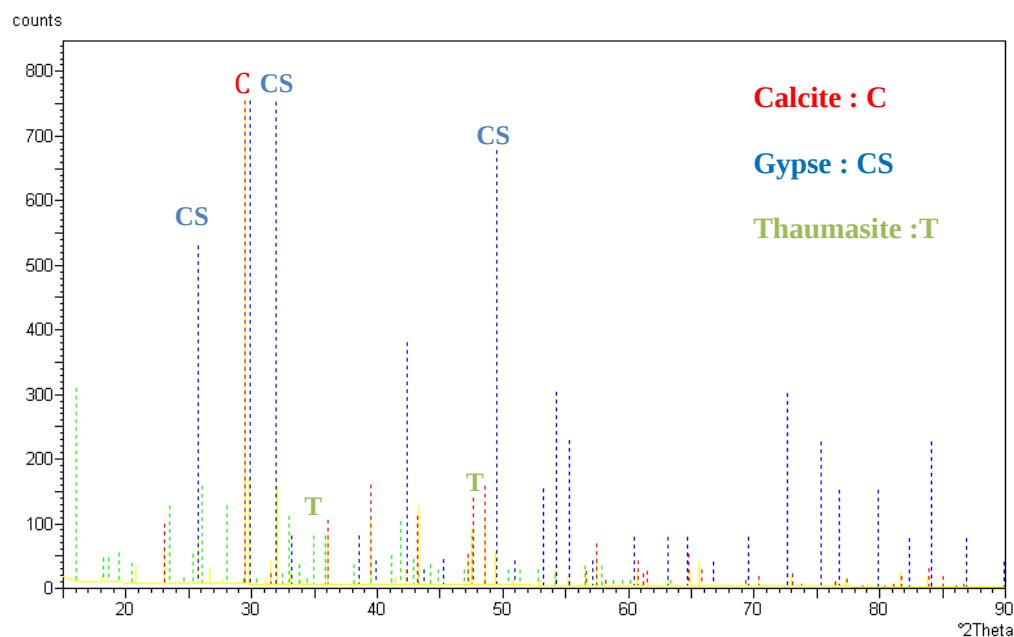


Figure VI.30 : Diffractogramme des rayons X « composition N°5 ».

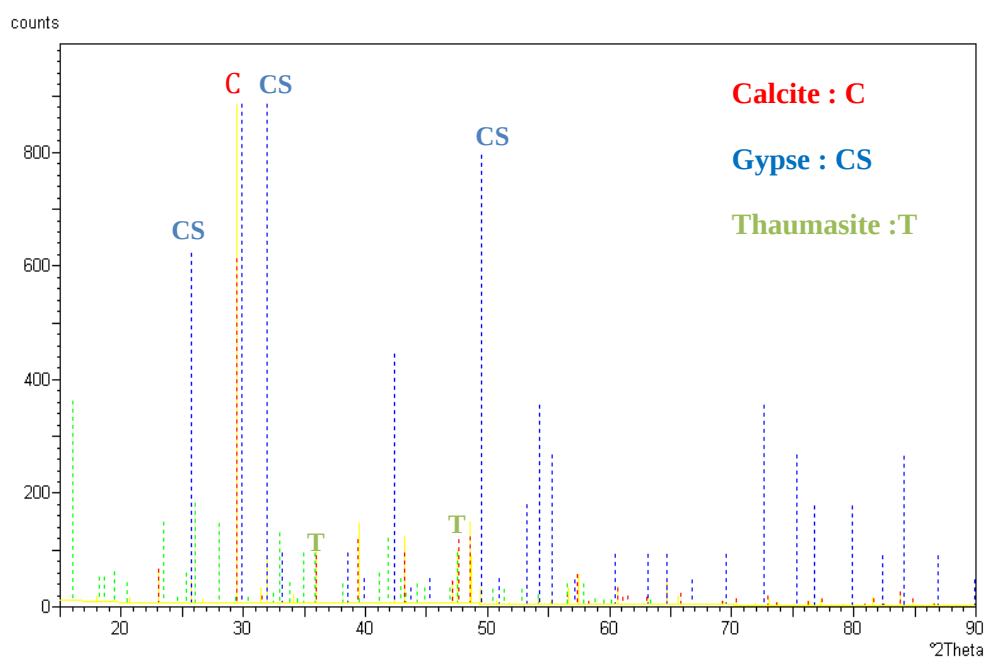
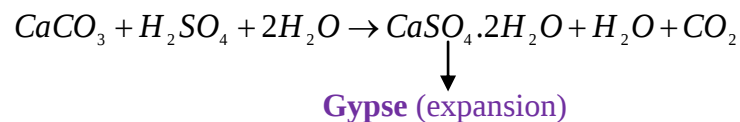


Figure VI.31 : Diffractogramme des rayons X « composition N°6 ».

