

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DES : TECHNOLOGIE**



**FILIERE : GENIE CIVIL**

N° :...../2023

**OPTION : MATERIAUX**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**  
**Par : Boutbig Rima & Yourmeche Chourouk**

**1. Thème :**

**Etude de l'influence de température élevée sur le**  
**béton d'agrégats recyclés**

**Soutenu le / /2023 devant le jury composé de :**

<b>BENCHEIKH Mohamed</b>	<b>Université de M'Sila</b>	<b>Président</b>
<b>AMRIOU Abedrrachi</b>	<b>Université de M'Sila</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>DJABRI Noura</b>	<b>Université de M'Sila</b>	<b>Examineur</b>

**Année universitaire : 2022/2023**

## *Remerciement*

*Le présent travail a été réalisé au Département GENIE CIVIL  
de la Faculté des sciences de Technologie Université MOHAMED  
BOUDIAF-M'SILA*

*Nous remercions Dieu, le tout puissant pour la volonté, la patience et  
le courage qu'il nous a accordés pour mener à terme ce travail.*

*Nous tenons à exprimer notre sincère reconnaissance à Dr AMRIOU  
Abedrrachi.*

*à l'Université M'sila, pour avoir accepté de nous encadrer, pour son  
attention discrète, ses recommandation mesurées et ses précieux  
conseils et surtout pour ses qualités humaines et scientifiques toujours  
en toute Modestie, sa passion du métier qu'il sait rendre contagieuse et  
la confiance qu'il a bien voulu nous accorder tout au long de ce  
travail.*

*Nous voudrions ensuite remercier tous les membres du jury qui vont  
juger ce modeste travail et nous faire profiter de leurs connaissance et  
remarques constructives :*

*Pr BENCHÉIKH Mohamed qui nous a fait l'honneur de présider le  
jury.*

*Nous remercions Mme DJABRI NOURA pour ses critiques et  
commentaires utiles.*

*Merci à tous qui, de près ou de loin.*

## *Dédicaces*

*Je tiens à dédier ce mémoire :*

*A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en gratitude*

*De leurs dévouements, de leurs soutien permanent durant toutes mes*

*Années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconforts moraux, eux*

*qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et*

*pour m'voir permit d'atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne*

*peut être dit, mes affections sans limite.*

*Ma sœur*

*A mes Frères*

*Ma fille : Wafaa*

*A mon mari : Akram*

*A toute la famille : Yourmrche*

*A tous mes Amis*

*A toute la promotion de G.C 2023.*

*Yourmeche chourouk*

A decorative border with intricate floral and scrollwork patterns in the corners and along the sides, framing the central text.

## *Dédicaces :*

*Je dédie ce travail :*

*A mes chers parents, ma mère et mon père pour leur patience, leur  
amour, leur  
soutien et leurs encouragements.*

*A mes sœurs et mon frère*

*A mes très chers amis*

*A tous ceux qui m'aiment*

*A tous ce que j'aime*

*A tous ceux qui m'ont aidé de loin où de près à ce travail*

*Boutbig Rima*

## Résumé :

Les matériaux cimentaires sont les plus utilisés dans le domaine de la construction. Ces matériaux peuvent être soumis à des chargements mécaniques, des attaques chimiques ou à des températures élevées. Dans le cas des incendies, la température maximale à laquelle est soumise le béton peut atteindre 1000°C. Lorsqu'un matériau cimentaire comme le béton est exposé à de hautes températures, au-delà de 100°C, ses propriétés physiques tel que la masse, ses performances mécaniques comme la résistance en compression ou à la flexion et ses propriétés de transfert en particulier la perméabilité, se dégradent du fait de la modification de sa microstructure. Le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérée en premier lieu comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation des granulats, en second lieu protéger l'environnement. Dans ce cadre vient le sujet de la valorisation de déchets de briques comme granulats pour confectionner les bétons. Le but de ce travail est de compléter, par une étude expérimentale, la connaissance déjà acquises sur le comportement mécanique du béton soumis à des températures élevées en mettant l'accent sur le comportement du micro béton confectionné par des granulats issus de de brique concassée et comparaison les résultats avec ceux obtenus en utilisant des granulats de carrière. Plusieurs échantillons de micro béton ont été préparés en particulier, des échantillons de béton ordinaire avec un sable de carrière, d'autres échantillons en utilisant des granulats de briques concassés comme sable et en fin des échantillons en incorporant de la fumée de silice et un adjuvant. Les granulats de brique concassé ont été utilisés avec un taux de remplacement du sable de (0%, 25%, 50%, 75% et 100%) Les résultats obtenus par la présente étude expérimentale nous permettent de

Conclure dans quelle mesure la valorisation de granulats de briques recyclés concassés, peut améliorer les caractéristiques physico mécaniques et la tenue des bétons dans le cas des températures élevée.

## المخلص:

المواد الأسمنتية هي الأكثر استخدامًا في صناعة البناء. يمكن أن تتعرض هذه المواد لأحمال ميكانيكية أو هجمات كيميائية أو درجات حرارة عالية. في حالة الحرائق، يمكن أن تصل درجة الحرارة القصوى التي تتعرض لها الخرسانة إلى 1000 درجة مئوية. عندما تتعرض مادة أسمنتية مثل الخرسانة لدرجات حرارة عالية، فوق 100 درجة مئوية، فإن خصائصها الفيزيائية مثل الكتلة، وأدائها الميكانيكي مثل قوة الانضغاط أو الانثناء وخصائص نقلها على وجه الخصوص النفاذية، تتدهور بسبب تعديل بنيتها المجهرية. تعتبر إعادة تدوير النفايات واستعادتها اليوم في المقام الأول حلاً للمستقبل من أجل الاستجابة للعجز بين إنتاج واستهلاك الركام، وثانيًا لحماية البيئة. في هذا السياق يأتي موضوع استعادة نفايات الطوب كركام لصنع الخرسانة الغرض من هذا العمل هو استكمال المعرفة المكتسبة بالفعل، من خلال دراسة تجريبية، بشأن السلوك الميكانيكي للخرسانة المعرضة لدرجات حرارة عالية من خلال التأكيد على سلوك الخرسانة الدقيقة المصنوعة من الركام من الطوب المسحوق ومقارنة النتائج مع تلك التي تم الحصول عليها باستخدام مجاميع المحجر، تم تحضير عدة عينات من الخرسانة الدقيقة على وجه الخصوص، عينات من الخرسانة العادية مع رمل المحجر، وعينات أخرى باستخدام ركام الطوب المسحوق كرمل، وأخيرًا عينات تحتوي على دخان السيليكا مع مادة مضافة.

تم استخدام ركام الطوب المكسر بمعدل استبدال الرمل (0%، 25%، 50%، 75% و100%). نتيج لنا النتائج التي تم الحصول عليها من خلال هذه الدراسة التجريبية أن نستنتج إلى أي مدى يمكن أن يؤدي استرداد مجاميع الطوب المعاد تدويره المكسرة إلى تحسين الخصائص الفيزيائية الميكانيكية وسلوك الخرسانة في حالة درجات الحرارة المرتفعة.

## **Abstract:**

Cementitious materials are the most widely used in the construction field. These Materials can be exposed to mechanical loads, chemical attacks or high temperatures. In the case of fires, the maximum temperature to which concrete is exposed can reach 1000°C. When a cementitious material such as concrete is exposed to high temperatures, above 100°C, its physical properties such as mass, its mechanical performance such as compressive or flexural strength and its transfer properties in particular permeability, deteriorate due to the modification of its microstructure. Recycling and recovery of waste are today considered first and foremost as a solution for the future in order to respond to the deficit between production and consumption of aggregates, and secondly to protect the environment. In this context comes the subject of the recovery of waste bricks as aggregates to make concrete. The purpose of this work is to complete, through an experimental study, the knowledge already acquired on the mechanical behavior of concrete exposed to high temperatures by emphasizing the behavior of micro concrete made by aggregates from crushed brick and comparison of the results with those obtained using quarry aggregates. Several samples of micro concrete were prepared in particular, samples of ordinary concrete with quarry sand, other samples using crushed brick aggregates as sand and finally samples incorporating silica fume and an admixture Crushed brick aggregates.

Were used with a sand replacement rate of (0%, 25%, 50%, 75% and 100%)

The results obtained by this experimental study allow us to conclude to what extent the recovery of crushed recycled brick aggregates can improve the physico-mechanical characteristics and the behavior of concretes in the case of high temperatures.

# *Sommaire*

## Sommaire

Remerciements :

Dédicace :

Résumé :

Sommaire :

Liste de Figure :

Liste des tableaux :

**Introduction générale :**

### Chapitre I : Revue générale sur la microstructure de ciment

I. Introduction:.....	04
I.2 Microstructure d'une pâte de ciment :.....	04
I.3. Le ciment Portland à l'état anhydre .....	04
I.3.1. Fabrication d'un ciment .....	04
I.3.2 Composition chimique d'un ciment.....	05
I.4. Hydratation d'un ciment Portland:.....	07
I.4.1 Hydratation des silicates: .....	07
I.4.2. Hydratation des aluminates:.....	08
I.4.3 Le rôle des sulfates dans l'hydratation du ciment:.....	08
I.4.4 La solution interstitielle:.....	08
I.4.5 Aspects cinétiques d'hydratation:.....	09
I.5. Microstructure d'une pâte de ciment hydratée: .....	11
I.5.1 Description des hydrates formés: .....	11
I.5.1. Les sulfoaluminates de calcium: .....	13
I.5.1.2 Description du réseau poreux: .....	16
I.6. Influence des facteurs sur la propriété mécanique et la durabilité des matériaux cimérique : .....	17
I.6.1. Influence du type de liant: .....	17
I.6.2. Influence des paramètres de fabrication et de conservation du béton: .....	18
I.6.3. Influence des facteurs environnementaux: .....	19
I.6.3.1. La corrosion des armatures: .....	19
I.6.3.2. Action de la carbonatation : .....	19

I.6.3.3. Action des ions chlorures: .....	20
I.6.3.4. Gonflement due à la présence de sulfates: .....	20
Conclusion: .....	22
<b>Chapitre II : influence de la température sur les caractéristiques des bétons</b>	
II.1 Introductionµ .....	24
II.2 Évolution de la microstructure des matériaux à matrice cimentaire en fonction de la température .....	24
II.2.1. Rappels sur la microstructure des matériaux à matrice cimentaire .....	24
II.2.2. Phénomènes d'éclatements .....	26
II.2.3. Influence de la température sur la pâte de ciment .....	27
II.2 .4. Influence de la température sur les granulats .....	28
II.2.5. Influence de la température sur la microstructure du béton .....	29
II.2.5.1 Interface pâte – granulats .....	29
II.2.5.2. Variation de la porosité .....	31
II.3. Effet de la température sur les propriétés mécaniques du béton ordinaire et de haute performance .....	32
II.3.1. Résistance de compression .....	32
II.3.2. La vitesse d'onde longitudinale .....	34
II.3.3. Perte de masse .....	35
II.4. comportement au feu du beton .....	36
II.5. constituants principaux et additions.....	39
II.5.1. Constituants du clinker .....	39
II.5.2. Les autres constituants du ciment .....	39
II.5.3. Effet des additions : .....	40
II.6. Facteurs influant sur le comportement au feu .....	40
II.6.1. Résistance du béton .....	41
II.6.2. Teneur en humidité .....	41
II.6.3. Masse volumique du béton .....	41
II.6.4. Intensité du feu .....	42
II.6.5. Dimensions des échantillons : .....	42
II.6.6. Armature latérale : .....	42
II.6.7. Importance de la charge : .....	42