VI.3.7. INTERPRETATION DES RESULTATS

VI.3.7.1. FORMATION DU GYPSE

L'acide sulfurique réagit avec la calcite pour former le gypse. L'équation suivante montre la formation du gypse à la présence de la calcite CaCO_3 et l'acide sulfurique :



La précipitation du gypse dans les pores du béton provoque un gonflement et par conséquent des fissurations au sein du béton. La photo suivante montre la cristallisation du gypse dans le béton de 100 ans [21].

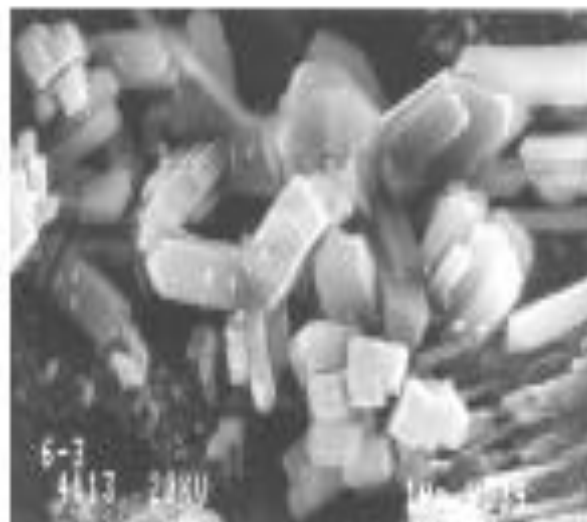
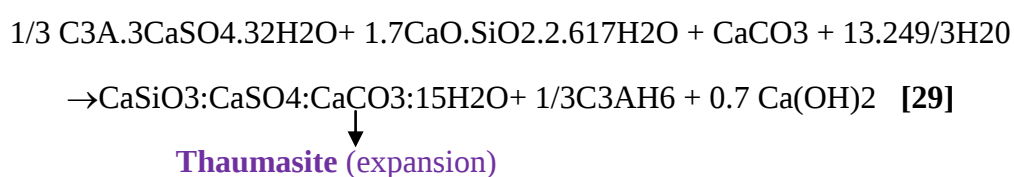


Figure VI.32 : Cristaux de gypse dans un béton de 100 ans [21]

VI.3.7.2. FORMATION DE LA THAUMASITE

A la présence de l'humidité, la **Thaumasite** $\text{Ca}_3 \text{Si} (\text{OH})_6 \text{CO}_3 \text{SO}_4 12\text{H}_2\text{O}$ peut se former par réaction entre le Gypse $\text{Ca SO}_4 2\text{H}_2\text{O}$ et de la Calcite Ca CO_3 et du Quartz Si O_2 composants de la chaux hydraulique.



La **Thaumasite** présente un caractère expansif qui va provoquer des fissurations dans le béton.

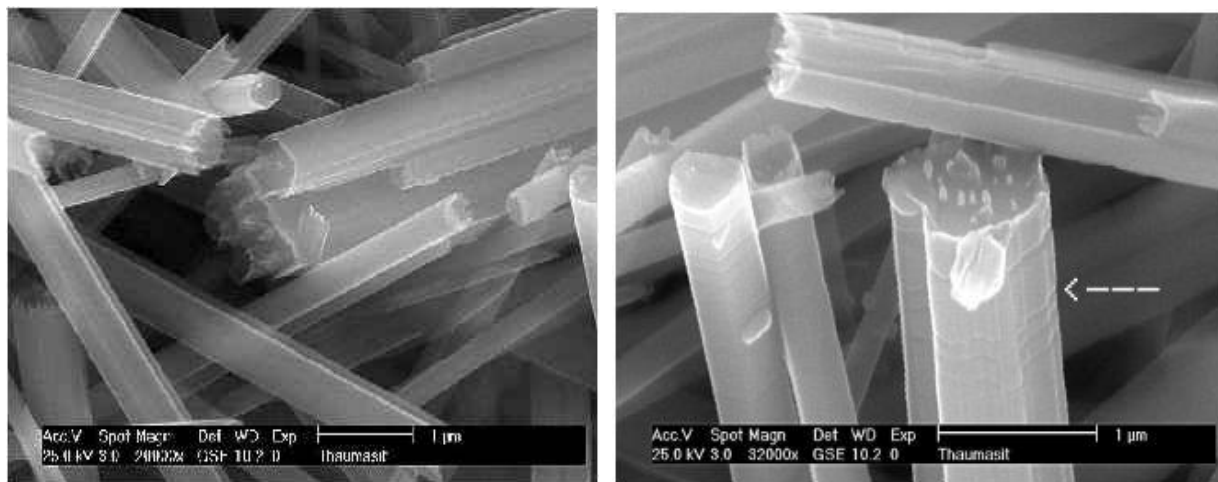


Figure VI.33 : Cristaux de la Thaumasite dans un béton.

VI.4. SYNTHESE DU CHAPITRE

De cette étude de la durabilité du béton, nous pouvons dégager les principales conclusions suivantes :

1. ABSORPTION :

- L'absorption totale et capillaire minimales sont remarqués dans la **composition N°3** (10% des fines calcaires), ce qui représente une faible aptitude au transfert et une capacité de stockage d'eau au sein de ce béton.

2. DURABILITE DU BETON VIS-A-VIS DE L'ACIDE SULFURIQUE :

- Durant 120 jours d'immersion des éprouvettes en béton dans une solution de 4% de l'acide H_2SO_4 , aucune dégradation n'a été observée à l'intérieur des éprouvettes. La dégradation apparaît uniquement à la surface, l'épaisseur de pénétration observée et de l'ordre de 1 mm. Cette résistance à la pénétration due à la structure dense des pores du béton qui bloque le passage des agents agressifs.

- La perte relative de la masse des bétons est maximale pour la **composition N° 4** (15% des fines calcaires).
- La variation des dimensions longitudinales et transversales est identique pour toutes les compositions du béton.
- Une diminution de la résistance à la compression et à la flexion est remarquée pour toutes les compositions du béton et considérablement dans la **composition N° 4** (15% des fines calcaires).
- Des essais non destructifs ont été réalisés sur les éprouvettes afin de vérifier la compacité du béton, la vitesse du son est observée maximale dans la **composition N° 2** (5% des fines calcaires) ce qui montre une meilleure compacité pour de ce béton.
- L'analyse par D.R.X montre la cristallisation du **sulfate de calcium** (gypse) $2\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ et la **Thaumasite** $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_2(\text{SO}_4)(\text{CO}_3) \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ dans toutes les compositions du béton.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Conclusion et recommandations

Les principales conclusions qu'on peut tirer de cette recherche sont les suivantes : **Etude bibliographique** : L'étude bibliographique a montré que les travaux effectués sur l'effet des fines calcaires sur les propriétés physico-mécaniques du béton montrent certaine divergence dans les résultats selon les auteurs. Certains auteurs, ont montré que l'amélioration des propriétés physico-mécaniques du béton sont maximales pour des taux de substitution de l'ordre de 7-10% de fines calcaires par rapport au poids du sable. Ainsi l'imperméabilité de béton à l'eau augmente avec l'augmentation des fines calcaires dans le sable. D'autre part, la résistance mécanique du béton (résistance à la compression et à la flexion) pour deux types de squelettes granulaires (continu et discontinu) est optimale avec un taux de substitution des fines calcaires de l'ordre de 18% et que l'amplitude du retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage de fines calcaires dans le sable. Dans cette même étude bibliographique, nous avons constaté que l'acide réagit avec les produits de l'hydratation tel que la portlandite Ca(OH)_2 pour former un nouveau composé qui peut être soluble ou non soluble. En outre, les acides peuvent réagir avec la calcite CaCO_3 présente dans les granulats de concassage. Certains types d'acides proviennent de l'industrie tel que l'acide Lactique et l'acide Formique ou produits par transformation du soufre par les bactéries, ce type d'acide est appelé acide sulfurique H_2SO_4 . Cette transformation se manifeste dans le béton ou dans une conduite d'évacuation des eaux usées. La réaction de l'acide sulfurique avec la calcite donne le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (produit expansif) appelé aussi sulfate de calcium. Les bétons à base de ciment alumineux résistent bien aux eaux usées chargées d'acide sulfurique.

Etude expérimentale : L'étude expérimentale nous a permis de tirer les principales conclusions suivantes :