II6.8.Type de granulat .....	43
Conclusion : .....	43
<b>ChapitreIII. Généralité sur le Recyclage des déchets</b>	
III.1 Définition : .....	45
III.2. Les type d'élimination : .....	45
III.3. Intérêt du recyclage dans le génie civil : .....	45
III.4. LES DECHETS DU SECTEUR DE LA CONSTRUCTION .....	46
III.5. Les déchets industriels .....	48
III.5.1. Les type de déchets de chantier .....	49
III.5.2. Déchets ménagers et assimilés (DMA) .....	49
III.5.3. Déchets encombrants .....	50
III.5.4. Déchets spéciaux .....	51
III.5.5. Déchets des activités de soins .....	51
III.5.6. Déchets inertes .....	52
III.5.6.1. Valorisation des déchets industriels dans la fabrication des ciments .....	53
III.5.7. Le laitier de haut fourneau .....	54
III.5.8. La fumée de silice .....	56
III.5.9. Les cendres volantes .....	57
III.5.10. Les déchets agricoles .....	58
III.6. Influence des granulats de béton de ciment recyclé dans la fabrication des bétons de ciment .....	58
III.6.1. Essai de la résistance à la compression.....	60
Conclusion : .....	62
<b>ChapitreIV : Programme experimental</b>	
<b>A/ présentation et Caractéristiques des matériaux utilisés</b>	
IV.1 Introduction :.....	65
IV.2 Caractérisation des matériaux utilisés :.....	65
IV.3. Essais sur les granulats.....	66
IV.3.1 Analyse Granulométrique :.....	66
IV.3.2 : Masse volumique apparente :.....	68
IV.3.3 : Masses volumiques absolues.....	69
IV.3.4 : Absorption d'eau:.....	70
IV.3.5 : La porosité.....	70

IV.3. 6 : La Compacité :.....	71
IV.3.7 : Indice des vides :.....	72
IV.3.8 : Résistance à la fragmentation :.....	72
IV.4 : Sable concassé 0/5 :.....	72
IV.4.1 : Composition granulométrique :.....	72
IV.4.2 : Module de finesse (EN 196-6) :.....	73
IV.4.3 : Masse volumique apparente : NF P 18-55.....	74
IV.4.5 : Porosité :.....	75
IV.4.6 : Compacité:.....	76
IV.4.7 : Indice des vides:.....	76
IV.4.8 : Equivalant de sable NF-18-598 :.....	77
IV.5 : Briques concassés et ajouts :.....	80
IV.5.1. Sable de brique concassé :.....	80
IV.5.1.1. Analyse Granulométrique :.....	80
IV.5.3 : La Fumée de silice (FS) :.....	81
IV.6 : Le ciment:.....	82
IV.7 : L'adjuvant :.....	83
IV.7.1 : Description :.....	84
IV.7.2 : Caractéristiques.....	85
IV.8 L'eau de gâchage:.....	85
IV.9 : La formulation des bétons :.....	86
IV.9.1 : Méthode de formulation de Dreux- Grise :.....	86
IV.9.2. Dosage en ciment et en eau :.....	87
IV.9.3. Ajustement du dosage en eau :.....	87
IV.9.4. Dosage des granulats.....	89
IV.9.4.1. DREUX-GORISSE.....	90
IV.9.4.2. La ligne de partage :.....	92
IV.7.4 3. Dosage en masse des granulats :.....	92
IV.9.4.4. Coefficient de compacité :.....	93
IV.9.4.5. Quantité des agrégats en pourcentage :.....	94
IV.9.4.6. Volume absolu de l'ensemble des granulats.....	94
IV.9.4.7. Dosage des granulats en kg dans 1 m <sup>3</sup> :.....	94
IV.9.4.7 Programmes expérimentale:.....	95

IV.10. Matériels et essais :.....	95
IV.11. Vibration : [NA EN 12390-2] :.....	95
IV.12. : Conduite des essais sous températures élevées :.....	95
IV.13. : Essai de Flexion et Traction :.....	96
IV.14 : Essai de compression :.....	96
<b>B/ Représentation et interprétation des résultats :</b>	
IV1. Introduction :.....	99
IV.2. Perte de masse :.....	99
IV.3. Essai de compression :.....	100
IV.3.1 : Résistance à la compression :.....	102
IV.4. Essai de flexion :.....	103
IV.4.1 : Résistance à la flexion :.....	104
IV.5. Essai de Traction :.....	105
IV.5.1 : Résistance à la traction :.....	105
Conclusion :.....	106
Conclusion générale.....	108

## Liste de Figure

Figure	Titre de figure	Page
<b>Chapitre I : Revue générale sur la microstructure de ciment</b>		
I.1	Evolution dans les premiers instants de l'hydratation de la composition de La solution interstitielle, d'après P. Longuet et al. [7]	09
I.2	Courbes de flux thermiques dégagés lors de l'hydratation de l'alite et du système C3A – gypse – CH (à gauche), et comparaison entre le flux théorique, somme des flux des deux systèmes, et le flux thermique expérimental, d'après H. Minard [8]	10
I.3	Cristal de portlandite (X) entre des C – S – H (), d'après La porosité est Repérée par (O).[9]	10
I.4	Formation et croissance des hydrates au cours de l'hydratation d'une pâte De ciment, d'après F.W. Locher	11
I.5	Vue au microscope électronique à balayage de C – S – H dans une pâte de Ciment hydratée, d'après[9]	11
I.6	Image au microscope électronique à transmission d'un C – S – H de synthèse dit tobermoritique (Photo C. Clinard, d'après [10])	13
I.7	Représentation dierketten de la tobermorite, analogue naturel des C – S – H de rapport C/S faible, d'après S.A. [1]	14
I.8	Connectivités des tétraèdres de silice et réponses sur le spectre de Résonance Magnétique Nucléaire du silicium, d'après I. Klur	14
I.9	Spectres de résonance magnétique nucléaire du silicium pour des C – S – H à différents rapports C/S, d'après N. Lequeux [1]	14
I.10	Observations au microscope électronique à balayage d'aiguilles d'ettringite Dans un ciment au laitier [9] et d'ettringite massive dans des pâtes de ciment [10]	15
I.11	Schématisation de la structure des C – S – H, d'après R. Feldman et P. Sereda [10]	17
I.12	conservation d'éprouvette de béton (la cure)	19
<b>Chapitre II : influence de la température sur les caractéristiques des bétons</b>		
<b>Figure.II.01</b>	Modèle de structuration des particules de CSH [16]	25
<b>Figure.II.02</b>	Familles des vides dans le béton et domaine d'utilisation des principales techniques de caractérisation des milieux poreux [16]	25
<b>Figure.II.03</b>	Section effondrée du faux plafond dans le tunnel du Gothard après L'incendie du 21 octobre, 2001.	27
<b>Figure.II.04</b>	Évolution de la déformation thermique des pâtes de ciment avec La température [17]	28
<b>Figure.II.05</b>	Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux) [17]	29
<b>Figure.II.06</b>	: Mécanismes liés aux incompatibilités pâte-granulat [18]	30

<b>Figure.II.07</b>	Comparaison de la structure d'un BHP avant et après L'échauffement à 600°C [18]	30
<b>Figure.II.08</b>	Distribution des pores dans les bétons chauffés obtenus par prosimètre au mercure. A gauche BO – à droite BHP[19]	31
<b>Figure.II.09</b>	: Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement [19]	32
<b>Figure.II.10</b>	Evolution de la résistance en compression du béton avec la température	33
<b>Figure.II.11</b>	Evolution de la résistance en compression relative du béton avec la température	33
<b>Figure.II.12</b>	Evolution de la vitesse des ondes soniques avec la température	34
<b>Figure.II.13</b>	Evolution de la vitesse des ondes soniques relatives avec la température	35
<b>Figure II.14</b>	Evolution de la perte de masse avec la température	35
<b>Figure II.15</b>	À gauche, photo du bâtiment Windsor à Madrid après l'incendie. À droite, dessous du tablier du pont à Bruxelles après l'incendie	37
<b>FigureII.16</b>	Exemples de désordres de différentes classes, A/ écaillage superficiel, B/disparition du béton d'enrobage des armatures, C/ les armatures sont totalement dégagées et la perte de l'épaisseur de béton atteint 50%.	39
<b>Chapitre III. Généralité sur le Recyclage des déchets</b>		
<b>Figure III.1</b>	recyclage des déchet de construction [29]	46
<b>Figure III.2</b>	Déchets ménagers	50
<b>Figure III.3</b>	déchet encombrants	50
<b>Figure III.4</b>	déchet spéciaux organizer	51
<b>Figure III.5</b>	déchet des activités de soins	52
<b>Figure III.6</b>	Déchets inertes	53
<b>Figure III.7</b>	Temps de prise des ciments avec ajout du laitier	55
<b>Figure III.8</b>	déchet agricole	58
<b>Figure III.9</b>	Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction du pourcentage de substitution en granulats de béton de démolition pour des dosages de ciment respectifs 300, 350,400 kg/m3 [39]	60
<b>Chapitre IV : Programme experimental</b>		
<b>FigueurIV.1</b>	Analyse granulométrique	65
<b>FigueurIV.2</b>	Analyse granulométrique Gravier 3/8	67
<b>FigueurIV.3</b>	La Masse Volumique absolues	69
<b>Figure IV.4</b>	L'analyse granulométrique d'un sable concassé 0/5	72
<b>Figueur.IV.5</b>	Essais Equivalant de sable	76
<b>Figure IV.6</b>	Essai d'équivalent de sable	77
<b>Figueur IV.7</b>	Essai d'équivalent de sable	78

<b>Figure IV.8</b>	L'analyse granulométrique de la brique concassé	80
<b>Figure IV.9</b>	Poudre de la fumée de silice	80
<b>FigureIV.10</b>	Mécanisme d'action des plastifiants et super plastifiants	83
<b>FigureIV.11</b>	Super plastifiant MEDAFLOW 30	84
<b>FigureIV.12</b>	courbes de calcul de la composition du béton	88
<b>FigureIV.13</b>	Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment prévoir en fonction du rapport C/E	89
<b>FigureIV.14</b>	les lignes de partage	91
<b>FigureIV.15</b>	Four à béton	95
<b>FigureIV.16</b>	Appareil d'essai de flexion et de traction	95
<b>FigureIV.17</b>	Machine d'essai de compression	96
<b>FigureIV.18</b>	Perte de masse sous différentes températures pour le béton ordinaire	98
<b>FigureIV.19</b>	Perte de masse sous différentes températures pour le avec Adjuvant et fumée de silice	98
<b>FigureIV.20</b>	Résistance à la compression sous différentes températures Pour le béton ordinaire	99
<b>FigureIV.21</b>	Résistance à la compression sous différentes températures pour le avec Adjuvant et fumée de silice	100
<b>FigureIV.22</b>	Résistance à la flexion sous différentes températures Pour le béton ordinaire	101
<b>FigureIV.23</b>	Résistance à la flexion sous différentes températures pour le avec Adjuvant et fumée de silice	101
<b>FigureIV.24</b>	Résistance à la traction sous différentes températures pour le avec Adjuvant et fumée de silice	103
<b>FigureIV.25</b>	: Résistance à la traction sous différentes températures pour le avec Adjuvant et fumée de silice	105
<b>FigureIV.26</b>	micro fissures apparents sur la surface d'une éprouvette chauffée à 800°C.	103

### Liste des tableaux :

<b>Tableau</b>	<b>Titre du tableau</b>	<b>Page</b>
<b>CHAPITRE I</b>		
<b>Tableau I.1</b>	Classes des ciments selon la norme NF EN 197-1	<b>06</b>
<b>Tableau I.2</b>	Composition massique des principaux composants d'un ciment [%]	<b>06</b>
<b>CHAPITRE II</b>		
<b>Tableau II.1.</b>	Classification des dégradations d'ouvrage en béton par incendie [23]	<b>38</b>
<b>CHAPITRE IV</b>		
<b>Tableau IV.1</b>	l'analyse granulométrique de (3/8) du gravier concassé	<b>66</b>
<b>Tableau IV.2</b>	Masse volumiques apparente de Gravier 3/8.	<b>68</b>