- Le sable de calcaire de la région de Laghouat peut être utilisé pour fabriquer un béton à haute performance, sa résistance mécanique à la compression atteint **53 MPA** à l'âge de 7 jours, **60 MPA** à 28 jours de durcissement, ce qui permet de réduire les sections du béton et donc la diminution du poids propre de la structure avec une diminution des déformations, et par conséquent l'augmentation des portées. Ces hautes résistances nous ont permis de réaliser des structures soumises à des charges importantes tel que les bâtiments de grandes hauteurs, des Tours, des tunnels, des enceintes nucléaires et des ouvrages d'arts (ponts, ...)
- Au jeune âge (après 24 heures du durcissement) la résistance à la compression atteint **22 MPA**, cette propriété permet de réduire le temps de coffrage et de minimiser le délai de réalisation.
- A l'état frais les six compositions de bétons étudiées présentent une fluidité très élevée (supérieure à 170 mm). Cette propriété facilite la mise en œuvre en particulier dans les zones où la densité des armatures est très élevée sans l'apparition du phénomène de la ségrégation.
- La teneur en air occlus dans le béton frais diminue avec l'augmentation des fines calcaires dans le sable.
- L'étude du système **Ciment-Fines-Super-plastifiant** nous a montré que la dose de saturation augmente avec l'augmentation du pourcentage des fines calcaires dans le sable. Ainsi, la maniabilité du béton super-plastifié est améliorée avec l'augmentation des fines calcaires.
- La présence des fines calcaires dans le sable calcaire de la région de Laghouat joue un rôle bénéfique sur les propriétés physico-mécaniques du béton ; le taux d'amélioration optimal de la résistance mécanique à la compression et à la flexion est obtenu pour un pourcentage de substitution de fines de l'ordre de **5 à 10%**.
- L'amplitude maximale du retrait par séchage est observée dans la **Composition N°2** (5% des fines calcaires).
- L'énergie de la rupture diminue avec l'augmentation des pourcentages de fines calcaires dans le sable. Ceci peut être expliqué par la taille des granulats du sable qui joue un rôle important dans l'évolution de l'énergie de fissuration.

- Il a été montré que le coefficient d'absorption capillaire atteint sa valeur minimale pour la **Composition N°3 (10%** des fines calcaires) ce qui représente une faible aptitude au transfert et une capacité de stockage d'eau au sein de ce béton.
- La résistance chimique du béton aux attaques par l'acide sulfurique est déterminée par la mesure de la perte relative en masse des éprouvettes en béton. Selon les résultats obtenus, nous avons constaté que la perte relative en masse maximale est observée pour la **Composition N°4**, sa valeur atteint **6.35%** après 120 jours d'immersion dans une solution **4% H_2SO_4** . Pour les autres compositions les pertes sont presque identiques, elles sont de l'ordre de **4%**. L'analyse par **D.R.X** nous a montré une cristallisation du **Sulfate De Calcium (gypse)** qui résulte de la réaction chimique entre la calcite et l'acide sulfurique et la **Thaumasite** qui a été détectée dans toutes les compositions du béton. Il faut marquer que durant 120 jours d'immersion des éprouvettes en béton dans une solution de 4% de l'acide **H_2SO_4** , aucune dégradation n'a été observée à l'intérieur des éprouvettes. La dégradation apparaît uniquement à la surface, l'épaisseur de pénétration observée et de l'ordre de 1 mm. Cette résistance à la pénétration due à la structure dense des pores du béton qui bloque le passage des agents agressifs et par conséquent l'augmentation de la durée de l'utilisation de la construction.
- Finalement, on peut dire qu'il est possible pratiquement et économiquement d'utiliser le sable calcaire de concassage dans la fabrication de béton à haute performance avec des pourcentages variés en fines calcaires.

Recommandations

Nous recommandons pour les études ultérieures :

- Etudier l'effet des différents ajouts minéraux sur les propriétés physico-mécaniques et sur la durabilité du béton calcaire.
- Etudier la durabilité du béton calcaire vis-à-vis de **L'alcali Réaction**.
- Etudier la durabilité du béton calcaire aux pénétrations des **Ions Chlorures**.
- Etudier la durabilité du béton calcaire aux attaques des **Sulfates**.
- Etudier la durabilité du béton calcaire aux autres types d'acide tel que : l'acide **Chlorhydrique** ou l'acide **Carbonique**.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **H. Donza ***, **O. Cabrera**, **E.F. Irassar**, “High-strength concrete with different fine aggregate », *Cement and concrete Research* 32(2002) pp. 1755-1761.
- [2] **Tahir Celik and Khaled Marar**, “Effects of crushed stone dust on some properties of concrete”, *Cement and concrete Research*, vol. 26, No. 7, 1996 pp. 1121-1130.
- [3] **Ilker Bekir Topçu et Ali Ugurlu**, “Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete”, *Cement and concrete Research* 33 (2003) pp. 1071-1075.
- [4] **Gummadi Z** , Amélioration des performances des bétons par ajouts de fines calcaires, Séminaire international de Géomatériaux M’sila-Algérie 2003 .
- [5] **J. -K. Kim, C. -S. Lee, C. -K. Park and S. -H. Eo**, “The fracture characteristics of crushed limestone sand concrete”, ”, *Cement and concrete Research*, vol. 27, No. 11, 1997 pp. 1719-1729.
- [6] **ADAM M. NEVILLE**, Propriétés des bétons, édition Eyrolles, Paris1992.
- [7] Les bétons à hautes performances, LCPC 1992.
- [8] **PIERRE-CLAUDE AITCIN**, Bétons à haute performance, édition Eyrolles 1998.
- Paris
- [9] **R. Dupain, R. Lanchon, J.C. Saint Arroman**, Granulats, Sols, Ciments et bétons, éditions Casteilla 2000.
- [10] **Dreux.G. et Festa.J.**, Nouveau guide du béton et de ces constituants, 8^e édition , Eyrolles 1998.
- [11] **BARON J ., LESAGE R .** (1969), compacité et maniabilité de bétons hydrauliques, Rapport de recherche LCPC, 3, août.
- [12] **François de LARRARD, François BOSC, Cyrille CATHERINE, Frédéric DEFLORENNE**, La nouvelle méthode des coulis de l’AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances, *Bulletin de liaison des laboratoires ponts et chaussées*, **202**, Mars-Avril 1996, pp 61-69.
- [13] **A. ZEGHLOUL**, Conception fondamentaux de la mécanique de la rupture, université de METZ 2003-2004.