<b>TableauIV.3</b>	Masse volumiques absolue de Gravier 3/8	<b>70</b>
<b>TableauIV.4</b>	coefficient d'absorption d'eau des (3/8).	<b>71</b>
<b>TableauIV.5</b>	La porosité des fractions (3/8)	<b>70</b>
<b>TableauIV.6</b>	La Compacité des fractions (3/8)	<b>71</b>
<b>TableauIV.7</b>	: Indice de vide des (3/8).	<b>71</b>
<b>TableauIV.8</b>	los Angeles des (3/8)	<b>71</b>
<b>TableauIV.9</b>	l'analyse granulométrique d'un sable concassé 0/5	<b>72</b>
<b>TableauIV.10</b>	: Masses volumiques apparentes de sable 0.5 Concassée l'état lâche.	<b>73</b>
<b>TableauIV.11</b>	: Masse volumique apparente du sable concassé à l'état compact	<b>74</b>
<b>TableauIV.12</b>	La porosité, la compacité et l'indice de vide pour le sable concassée	<b>75</b>
<b>TableauIV.13</b>	Equivalent du sable de sable concassé.	<b>77</b>
<b>TableauIV.14</b>	Comparaison des résultats	<b>78</b>
<b>TableauIV.15</b>	L'analyse granulométrique d'un sable de brique concassé	<b>79</b>
<b>TableauIV.16</b>	Caractéristiques chimiques et physique de la fumée de silice	<b>81</b>
<b>TableauIV.17</b>	Caractéristiques de MEDAFLOW 30	<b>84</b>
<b>TableauIV.18</b>	Valeurs approximatives du coefficient granulaire	<b>86</b>
<b>TableauIV.19</b>	Correction du dosage en eau selon le diamètre, D du mélange granulaire	<b>87</b>
<b>TableauIV.20</b>	valeur du terme correcteur	<b>90</b>
<b>TableauIV.21</b>	Valeurs du coefficient de compacité $\gamma$	<b>92</b>
<b>TableauIV.22</b>	l'ensemble des essais réalisés	<b>94</b>

# *Introduction générale*

## **Introduction générale :**

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine du Génie Civil. Ce matériau peut être soumis de façon simultanée à des chargements mécaniques et à des températures relativement élevées. Dans le cas des incendies, la température maximale à laquelle est soumis le béton peut atteindre et dépasser 1000 °C. Malgré le bon comportement du béton dans les conditions normales d'utilisation. Il peut présenter des dégradations sous diverses formes dans le cas des températures élevées comme lors des incendies.

Dans le cas des incendies le béton se dégrade de l'extérieur vers le cœur lors de l'élévation de température. Ce comportement conduit à la dégradation des propriétés physiques, mécaniques et de transfert dans le béton causé par la modification de sa microstructure. Ces dégradations peuvent conduire à l'instabilité des ouvrages d'où toucher les vies des personnes.

Le comportement au feu dépend de plusieurs paramètres liés au béton comme la nature des composants entrant dans sa confection, la microstructure, la teneur en eau, la résistance mécanique. Il dépend aussi des caractéristiques du feu : la vitesse de montée de la température, la température maximale atteinte et de la durée d'exposition à une température élevée. Les dégradations associées à une élévation de température sont principalement une perte de résistance et un détachement de matière appelé « écaillage du béton ».

Dans le but de prendre soin de l'environnement, des recherches sont réalisées pour valoriser les différents déchets comme matériaux de construction principalement les déchets de démolition.

Les chantiers de construction et de démolition engendrent une diversité de déchets, une grande partie de ces déchets sont éliminés en décharge. La demande de plus en plus en granulats pour la confection des bétons ont conduit à un épuisement des ressources naturelles disponible principalement des granulats. En plus, les moyens de destructions des déchets ainsi que les lois relatives à la protection de l'environnement, sont tous des facteurs qui favorisent le recyclage des déchets de chantier pour les réutiliser dans la production des bétons.

Dans le présent travail, l'étude du comportement mécanique et la durabilité du béton à base de granulats de brique concassée a été réalisée. L'étude expérimentale est effectuée sur des échantillons de micro béton soumis à des températures élevées, des mesurés de résistance et de durabilité ont été pris.

Organisation du mémoire :

Le présent mémoire se divise en 4 chapitres.

**CHAPITRE I :** Le premier chapitre présente une vue générale sur la microstructure de ciment,

**CHAPITRE II :** Dans ce chapitre on présente l'influence de la température sur les caractéristiques des bétons

**CHAPITRE III :** Ce chapitre présente la généralité sur le recyclage des déchets.

**CHAPITRE IV :** Dans ce chapitre nous avons basé sur la présentation graphique et une interprétation de l'ensemble des Résultats obtenus.

En fin une conclusion générale

***CHAPITRE I : Ruve générale  
sur la microstructure de ciment***

## **I.1. Introduction**

Les matériaux à matrice cimentaire tels que les bétons sont les matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. En 2002, la France a produit pratiquement 20 millions de tonnes de ciment, ce qui correspond à environ un mètre cube de béton produit, par an et par habitant. Comparativement, la production chinoise annuelle s'élève à environ 620 millions de tonnes de ciment [1]. La très grande utilisation des bétons, et donc des ciments, résulte de son faible coût de production, et de sa facilité de mise en œuvre sur chantier. Le ciment est un composant primordial dans la conception des bétons car ses hydrates apportent la cohésion du squelette granulaire, et donc une tenue mécanique du matériau et de la structure en béton. Par contre, la stabilité des propriétés mécaniques d'un béton repose en grande partie sur la stabilité des hydrates du ciment. Il est donc nécessaire de s'assurer du comportement à long terme du ciment pour garantir celui de la structure en béton. Ce chapitre est divisé en deux parties. Tout d'abord, nous décrivons la pâte de ciment, de son hydratation jusqu'aux principales approches pour modéliser sa microstructure. Dans un second temps, nous dressons un inventaire des mécanismes physiques et chimiques pouvant être identifiés dans les matériaux cimentaires.

### **1.2 Microstructure d'une pâte de ciment :**

L'hydratation à sa modélisation les ciments sont des matériaux complexes, car polyphasiques, poreux, et évolutifs dans le temps. L'analyse de la microstructure des ciments est nécessaire pour comprendre précisément ces matériaux et leurs comportements. Ce chapitre présente, pour un ciment CEM I, dit Portland, différents aspects liés à sa microstructure. Tout d'abord, le matériau est décrit à l'état anhydre. Puis les processus d'hydratation de ce ciment, et les différents aspects de la microstructure, sont détaillés. Enfin, nous présentons quelques approches de modélisation de la microstructure des ciments ainsi que leurs applications.

### **I.3. Le ciment Portland à l'état anhydre**

#### **1.3.1. Fabrication d'un ciment**

La base du ciment Portland, le clinker, est fabriquée à partir d'un mélange de calcaire et d'argile extraits de carrières. Après extraction et concassage, ces deux roches sont mélangées, décarbonatées et transformées lors d'une cuisson dans un four où la température atteint 1450°C.

Le produit formé, le clinker, est trempé à l'air. Les granules de clinker sont ensuite broyés finement. La surface spécifique des grains, notée finesse, est de l'ordre de 3000cm<sup>2</sup>/g pour un ciment courant et est un facteur direct de la réactivité, et en conséquence, de la résistance caractéristique du ciment hydraté. A ce clinker, base du ciment Portland, sont ajoutés du gypse (à hauteur de 3 à 5%), qui agit comme régulateur de prise, et éventuellement d'autres constituants tels que des fillers calcaires, de la fumée de silice, des laitiers de haut-fourneau ou

des cendres volantes, en fonction du ciment à composer. Le tableau I.1 rappelle les compositions de ciment pour les différentes classes normalisées européennes. En fonction des utilisations du ciment et en particulier de l'environnement dans lequel ce ciment hydraté sera exposé, certaines classes de ciment seront mieux adaptées. C'est le cas par exemple des ciments de type PM ES (pour Prise Mer, Eaux Sulfatées) dans des environnements maritimes.

### **I.3.2 Composition chimique d'un ciment**

De par son origine (calcaire et argile), le ciment Portland est constitué de minéraux. Sa cuisson et sa trempe conduisent à avoir quatre constituants de base, très solubles, dont les compositions chimiques et cimentières [1], ainsi que leurs proportions volumiques moyennes sont les suivantes :

- silicate tricalcique (50 à 70 %) :  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \Leftrightarrow \text{C}_3\text{S}$
- silicate bicalcique (15 à 30 %) :  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \Leftrightarrow \text{C}_2\text{S}$
- aluminat tricalcique (5 à 15 %) :  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \Leftrightarrow \text{C}_3\text{A}$
- aluminoferrite tetracalcique (5 à 15 %) :  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \Leftrightarrow \text{C}_4\text{AF}$

Les silicates, C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S, sont contenus dans les phases désignées respectivement par alite et bélite. Ces phases contiennent aussi quelques impuretés sous forme d'alcalins, à l'origine de la présence des ions Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup> dans la solution interstitielle, ou de traces de métaux lourds. Ces derniers ont pour origine les combustibles utilisés dans le four. Quelques études ont permis de comprendre les mécanismes de piégeage dans la matrice cimentaire ou de relargage dans l'environnement extérieur de ces métaux lourds lors du comportement à long terme de bétons, mortiers ou ciments, soumis à une lixiviation [2, 3]. A ce clinker il est ajouté du gypse ( $\text{CaSO}_4 : 2\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{CSH}^-_2$ ) et d'autres ajouts normalisés. Le tableau I.2 donne les compositions chimiques moyennes de ces ajouts. Dans la suite de l'étude, sauf indication contraire, nous ne traiterons que le cas du ciment dit Portland CEM I, c'est à dire du clinker complété par du gypse simplement.

Tableau I.1 – Classes des ciments selon la norme NF EN 197-1

Principaux types	Notation des produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse) <sup>a)</sup>										Constituants secondaires	
			Constituants principaux											
			Clinker K	Laitier de haut fourneau S	Fumée de silice D <sup>b)</sup>	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné T	Calcaire			
Naturelle P	Naturelle calcinée Q	Siliceuse V				Calciq W	L	LL						
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland composé <sup>c)</sup>	CEM II/A-M	80-94	6-20										0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35										0-5
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique <sup>c)</sup>	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5	
CEM V	Ciment composé <sup>c)</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-	-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50		-	-	-	-	-	0-5	

a) Les valeurs indiquées se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires

b) La proportion de fumée de silice est limitée à 10%

c) Dans le cas des ciments Portland composés CEM III/A-M et CEM III/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux, autres que le Clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment (voir un exemple à l'article 8)

Tableau I.2 – Composition massique des principaux composants d'un ciment [%]

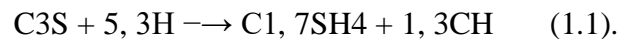
Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	SO <sub>3</sub>	Densité
Ciment CEM I	22,75	2,7	1,9	0,15	67,1	0,20	0,85	2,1	3,15
Fumée de silice	95,00	2,3	0,15	0,1	0,01	0,06		0,006	2,2
Cendres volantes	48,70	27,9	9,5	1,5	2,4	4,2	1,6	1,2	2,22
Laitiers	33,6	10,4	1,0	0,8	41,9	0,4	8,1	0,02	2,88

#### I.4. Hydratation d'un ciment Portland

L'hydratation d'un ciment Portland peut se résumer, dans une approche simplifiée, à l'hydratation des quatre constituants de base (C3S, C2S, C3A et C4AF). Pour ce faire, nous étudierons d'abord les mécanismes d'hydratation des silicates (C3S et C2S), des aluminates (C3A et C4AF), puis nous aborderons le cas de l'hydratation couplée de ces deux familles d'anhydres pour traiter du cas du ciment Portland.

##### I.4.1 Hydratation des silicates

Les silicates représentent une proportion pouvant aller des 66% à 85% en volume d'un ciment. Les deux espèces de silicates présents dans la phase anhydre du ciment, les silicates tricalcique et bicalcique, ne diffèrent que par la stœchiométrie. Les hydrates produits par la dissolution de ces deux silicates, très solubles, sont des silicates de calcium hydratés, plus communément appelés C – S – H, et de la chaux hydratée, désignée par les cimentiers par CH. Les C – S – H sont des hydrates de stœchiométrie variable. Le rapport entre le nombre de moles de calcium sur celui de silice donne une indication sur cette stœchiométrie. Dans une pâte de ciment hydratée, ce rapport, noté C/S est proche de 1, 7. Les C – S – H précipitent autour des grains de ciment et forment une couche qui ralentit la cinétique de dissolution des anhydres, qui devient contrôlée par la diffusion ionique au sein des hydrates. La portlandite précipite quant à elle dans la solution interstitielle. F. Young [4] propose une équation bilan de l'hydratation du C3S :



L'équation bilan de l'hydratation du C2S est similaire, mais ne produit que 0, 3 moles de portlandite au lieu de 1, 3 pour le C3S. En présence de fumée de silice, la portlandite issue de l'hydratation du C3S et C2S peut être consommée et former à partir de cette silice des C – S – H dont la structure est plus polymérisée et le rapport C/S proche de 1, 1. La cinétique d'hydratation du C2S est beaucoup plus lente que celle du C3S. Par exemple, des études sur des bétons à poudres réactives (BPR) ont montré que le C2S n'est pratiquement pas hydraté par rapport au C3S lorsque le matériau n'évolue plus [5]. A court terme, les silicates hydratés formés proviennent donc majoritairement du C3S, qui a un rôle prépondérant dans les montées en résistance à court terme des bétons. L'hydratation plus lente du C2S, après 28 jours, conduit à l'amélioration des résistances à long terme. Des essais sur de l'alite et de la bélite ont mis en évidence que les résistances à long terme sont comparables et que seule la cinétique d'hydratation est différente [6].

#### I.4.2. Hydratation des aluminates

L'hydratation des aluminates (qui représentent une fraction volumique maximale de 20% du ciment) est très rapide, exothermique, et par conséquent intervient dans les premiers instants de l'hydratation d'un ciment CEM I. Les hydrates formés peuvent être  $C_2AH_8$ ,  $C_3AH_6$  ou  $C_4AH_13$ . Ils précipitent immédiatement autour des grains de ciment et perturbent par conséquent l'hydratation des silicates en limitant la surface de dissolution. Ce phénomène provoque, de plus, une rigidification précoce du matériau, perturbant sa mise en œuvre, limite la quantité de C – S – H et de portlandite formés et pénalise donc les résistances mécaniques à long terme.

#### I.4.3 Le rôle des sulfates dans l'hydratation du ciment

Pour remédier à ce phénomène de fausse prise, les cimentiers incorporent une source de sulfates par l'intermédiaire du gypse. Si cette quantité est bien dosée, ce gypse réagit avec les aluminates pour former des hydrates de sulfoaluminates de calcium : le tri-sulfoaluminate de calcium, aussi connu sous le nom d'ettringite et le monosulfoaluminate de calcium. La précipitation d'ettringite, plus tardive dans le processus d'hydratation, se fait au détriment des hydrates  $C_4AH_n$ , et permet donc aux silicates de s'hydrater "librement". L'équation bilan de l'hydratation de l'aluminate tri-calcique en présence de gypse donne :

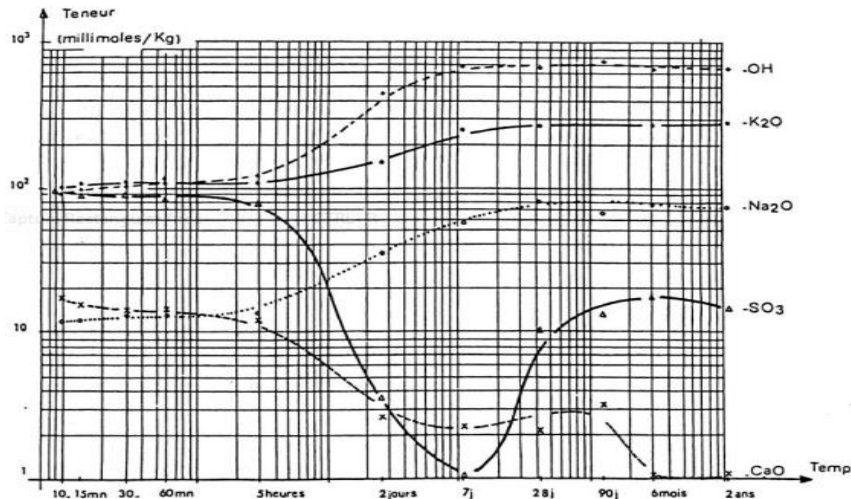


Après quelques jours, cette ettringite formée se dissout partiellement pour former du monosulfoaluminate de calcium.

#### I.4.4 La solution interstitielle

Lors de l'hydratation, l'eau de gâchage se charge en ions. Ces ions ont pour origine les anhydres qui se sont dissous :  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  et gypse. La précipitation des hydrates se produit suivant des processus de germination et croissance de cristaux, en fonction de la concentration des ions de cette solution aqueuse, nommée dans la pâte de ciment hydratée la solution interstitielle. Au cours de l'hydratation de la pâte de ciment, la composition chimique de la solution interstitielle évolue. Cette évolution est à mettre en relation avec les espèces solides présentes, au contact direct avec la solution. Une étude de l'évolution des espèces en solution a été proposée par P. Longuet [7]. Dans la figure I.1, nous voyons une augmentation au cours du temps de la concentration en alcalins ( $Na^+$  et  $K^+$ ), relargués lors de la dissolution des phases alite et bélite, et une diminution globale de la quantité de calcium et de sulfates en solution. L'augmentation de la concentration en sulfates après sept jours d'hydratation est à mettre en relation avec la mise en place d'un nouvel équilibre chimique liée à la formation de monosulfoaluminate au détriment de l'ettringite. La première baisse de la concentration du

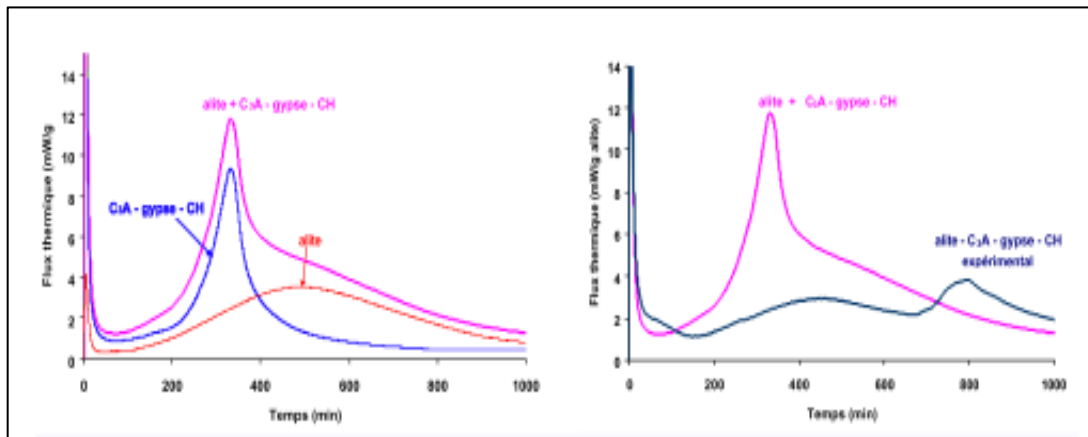
calcium en solution, après pratiquement cinq heures, est reliée à une précipitation de portlandite. La composition de la solution interstitielle pour une pâte de ciment hydratée n'évolue pratiquement plus après six mois d'hydratation et se caractérise par une forte concentration en alcalins (de l'ordre de 100 à 300mmol.l<sup>-1</sup>), un pH très élevé (13, 5 environ en présence d'alcalins) et une concentration en calcium assez faible (1mmol.l<sup>-1</sup>).



**Figure I.1** – Evolution dans les premiers instants de l'hydratation de la composition de la solution interstitielle, d'après P. Longuet et al. [7]

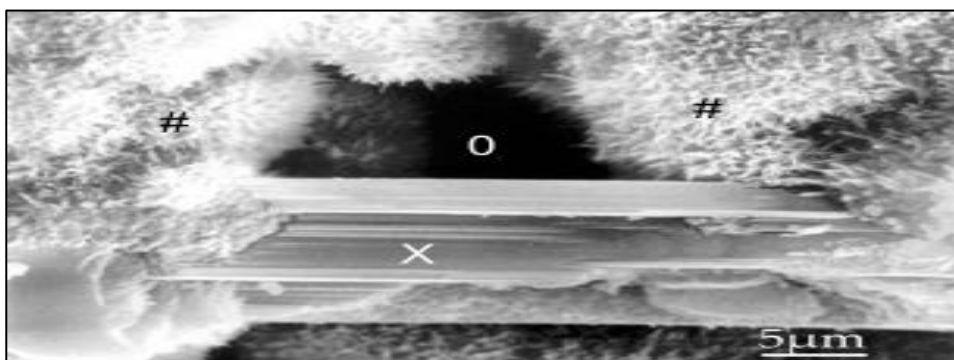
#### I.4.5 Aspects cinétiques de l'hydratation

Même si les composés anhydres sont très facilement solubles, l'hydratation d'un ciment n'est pas instantanée car une multitude de phénomènes physiques et chimiques se mettent en place lors de l'hydratation. Aux tous premiers instants, les anhydres sont au contact de l'eau, leur dissolution contrôle la cinétique d'hydratation. Dès que des hydrates se forment autour des anhydres, la cinétique d'hydratation du ciment devient alors dépendante de la diffusion des ions au sein des couches d'hydrates. La cinétique d'hydratation de chaque phase anhydre ou du ciment peut être caractérisée à partir du flux thermique dégagé par l'hydratation au cours du temps. La figure I.2 à gauche présente les flux thermiques dégagés par l'hydratation de certaines phases au cours du temps. Nous voyons que le flux thermique expérimental est très différent du flux 'théorique', résultant de la somme des flux thermiques de l'alite et du système C3A – gypse – CH pris séparément (figure 1.2 à droite), ce qui illustre bien le fait que la cinétique globale d'hydratation d'un ciment est très fortement influencée par tous les constituants qui composent le ciment.