- [14] **Jacques Baron et Jean-Pierre OLLIVIER**, La durabilité des bétons, L.C.P.C 1996.
- [15] **Jacques Baron et Raymond Sauterey**, le béton hydraulique, connaissance et pratique , L.C.P.C 1982.
- [16] **BS EN 12620 :2002**, Aggregates for concrete.
- [17] **AFNOR P 18-598**, Granulats-Equivalent de sable, Paris 1990.
- [18] **AFNOR P 18-555**, Granulats-Mesures des masses volumiques, du coefficient d'absorption et teneur en eau des sables, dec.1990.
- [19] **AFNOR P 18-554**, Granulats-Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux, dec.1990.
- [20] **AFNOR P 18-451**, Béton-Essai d'affaissement, Paris, 1981.
- [21] **Véonique Baroghel-Bouny ; Jeam-Michel Torrenté** ; « Durabilité des bétons » PP71-93 collection de L'ENPC sous la direction de **F. Larrard** « construire en béton » dans l'essentiel sur les matériaux. Presse de L'ENPC, Paris 2002.
- [22] **Fritz-Joachim Hofmann, Klaus Hormann, Michael Schmidt, Eckhard Wagner**, Beton mit erhtem Widerstand gegen Säure und Biogene Schwefelsäurekorrosion, Sonderdruck aus Betonwerk+Fertigteil-Technik, Heft 4/1997.
- [23] **Cours de l'université de Sherbrooke GCI 714 - Durabilité et réparations du béton.**
- [24] **RILEM(1986)** , Détermination de l'énergie de rupture des mortiers et bétons par flexion trois points de poutres encochées, *RILEM draft recommendation*.
- [25] **Baron.J. et Ollivier.J.P.** , Les bétons , Bases et données pour leur formulation, Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, 2^{ème} tirage, Eyrolles, 1997.
- [26] **Nikola Petrov, Michel Thibault et Arezki Tagnit-Hamou**, Attaques externes et internes par les sulfates; similarités et différences, 1^{ère} congrès international sur la technologie et la durabilité du béton, 24 Mai 2004, Algérie.
- [27] **AFNOR P 18-400**, Béton-Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques, Paris, décembre 1981.
- [28] **AFNOR P 18-451**, Béton-Essai de flexion, Paris, 1981.
- [29] **F. Bellmann**, On the formation of thaumasite $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$: Part II 2005, Advances in Cement Research, 2006, 18, No. 3, July, 129–134
- [30] **Pierre ROSSI**, Fissuration du béton : des matériaux à la structure. Application de la mécanique linéaire de la rupture, Thèse de Doctorat décembre 1986.

[31] **AFNOR P 18-418**, Béton-auscultation sonique, mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton, Paris décembre 1989.

[32] **H. Askri, A. Belmecheri, B. Benrabah, A. Boudjema, K. Boumendjel, M. Daoudi, M. Drid, T. Ghalem, A. M. Docca, H. Ghandriche, A. Ghomari, N. Guellati, M. Khennous, R. Lounici, H. Naili, D. Takherist, M. Terkmani.** Géologie de l'Algérie : Contribution de SONATRACH Division Exploration, Centre de Recherche et Développement et Division Petroleum Engineering et Développement

[33] **Fiche technique** : Analyse complète sur ciment CPJ CEM II A 42.5 (ACC) Laboratoire central à Boumerdes-Algérie.