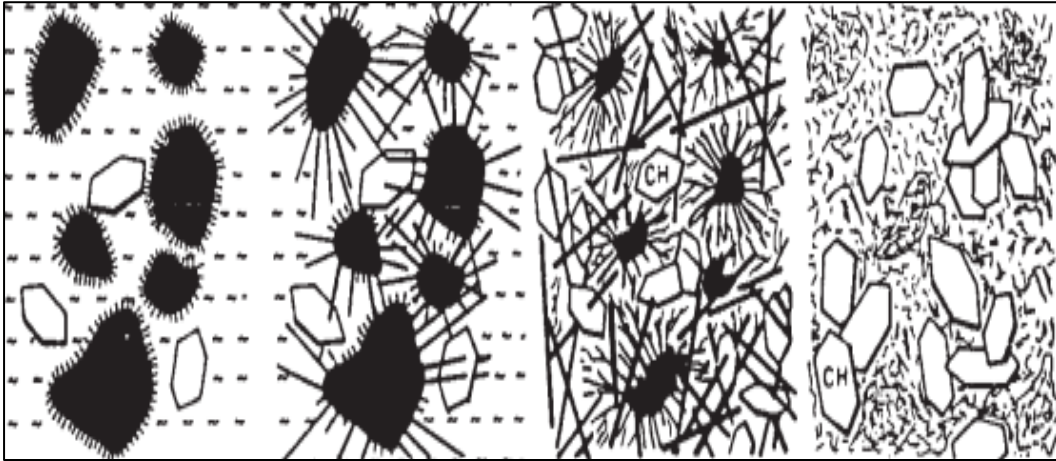


**Figure 1.2** – Courbes de flux thermiques dégagés lors de l’hydratation de l’alite et du système C3A – gypse – CH (à gauche), et comparaison entre le flux théorique, somme des flux des deux systèmes, et le flux thermique expérimental, d’après H. Minard [8]

Si l’on ne s’intéresse qu’au flux thermique dégagé par le système alite - C3A - gypse - portlandite, le premier pic, aux très jeunes âges, est dû à la dissolution des phases lors de la mise en contact avec de l’eau. La précipitation pratiquement instantanée d’hydrates à la surface des grains anhydres conduit à la fin du premier pic et à un ralentissement de la réaction d’hydratation, souvent désigné par période dormante. Le second pic, aux alentours de 800min, correspond à la précipitation de portlandite et la densification des C – S – H dans la matrice cimentaire. Un point important dans la cinétique d’hydratation d’un ciment est le passage du comportement ‘fluide’ au comportement ‘solide’ de la pâte, cet instant est nommé la prise. Elle correspond au moment où il y a une percolation mécanique de phases solides. Cette percolation mécanique est apportée par les hydrates, et en particulier par les C – S – H mais aussi, localement, par la portlandite qui peut jouer le rôle de ponts d’hydrates (figures I.3 et I.4).



**Figure I.3** – Cristal de portlandite (X) entre des(C – S – H), d’après La porosité est repérée par (O). [9]

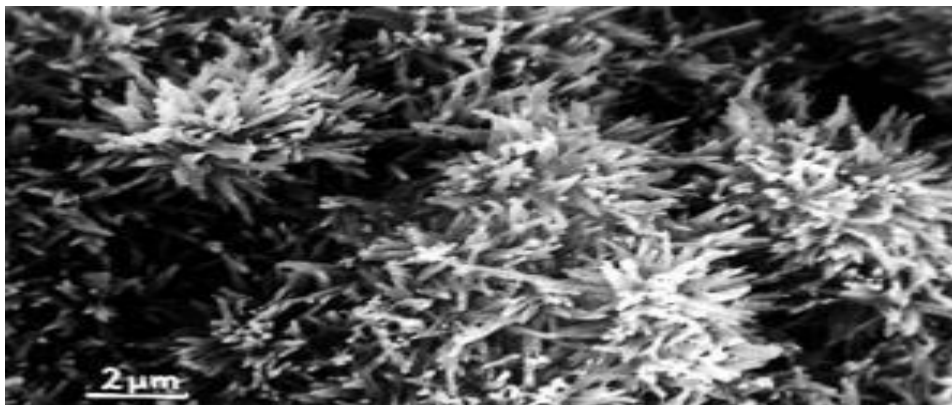


**Figure I.4** – Formation et croissance des hydrates au cours de l’hydratation d’une pâte de ciment, d’après F.W. Locher [9]

## I.5. Microstructure d’une pâte de ciment hydratée

### I.5.1 Description des hydrates formés

Les silicates de calcium hydratés (désignés par C – S – H), issus de l’hydratation des phases alite et bélite, représentent en volume 50 à 60% des hydrates formés dans un ciment Portland. Le terme C – S – H désigne une famille de silicates de calcium, mal structurés et de stœchiométrie variable, ce qui la distingue dans la pâte de ciment par rapport aux autres hydrates, cristallins, tels que la portlandite. Dans une pâte de ciment, les C – S – H ont une structure fibreuse (figure I.5).



**Figure I.5** – Vue au microscope électronique à balayage de C – S – H dans une pâte de ciment hydratée, d’après [9]

La formation des C – S – H dans une pâte de ciment peut avoir plusieurs origines. Les C – S – H peuvent être issus de l'hydratation des C3S ou C2S et avoir un rapport C/S proche de 1,7 ou aussi bien être issus de la réaction de la portlandite avec de la fumée de silice et avoir un rapport C/S plutôt proche de 1,1. Ce deuxième C – S – H est dit pouzzolanique.

Dans une pâte de ciment, et dès les premières secondes la formation du C – S – H a lieu à la surface des grains de clinker, à partir des ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{SiO}_2^-$  et  $\text{OH}^-$  fournis par la dissolution de l'alite et de la bélite [9]. Ce C – S – H a initialement un rapport C/S proche de 1,1. La porosité de cette couche conduit à contrôler par diffusion la vitesse de dissolution des anhydres. Après formation de cette "couche" deux types de C – S – H se forment :

À l'extérieur de cette couche un C – S – H en forme d'aiguilles nommé outer product est formé à partir des ions en solution tandis qu'à l'intérieur de cette couche, "en remplacement" des anhydres, se forme un C – S – H plus dense que l'outer product, l'inner product.

En laboratoire la synthèse des C – S – H peut se faire par des suspensions où l'on fait réagir de la portlandite et de la fumée de silice, ou bien du  $\text{CaCl}_2$  avec du  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Cette deuxième réaction conduit à former des C – S – H de rapport C/S proche de 1 et du chlorure de sodium. La structure des C – S – H est assez complexe.

Son étude à l'échelle nanométrique peut expliciter le comportement physico-chimique des C – S – H et en particulier sa stœchiométrie variable. La synthèse en laboratoire des C – S – H de rapport C/S proche de 1 et leur étude, notamment par observation au Microscope Electronique à Transmission (MET) (figure I.6), a révélé la structure lamellaire et permis de confirmer l'existence d'un analogue naturel de ces C – S – H, la tobermorite, structure proposée par H.F.W. Haylor [6]. Elle peut aussi se former dans des ciments ayant subi un autoclavage. La tobermorite a une structure lamellaire, dite drierketten, composée de plans de CaO et de tétraèdres de  $\text{SiO}_4$  (figure I.6). Les tétraèdres de silice liés aux plans de calcium sont parfois reliés entre eux par d'autres tétraèdres dits pontants et forment des chaînes de silicates.

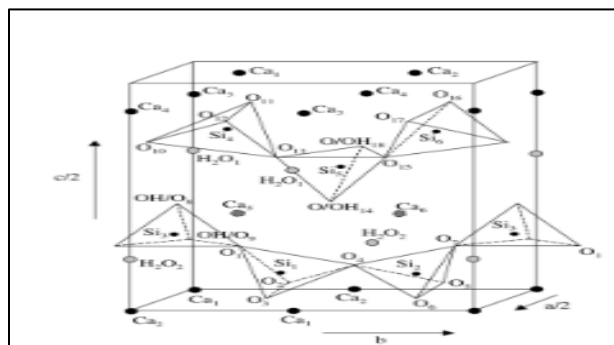
Cette représentation donne une bonne idée de la structure d'un C – S – H de rapport C/S faible mais ne permet pas d'expliquer les changements de composition d'un C – S – H, lorsque le rapport C/S augmente, par exemple.

La Résonance Magnétique Nucléaire du silicium (RMN  $^{29}\text{Si}$ ) donne des informations quantitatives sur la connectivité des atomes de silice dans un matériau considéré. Cette connectivité correspond au nombre de liaisons communes avec d'autres tétraèdres de silice. Par RMN  $^{29}\text{Si}$ , des pics distincts sont observables, et sont reliés aux connectivités de type Q0, Q1, Q2 ou Q3 (figure I.8). Les tétraèdres de silice de type Q1 sont liés au plan de CaO et situés aux

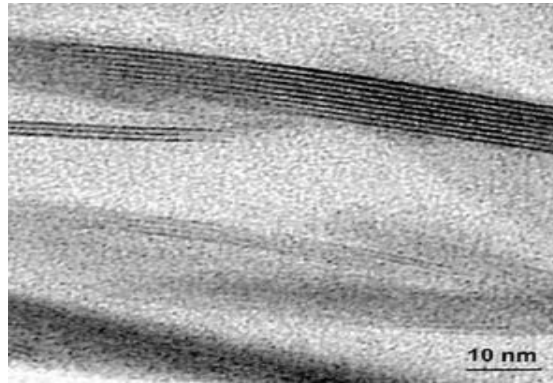
bouts des chaînes silicatées. Les tétraèdres de type Q2 sont soit situés sur un plan de CaO et liés à des Q1 et à un tétraèdre pontant (notés Q2i ou Q2v), soit des tétraèdres pontants (notés Q2p). Le suivi de la connectivité de la silice, et en particulier le ratio des pics Q1/Q2 permet donc d'évaluer la longueur des chaînes silicatées et par conséquent en déduire une évolution de la structure des C-S-H, en termes de rapport C/S (figure 1.9). De par leur grande surface spécifique, conséquence de la structure en feuillets, les C - S - H sont susceptibles de fixer d'autres espèces que la silice. Par exemple, des ions aluminium peuvent se substituer au silicium dans les tétraèdres pontants, ce qui a été observé par RMN [9] pour des matériaux lixiviés. Dans les espaces interlamellaires l'aluminium peut aussi se substituer au calcium lorsque le rapport C/S est supérieur à 1. De même, lors de l'attaque sulfatique [9] des sulfates peuvent se fixer sur les C - S - H.

### I.5.1.1. Les sulfoaluminates de calcium

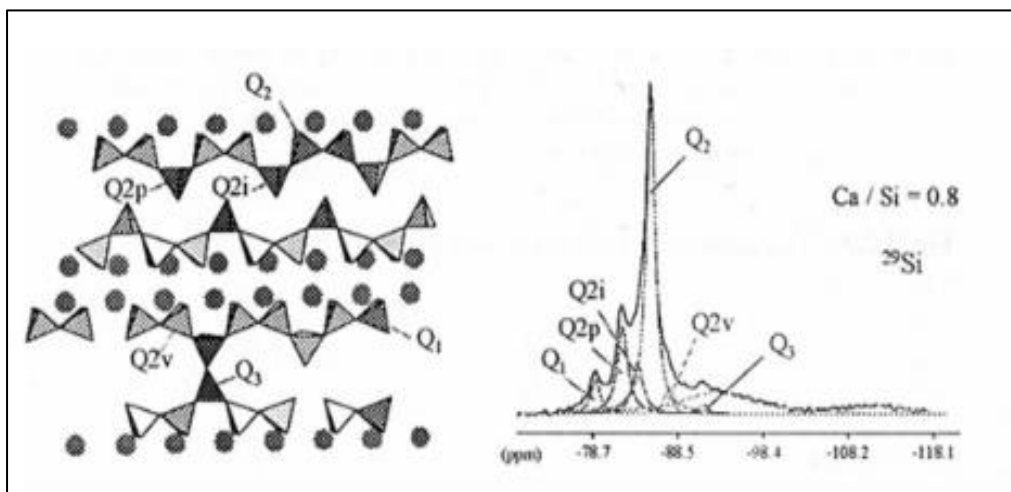
Ils sont issus de l'hydratation de l'aluminate tricalcique et de l'alumino ferrite tetra-calcique en présence de gypse. Dans les premiers instants, seule l'ettringite (tri-sulfoaluminate de calcium) se forme, par précipitation dans le réseau poreux. Des observations au microscope électronique à balayage mettent en évidence une structure composée de fibres fines et aléatoirement orientées. La formation de monosulfoaluminate de calcium intervient plus tardivement dans le processus d'hydratation et précipite dans les pores suite à l'hydratation du C3A et à la dissolution de l'ettringite préalablement formé (qui devient vis-à-vis du monosulfoaluminate la source d'ions sulfates lorsque tout le gypse a été consommé).



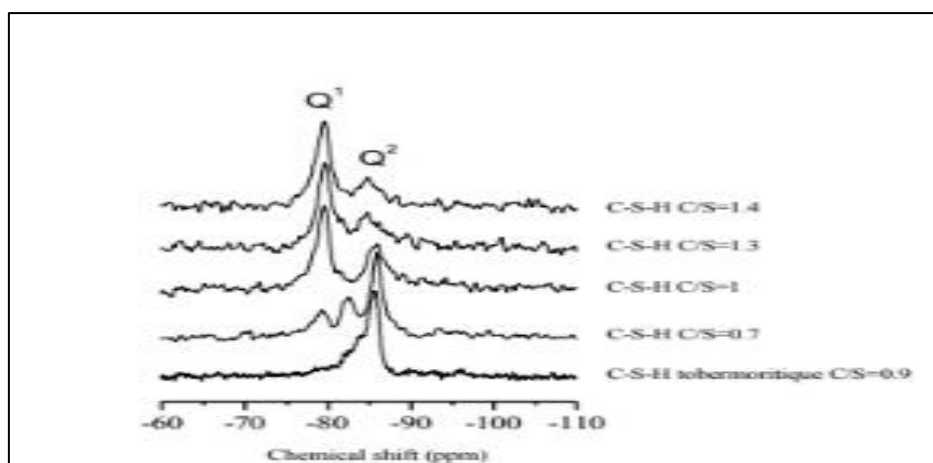
**Figure 1.6** – Image au microscope électronique à transmission d'un C - S - H de synthèse dit tobermoritique (Photo C. Clinard, d'après [10])



**Figure 1.7** – Représentation dierketten de la tobermorite, analogue naturel des C – S – H de rapport C/S faible, d’après S.A. [1]

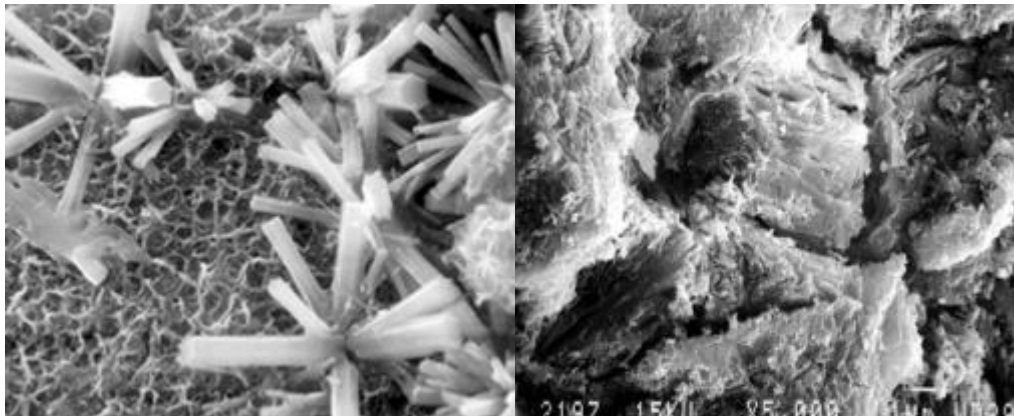


**Figure 1.8** – Connectivités des tétraèdres de silice et réponses sur le spectre de Résonance Magnétique Nucléaire du silicium, d’après I. Klur [1]



**Figure 1.9** – Spectres de résonance magnétique nucléaire du silicium pour des C – S – H à différents rapports C/S, d’après N. Lequeux [1]

L'ettringite issue de l'hydratation du ciment est souvent désignée ettringite primaire. De par sa structure en aiguilles (figure 1.10 à gauche), son volume molaire est important et est bénéfique au comportement mécanique de la pâte de ciment en contribuant à assurer une résistance mécanique aux jeunes âges et à diminuer la porosité capillaire. La formation d'étrangéité peut se faire aussi à long terme dans une matrice cimentaire durcie. Deux origines d'étrangéité différée sont actuellement connues. D'une part, l'étrangéité différée peut se former par la transformation du monosulfoaluminate ou par l'hydratation du C3A résiduel suite à l'apport d'ions sulfates provenant de l'environnement extérieur. D'autre part, suite à une cure thermique pour accélérer les processus d'hydratation, ou dans les structures massives en béton, si la température au cœur du matériau est trop importante et dépasse 80°C, l'étrangéité primaire se dissout puis reprécipite après le refroidissement du matériau cimentaire durci. Dans les deux cas, la précipitation d'étrangéité se fait dans un milieu durci et confiné et peut générer des contraintes puis une expansion au sein du matériau cimentaire. Des observations au microscope électronique à balayage mettent en évidence une forme d'étrangéité massive (figure I.10 à droite), remplissant intégralement des pores, puis initiant des fissures. Pour éviter ces désordres microstructures qui pénalisent le fonctionnement du matériau, des prescriptions conduisent à limiter la température de cure à 65°C et, en fonction de l'environnement extérieur, à limiter la teneur en aluminates dans le ciment.



**Figure I.10** – Observations au microscope électronique à balayage d'aiguilles d'ettringite dans un ciment au laitier [9] et d'ettringite massive dans des pâtes de ciment [10]

### **I.5.1.2 Description du réseau poreux**

La porosité initiale est implicitement définie à partir de la quantité d'eau qui est utilisée pour hydrater le ciment, autrement dit du rapport E/C. Pour des raisons de mise en œuvre et dans un béton courant, la quantité d'eau introduite est supérieure à la quantité d'eau stœchiométriquement nécessaire à l'hydratation totale du ciment. De ce fait, même à hydratation complète, il reste nécessairement une phase aqueuse au sein de la microstructure de la pâte de ciment. Cette phase aqueuse peut s'évaporer et être remplacée partiellement par une phase gazeuse. De ce fait, une pâte de ciment est obligatoirement poreuse. Suivant les matériaux cimentaires, la quantité et la distribution de la porosité peuvent varier. Un diagramme de distribution de la porosité de pâtes de mêmes ciments mais avec différents rapports E/C (figure 1.11) a été proposé par G.J. Verbeck et al [10].

Ce diagramme montre la présence de deux pics de distribution de la porosité, mettant en valeur deux classes de porosité dans une pâte de ciment hydratée

Une première porosité, dite porosité capillaire, a une taille de pores comprise entre 0,1 et 10  $\mu\text{m}$ . Cette porosité est un "reliquat" de la porosité initialement introduite lors de la définition du rapport E/C. C'est au sein de cette porosité que la plupart des phénomènes de dissolution ou précipitation de phases solides se produit, ou que l'échange d'espèces par diffusion avec l'environnement extérieur se fait. Cette porosité peut être partiellement ou totalement connectée. Une étude statistique de percolation dans un réseau 3D composé de mailles cubiques de 1  $\mu\text{m}$  de côté a mis en évidence un seuil de percolation de la porosité pour une valeur d'environ 18%. Des essais de diffusivité confirment l'ordre de grandeur de cette porosité limite. La porosité capillaire d'une pâte de ciment de rapport E/C = 0,65 est d'environ 30% alors que pour un béton de poudres réactives elle est plutôt proche de 4% [5].

Les essais de porosimétrie mettent aussi en évidence une porosité nanométrique. Cette porosité est due à la porosité intrinsèque de certains hydrates et en particulier les C – S – H qui ont une structure lamellaire, mise en évidence par des observations au Microscope Electronique à Transmission (figure 1.6) et illustrée dans le modèle de R. Feldman et P. Sereda (figure I.11). La porosité nanométrique comprend aussi bien l'espace interfeuille des C – S – H que les vides créés par l'empilement parfois irrégulier des lamelles de C – S – H. L'ordre de grandeur de ces pores est de 0,1 à 10 nm. A cette échelle, les effets surfaciques tels la pression capillaire ou l'absorption dans les pores sont prépondérants devant les phénomènes de transport tels que le transport diffusif. Powers a évalué à 28% la porosité comprise au sein du gel de C – S – H [10].

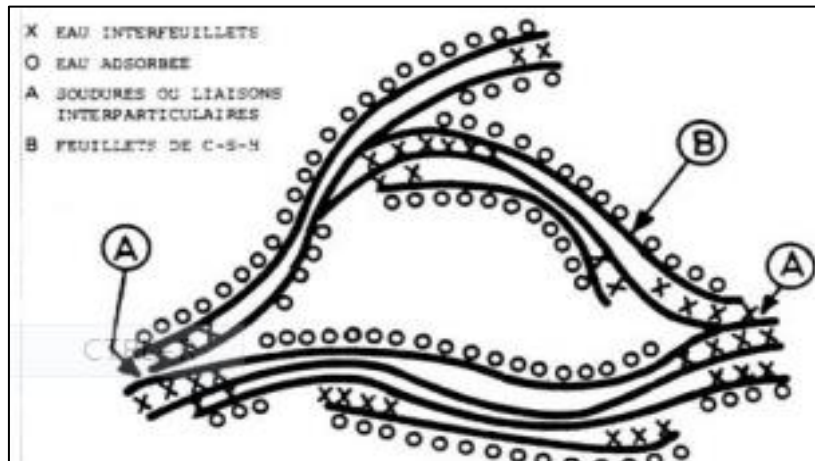


Figure I.11 – Schématisation de la structure des C – S – H, d’après R. Feldman et P. Sereda [10]

## I.6. Influence des facteurs hydratation sur la propriété mécanique et la durabilité des matériaux cimentés :

### I.6.1. Influence du type de liant

Le type de ciment utilisé a une influence non négligeable sur la carbonatation. Les additions ne se carbonatent pas toutes de la même façon. De nombreux auteurs ont démontré qu’un béton à base de laitier de haut fourneau conduira à une profondeur de carbonatation plus élevée du fait d’une plus faible quantité de portlandite formée par rapport à un béton à base de CEM I (à E/C équivalent). On observe le même phénomène dans le cas de bétons contenant des cendres volantes. Khan et al ont montré que la profondeur de carbonatation augmente de façon linéaire avec la quantité de cendres volantes contenue dans le béton. Ceci peut être expliqué par la plus faible quantité de portlandite dans ce type de béton due aux réactions pouzzolaniques ayant lieu lors de l’hydratation du laitier ou des cendres volantes. La portlandite joue un rôle de régulateur au sein de la matrice cimentaire.

Le pH baisse d’autant plus rapidement que la quantité de portlandite est faible. a lui aussi observé une augmentation de la profondeur de carbonatation lors de la substitution du ciment par les additions de types cendres volantes et fumées de silice pour des bétons dont le rapport E/L était égal à 0,5. Concernant l’ajout de fumée de silice, la problématique de la consommation de portlandite lors de l’hydratation reste la même donc on pourrait penser que le front de carbonatation augmente avec la teneur en fumée de silice. Cependant, les fumées de silice sont utilisées pour la fabrication de béton à hautes voire très hautes performances et donc pour des bétons dont le E/L est très faible et le dosage en ciment très élevé. L’effet chimique des réactions pouzzolaniques consommatrices de portlandite est alors compensé par l’effet

physique de la matrice très compacte des bétons à hautes performances. Quel que soit le type d'addition, pour les bétons ayant un rapport E/L suffisamment faible, la compacité de l'enrobage pourra compenser la consommation de la portlandite par les réactions pouzzolaniques ce qui ne sera pas le cas des bétons ayant un rapport E/L élevé. Kulakowski et al.

ont démontré que pour des rapports E/L inférieurs ou égal à 0,50 la carbonatation est contrôlée par la porosité du matériau et non pas par la quantité de portlandite carbonatable (ou autrement dit le type de liant) dans le cas où le taux de substitution de ciment portland par des additions pouzzolaniques est de l'ordre de 20 %. D'autres auteurs affirment que la quantité de substitution du ciment en fumée de silice peut aller jusqu'à 50 % sans que cela affecte la résistance à la carbonatation du béton dans le cas de bétons à hautes performances (E/L = 0,32) [13].