Références bibliographies

ANNEXE 01

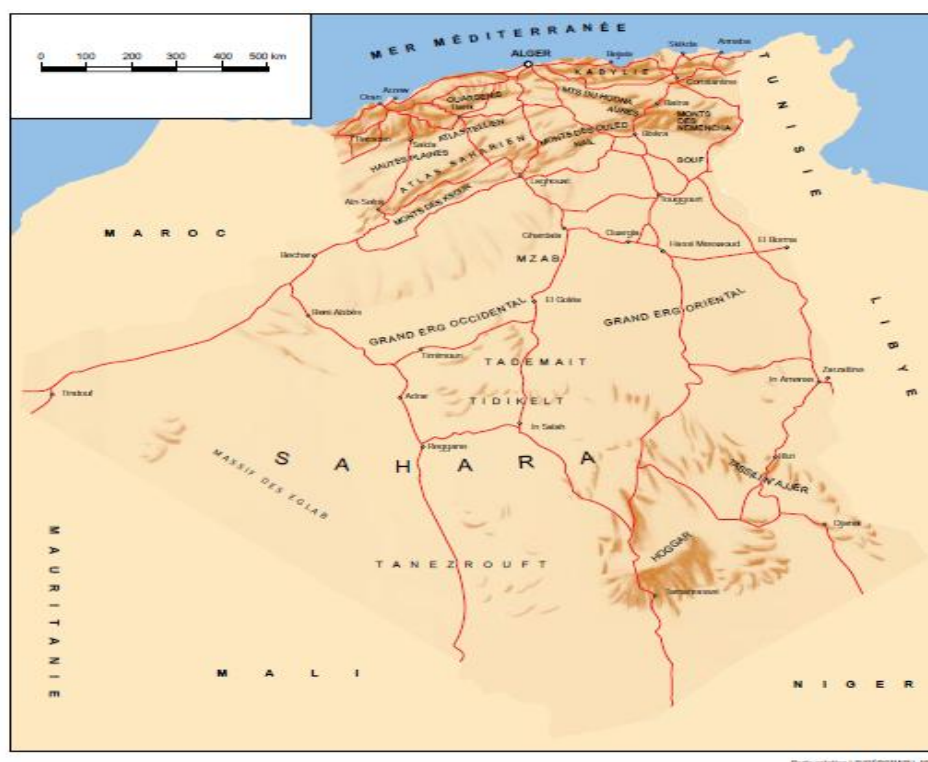


Fig. 1
Géographie de l'Algérie [32]

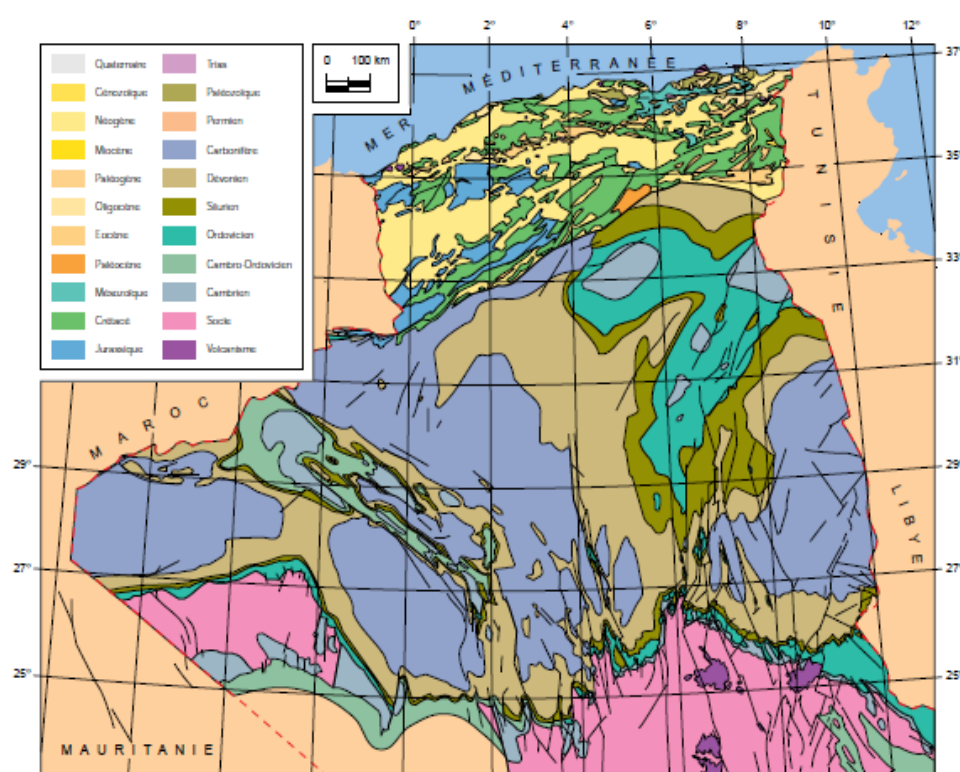


Fig. 2 [32]
Carte géologique d'Algérie.