La compétition entre l'effet de protection chimique du type de liant et l'effet de protection physique de la compacité des bétons dépend du niveau de compacité des bétons.

### **I.6.2. Influence des paramètres de fabrication et de conservation du béton**

La mise en œuvre du béton et sa cure jouent aussi un rôle important sur la pénétration du dioxyde de carbone dans la matrice cimentaire.

En effet, la compacité du béton est fortement influencée par la vibration de celui-ci lors de sa fabrication. Plus le béton sera mis en moule et vibré correctement plus la matrice sera compacte et donc plus la vitesse de pénétration du CO<sub>2</sub> dans le béton sera lente [14].

Concernant la cure, il a été montré qu'une cure adaptée améliore la résistance du béton à la carbonatation. La cure a pour objectif de favoriser l'hydratation du liant et donc d'augmenter la quantité d'hydrates susceptibles d'être carbonatés. Il est plus facile d'évaluer l'impact de la cure sur des bétons à base de liants composés étant donné leur cinétique d'hydratation plus lente. [15].

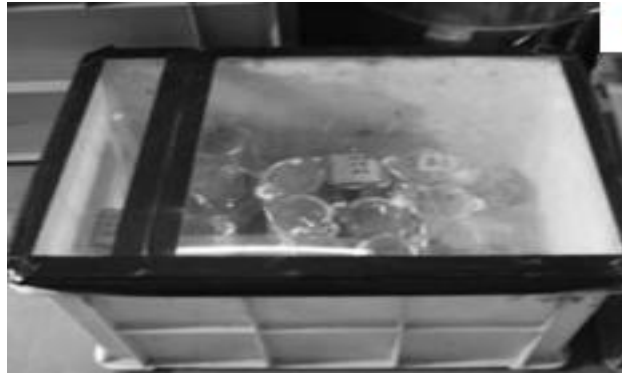


Figure I.12 : conservation d'éprouvette de béton (la cure)

### I.6.3. Influence des facteurs environnementaux

En Algérie, les agents agressifs les plus fréquents sont les sels de chlorures, provenant des embruns marins présents sur toute la bande littorale du fait de la proximité de la mer méditerranée, le dioxyde de carbone  $CO_2$  dans l'atmosphère provenant des émissions de gaz, ces deux agents peuvent provoquer, [10], les pathologies suivantes :

#### I.6.3.1. La corrosion des armatures

Les produits de la corrosion étant expansifs ils provoqueront dans un premier temps la fissuration du béton de peau puis son éclatement. Deux autres effets nuisibles pour la sécurité de l'ouvrage se produisent : la perte de section utile combinée à la perte d'adhérence.

#### I.6.3.2. Action de la carbonatation :

La carbonatation entraîne des modifications notables dans la structure du matériau. Le dioxyde de carbone  $CO_2$  qui pénètre dans le béton se dissout dans l'eau qu'il contient et réagit avec l'hydroxyde de calcium  $Ca(OH)_2$ , sous forme de portlandite, ou les silicates de calcium hydratés, pour former du carbonate de calcium  $CaCO_3$ . Ce phénomène est appelé carbonatation et il entraîne une diminution du pH de la solution interstitielle. Lorsque le front de carbonatation atteint les armatures celles-ci sont dépassées. La couche de passivation n'étant stable qu'en milieu basique, la corrosion des armatures peut débuter.

Insistons sur le fait que la carbonatation n'altère pas forcément les propriétés mécaniques et de transfert du béton— il semble même qu'elle les améliore dans certains cas. En fait elle met en danger uniquement les armatures si elles sont atteintes par le front de carbonatation.

La vitesse du front de carbonatation dépend de la perméabilité au gaz du béton car le  $CO_2$  pénètre par la porosité du béton mais également de la teneur en humidité du béton. Une humidité relative de 50% est favorable aux réactions, [15].

### **I.6.3.3. Action des ions chlorures**

Les ions chlorures vont se propager dans le réseau poreux du béton d'enrobage véhiculés par l'eau. S'ils atteignent les armatures en quantité suffisante, appelée concentration critique, les aciers vont alors être dépassivés et la corrosion va débiter en présence de dioxygène puis se propager.

Une concentration critique est donc nécessaire pour que la dépassivation débute. Ce taux limite est fonction du ratio entre les ions chlorures et les ions hydroxydes présents dans la solution interstitielle et du traitement de surface des armatures. Des approches utilisées pour établir ces prévisions reposent sur des modèles simples de prévision, déterministes, ou sur des modèles faisant appel à des notions de fiabilité, incluant le plus souvent un modèle de coût de cycle de vie. On peut alors prédire l'évolution dans le temps des indicateurs de durabilité et les comparer à des valeurs seuils. Tous ces modèles ont besoin de données de référence, qualifiant :

- (a) La géométrie et l'état de l'ouvrage au moment de l'inspection ;
- (b) Les propriétés qui en conditionneront l'évolution, [15]

### **I.6.3.4. Gonflement due à la présence de sulfates**

L'eau de mer est chargée en ions sulfates. Ces ions ne sont pas passifs vis à vis de la matrice cimentaire.

Les modes d'action des sulfates dans le béton sont complexes, nombreux, et pas tous encore identifiés. Cependant la formation de certains composés chimiques a permis d'expliquer le gonflement résultant de la pénétration des ions sulfates. Les sulfates, véhiculés par l'eau, en pénétrant dans les bétons véhiculés par l'eau vont réagir chimiquement avec la matrice cimentaire pour former de nouveaux hydrates qui sont expansifs, ce gonflement entraînant des tensions au sein du béton, tensions engendrant de la fissuration.

Trois types de composés peuvent se former en fonction entre autres de la concentration en sulfate de l'eau, du pH environnant, et de la température : l'ettringite le gypse et la thaumasite.

#### **A. L'ettringite secondaire :**

La formation d'ettringite est fréquemment associée à la description des attaques sulfatiques. Elle se forme à partir de C3A non hydraté quand le béton a déjà durci. Elle peut générer de l'expansion. Le caractère expansif ou non de l'ettringite, lié à sa façon de cristalliser, dépend de la composition de la solution, et en particulier de sa teneur en chaux CaO donc du pH, [15].

## **B. Le gypse**

Le gypse peut résulter de la dissolution de l'ettringite, dans des solutions relativement pauvres en hydroxyde de calcium quand le pH devient inférieur à 11,5-12. Les dommages causés peuvent être de deux types : l'écaillage et le gonflement du béton. Pour évaluer les conséquences de la seule formation de gypse, il était nécessaire d'empêcher la formation d'ettringite, en utilisant des liants sans C3A. On remarque que l'absence de C3A ou d'ettringite par exemple, n'exclue pas l'occurrence d'une attaque sulfatique celle-ci étant dû à la formation de gypse.

**Conclusion :**

La microstructure du ciment est un aspect clé pour comprendre les propriétés et le comportement du matériau. Le ciment est essentiellement composé de grains de clinker, qui sont des agglomérats de silicates, d'aluminates et de ferrites de calcium formés lors de la calcination de matières premières telles que le calcaire, l'argile et le fer. Les grains de clinker sont liés ensemble par une matrice de gel de silice hydraté, qui est formée lorsque le ciment est mélangé avec de l'eau. La microstructure du ciment est donc caractérisée par la taille, la forme et la disposition des grains de clinker et des pores dans la matrice de gel. Ces caractéristiques influencent les propriétés physiques et mécaniques du matériau, telles que la résistance, la porosité, la perméabilité et la durabilité. Des techniques modernes d'imagerie comme la microscopie électronique à balayage et la tomographie aux rayons X ont été utilisées pour étudier la microstructure du ciment avec une précision élevée. En résumé, la compréhension de la microstructure du ciment est essentielle pour optimiser les propriétés et la performance du matériau dans diverses applications de construction et d'ingénierie.

***Chapitre II : influence de la  
température sur les  
caractéristiques des bétons***

## **II.1. Introduction**

L'exposition du béton à une température élevée provoque des modifications physico-chimiques que subissent ses composants (la matrice cimentaire et les granulats), telles que la déshydratation par séchage du béton et la décarbonatation. Ces phénomènes peuvent produire des retraits, des pertes de résistance et de raideur des matériaux.

Pour comprendre le comportement du béton dans des hautes températures, il est nécessaire de connaître les principales modifications physico-chimiques. L'interface pâte-granulats est plus ou moins affectée selon la nature du ciment et des granulats.

## **II.2 Évolution de la microstructure des matériaux à matrice cimentaire en fonction de la température**

### **II.2.1. Rappels sur la microstructure des matériaux à matrice cimentaire**

Les bétons et les mortiers sont des matériaux hétérogènes multiphasiques constitués d'un mélange de granulats et d'une pâte de ciment durcie. La pâte de ciment représente 25 à 40% du volume total du béton. Chaque constituant joue un rôle bien défini, celui de liant hydraulique pour la pâte de ciment, et celui de remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) et source de résistance pour les granulats.

Les granulats occupent 60 à 75% du volume de béton. On distingue trois types de granulats dans les bétons ; le sable : particules de diamètre inférieur à 5 mm, les gravillons entre 5 et 10 mm et enfin, les cailloux dont le diamètre est compris entre 10 et 40 mm.

La prise et le durcissement de la pâte de ciment ou béton sont le résultat d'un certain nombre de réactions chimiques dont le principal est l'hydratation des silicates du clinker accompagnée d'un fort dégagement de chaleur. Les silicates de calcium tricalciques  $3\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  (C3S), et bicalciques  $2\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  (C2S) sont les constituants les plus importants du ciment portland pour les propriétés mécaniques de la pâte durcie.

L'hydratation de C3S et de C2S forme des produits hydratés composés de gel CSH (silicates de calcium hydratés) et de portlandite (hydroxyde de calcium)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Le CSH est un pseudo cristal de forme spongieux, plus ou moins lamellaire. La liaison entre les particules de CSH (responsable de la résistance mécanique de la pâte de ciment durcie) repose sur des forces superficielles ioniques ou covalentes (force de Van Der Waals, forces électrostatiques ou interactions stériques). [16]

La pâte de ciment durcie est un matériau poreux. Les pores qui la composent sont de dimensions et d'origines différentes voir pour illustration (**Figure II.1**) : [16]

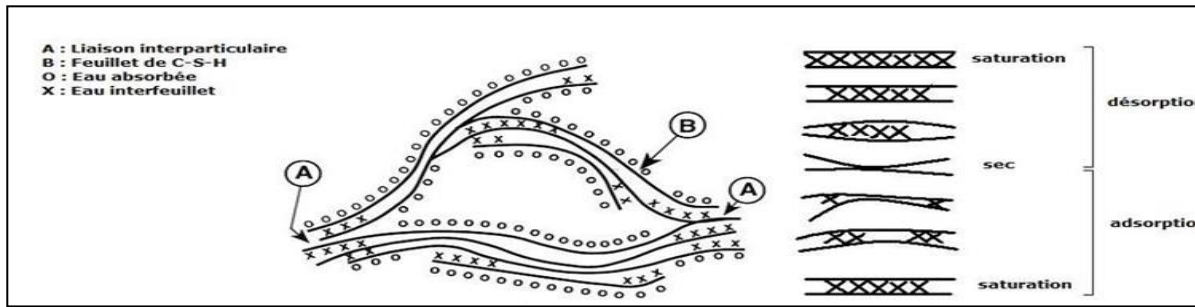


Figure II.1 : Modèle de structuration des particules de CSH. [16]

- Pores capillaires : ils sont formés durant la structuration de la pâte de ciment. Pour un rapport eau/ciment (E/C) donné, leur volume décroît au cours de l'hydratation. Leur diamètre s'échelonne entre 10 nm et 1 µm. Plus E/C est faible, plus les dimensions et le nombre des pores capillaires sont faibles.