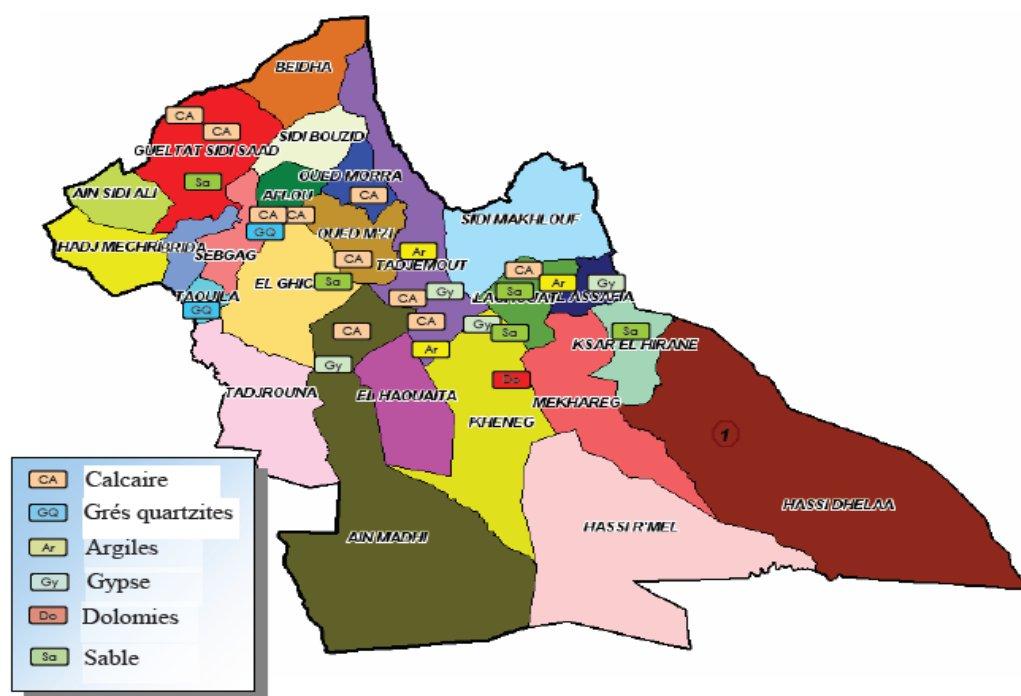


Fig. 3
Ressources minières de Laghouat

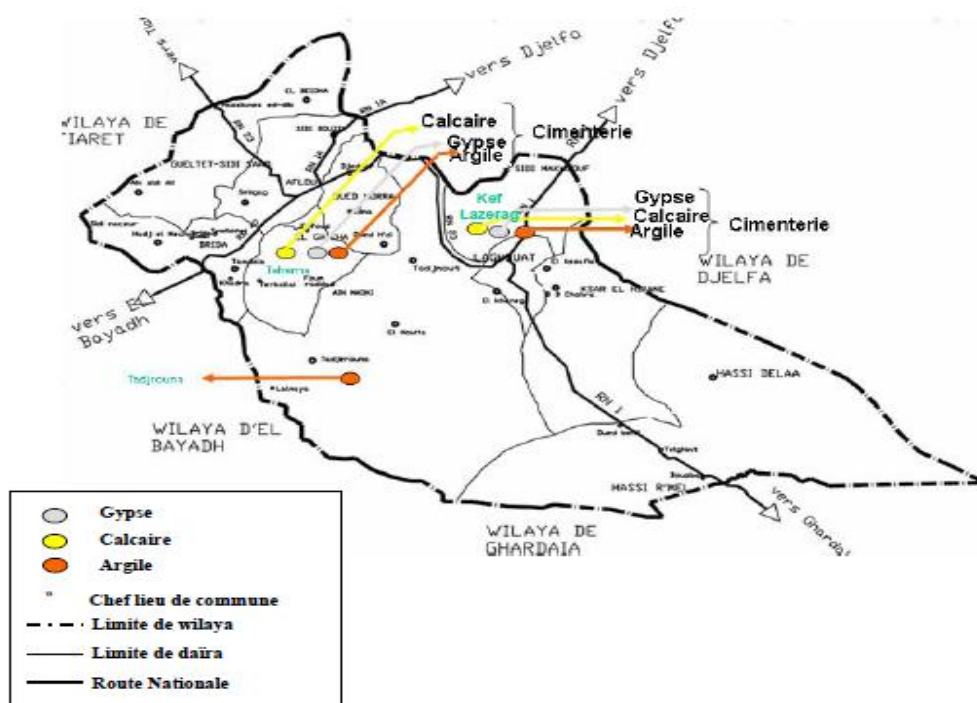


Fig.4
Carte des indices importants

ANNEXE 02

Tableau 1 : Analyse granulométrique du sable de la carrière de l'OUED M'ZI

Diamètre	Refus partiel en g R_i	Refus cumulé en g R_n	$(R_n/M).100$	Tamisats % $100-(R_n/M).100$
4.00	24	24	1.5	98.5
2.00	426.4	450.5	28.5	71.6
1.00	396	846.5	53.5	46.5
0.5	340.5	1187	75	25
0.25	106.5	1293.5	81.7	18
0.125	137	1430.5	90.3	9.7
0.063	150.5	1581	99.8	0.2
fond	2.5	1583.5	100	0.00

Tableau 2 : Analyse granulométrique du sable de la carrière de l'OUED MORRA

Diamètre	Refus partiel en g R_i	Refus cumulé en g R_n	$(R_n/M).100$	Tamisats % $100-(R_n/M).100$
4.00	3.4	3.4	0.227	99.8
2.00	168.9	172.3	11.516	88.5
1.00	414.4	586.7	39.21	60.8
0.5	335.7	922.4	61.65	38.4
0.25	242.2	1164.6	77.84	22.2
0.125	182.2	1346.8	90.02	10
0.063	140.2	1486.8	99.37	0.6
fond	9.4	1496.2	100	0.00

Tableau 3 : Analyse granulométrique du sable de la carrière de SIDI MAKHLOUF

Diamètre	Refus partiel en g R_i	Refus cumulé en g R_n	$(R_n/M).100$	Tamisats % $100-(R_n/M).100$
4.00	19.6	19.6	1.3	98.7
2.00	413.9	433.5	29	71
1.00	509.9	943.4	63.1	36.9
0.5	280.2	1233.6	82.5	17.6
0.25	99.00	1322.6	88.5	11.6
0.125	69.5	1392.1	93.1	7
0.063	77.1	1469.2	98.2	1.8
fond	26.9	1496.1	100	0.00

Tableau 6 : Analyse granulométrique de sable sans fines calcaires (0%)

Diamètre mm	Refus partiel en gramme R_i	Refus cumulé en gramme R_n	$(R_n/M).100$	Tamisats $100-(R_n/M).100$
4.00	9.4	9.4	0.6	99.4
3.15	84.9	94.3	6.4	93.6
2.50	153.3	247.6	16.9	83.1
2.00	169.3	416.9	28.5	71.6
1.60	111.3	528.2	36	64
1.25	248.4	776.6	53	47
1.00	104.2	880.8	60.1	39.9
0.80	85.0	965.8	65.9	34.1
0.63	158.6	1124.4	76.7	23.3
0.50	46.9	1171.3	79.9	20.1
0.40	26.8	1198.1	81.8	18.3
0.315	67.7	1265.8	86.4	13.6
0.25	42.4	1308.2	89.3	10.7
0.20	36.4	1344.6	91.7	8.3
0.16	62.2	1406.8	96	4
0.125	24.6	1431.4	97.7	2.3
0.08	34.2	1465.6	100	0.00

Tableau 9 : Analyse granulométrique par sédimentation.

Temps des lectures	Température T	Lecture R	Lecture corrigé R _c	$D=K\sqrt{\frac{H_r}{t}}$ (μm)	Pourcentage des grains P < D	Tamisé P _p =...
30s	24	10	11	71.4	89.2	10.8
1 min	24	95	10.5	51	85.1	14.9
2 min	24	8.5	9.5	36.2	77	23
5 min	24	6	7	23.4	56.7	43.3
10 min	24	5	6	17	48.6	51.4
20 min	24	3	4	12	32.4	67.6
40 min	24	2	3	8.7	24.3	75.7
80 min	24	05	1.5	6.2	12.2	87.8
4 h	24	-0.2	0.8	3.6	6.5	93.5
24 h	23.5	-0.3	0.5	1.5	4.1	96

Tableau 10: Analyse granulométrique du gravier 4/20.

Diamètre mm	R _i (g)	R _n (g)	(R _n /M). 100	100-(R _n /M).100
20	110.1	110.1	2.6	97.4
16	696.4	806.5	19.4	80.7
14	1080.5	1887	45.28	54.7
12.5	472	2357	56.6	43.4
10	758.4	3117.4	74.8	25.2
8	472.9	3590.3	86.14	13.9
6.3	268.8	3859.1	92.59	7.4
5	254.2	4113.3	98.7	1.3
4	54.3	4167.6	100	0.00