- Pores des hydrates : ces pores sont généralement des caractéristiques intrinsèques aux hydrates et leur dimension et leur nombre ne dépendent pas du rapport E/C. Concernant le gel CSH, l'espace poreux est constitué des pores inter-lamellaires (diamètre d'une dizaine d'Angströms) et les pores inter-feuillets qui sont extrêmement fins (diamètre de quelques Angströms).

Le réseau poreux du béton est également constitué :

- Des vides d'air emprisonnés : d'un diamètre de l'ordre du micromètre, leur présence peut être due au malaxage du béton frais ou intentionnellement recherchée par l'ajout d'entraîneur d'air (pour la conception de bétons résistants aux cycles gel/dégel par exemple).

- Des fissures : de quelques dizaines de micromètres (microfissures) jusqu'au millimètre (microfissures) qui peuvent avoir des origines très différentes (plusieurs types de retraits, réactions chimiques internes, dilatations différentielles internes, sollicitations mécaniques, etc.)

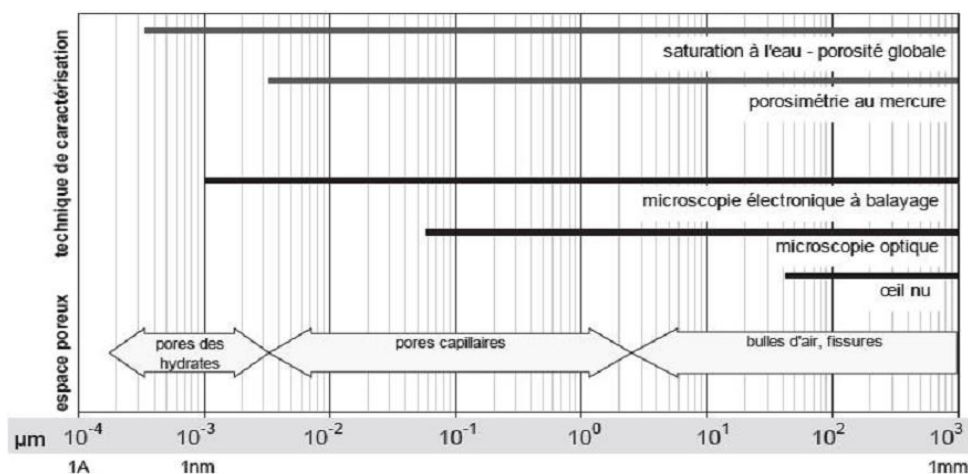


Figure II.2 : Familles des vides dans le béton et domaine d'utilisation des principales techniques de caractérisation des milieux poreux [16].

Il est intéressant de préciser les différentes catégories d'eau qui se trouve dans la pâte de ciment durcie car elle représente le moteur initial des réactions d'hydratation du ciment et garantie la bonne maniabilité du mortier ou béton frais :

- L'eau chimiquement liée : cette eau s'est combinée avec d'autres espèces durant l'hydratation des grains de ciment pour former les hydrates.
- L'eau adsorbée : cette forme d'eau est liée à la surface des pores solides sous l'action de forces intermoléculaires de Van Der Waals et de forces électrostatiques, on parle alors d'adsorption. Les forces d'adsorption décroissent à mesure que l'on s'éloigne du solide.
- L'eau libre (ou capillaire) : il s'agit de la forme condensée d'eau qui remplit le volume poreux dans les zones qui ne sont pas sous l'influence des forces d'adsorption. Cette forme d'eau peut être en équilibre avec la phase gazeuse par l'intermédiaire de surfaces planes ou de ménisques [16]

### **II.2.2. Phénomènes d'éclatements**

Le comportement au feu des éléments de structure en béton est caractérisé par un risque d'éclatement et d'écaillage (**Figure II.3**). Les premières mentions concernant cette dégradation datent des années soixante. Les observations du comportement des bétons à haute température menées par [Harmathy] ont montré que les matériaux chauffés pouvaient présenter, dans certains cas, un comportement explosif. Deux principales raisons de l'éclatement ont été attribuées premièrement aux effets du gradient thermique et la formation de pressions de vapeur d'eau dans le matériau. Il faut noter que ces observations et la théorie développée par [Harmathy] concernent les bétons ordinaires. Ce n'est qu'en 1984 qu'Hertz, en étudiant les propriétés de bétons à haute performance (120 MPa et 170 MPa) soumis aux températures élevées, a observé une forte sensibilité de ces bétons à l'éclatement. L'éclatement des bétons entre 300°C et 350°C a été observé et attribué aux pressions de vapeur d'eau dans ces bétons denses, de porosité limitée. [16]



**Figure. II.3** : Section effondrée du faux plafond dans le tunnel du Gothard après L'incendie du 21 octobre, 2001.

### **II.2.3. Influence de la température sur la pâte de ciment**

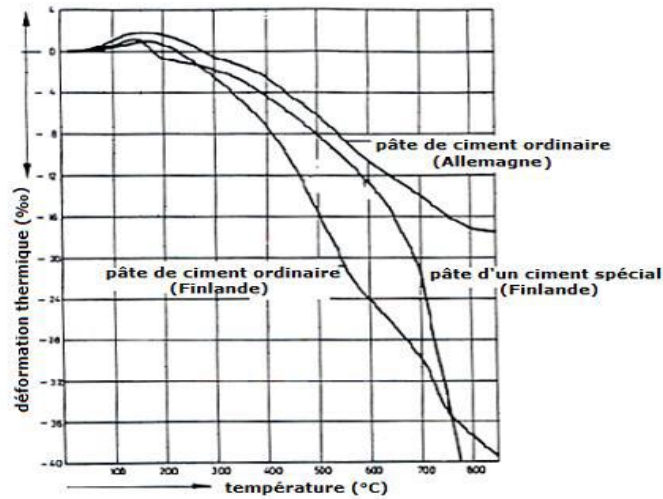
Les principales modifications physico-chimiques se passent dans la pâte de ciment, en raison de la présence de l'eau sous différentes formes dans la structure. Dans la pâte de ciment chauffée, tous les changements commencent par l'évaporation de l'eau libre et de l'eau adsorbée entre 30°C et 120°C et, au-delà de 105°C, on observe les premiers signes de la décomposition des hydrates selon [Hisldorf]. Cependant d'autres travaux, notamment ceux de [Harmathy], montrent que la déshydratation de la pâte de ciment débute dès l'évacuation de l'eau évaporable. [17]

La pâte de ciment hydratée subit une expansion jusqu'à environ 150°C, puis une contraction due à un fort retrait de dessiccation qui mène à la perte d'eau (**Figure II.4**). [17]

Ensuite à partir de 180°C et jusqu'au-delà de 800°C, le gel de CSH se décompose essentiellement en silicate de calcium  $\beta$ C2S,  $\beta$ CS et en eau et la portlandite donne CaO. [17]

A l'aide de la diffraction X, Piasta et al. [Piasta J et al] ont observé un phénomène d'hydratation additionnelle entre 200°C et 300°C. Cette réaction se traduit par une diminution des phases  $\beta$ C2S et C3S ainsi qu'une faible augmentation de la quantité de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . [17]

La porosité de la pâte de ciment à haute température augmente d'une manière parabolique en fonction de la température. Cette augmentation est confirmée par les travaux de Bazant et al. [Bazant Z.P et al], elle est accompagnée d'une évolution de la taille moyenne des pores et du volume poreux total. Ceci est dû en partie à la rupture interne de la structure du gel CSH lors du processus de déshydratation. [17]



**Figure II.4 :** Évolution de la déformation thermique des pâtes de ciment avec La température [17].

#### II.2 .4. Influence de la température sur les granulats

Les granulats constituent, en principe, le squelette inerte du béton aux températures ambiantes (sauf cas pathologique, comme d'une réaction alcali-granat) mais aux températures élevées, leur comportement est totalement différent. Sous haute température, les granulats se décomposent et subissent des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques micro structurales du matériau. La majorité des granulats est généralement stable jusqu' à 600°C. Par contre, les granulats non siliceux peuvent subir des transformations chimiques et des réactions de décomposition à des températures inférieures à 600°C. Une analyse thermique différentielle (ATD) permet de déterminer, par des pics endothermiques et exothermiques, les températures auxquelles une instabilité peut survenir dans les granulats. Les analyses thermogravimétriques (ATG) donnent des indicateurs de la progression des réactions de décomposition en mesurant les variations de masse des granulats au cours du chauffage.

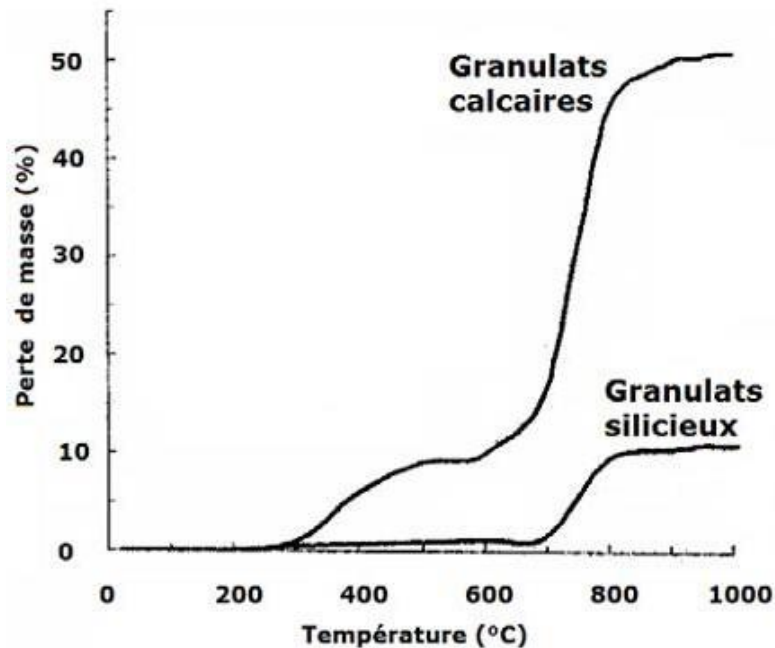
La (Figure II.5) montre les résultats de perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux). [17]

Les résultats d'analyses montrent que les granulats calcaires et siliceux sont relativement stables jusqu'à 500°C. Une autre transformation cristalline est présente entre 500°C et 650°C (Figure II.5). A ces températures, le quartz- $\alpha$  se transforme en quartz- $\beta$  sans changement de masse, en revanche cette transformation s'accompagne d'un gonflement significatif de l'ordre de 1 à 1,4%. [17]

Pour les granulats calcaires, le comportement thermique est plus stable jusqu'à 700°C. Au-delà de cette température, on assiste à la décarbonatation



En phase de refroidissement, la chaux libre (CaO) formée lors de la réaction de décarbonatation, se combine avec l'humidité atmosphérique sous forme de  $\text{Ca(OH)}_2$  avec une augmentation de volume de 44%. Ceci cause la fissuration et l'endommagement destructeur en béton. [17]



**Figure II.5** : Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux) [17]

## **II.2.5. Influence de la température sur la microstructure du béton**

### **I.2.5.1 Interface pâte - granulats**

Dans les bétons ordinaires, l'interface pâte-granulats, appelée aussi l'auréole de transition, est la partie la plus fragile, la plus poreuse et mieux cristallisée que la matrice cimentaire. A haute température, cette partie se dégrade progressivement. Ceci est dû au départ de l'eau (libre, liée, adsorbée) contenue dans les pores et dans les hydrates. Le retrait de dessiccation favorise le développement des fissures et au-delà de 120°C, les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide au niveau de cette zone à cause de la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (expansion). Ces deux évolutions créent à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de déformations induisant des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et de la compression au sein des granulats (**Figure II.6**). [18]



Figure II.6 : Mécanismes liés aux incompatibilités pâte-granulat. [18]

### A. Dégradation de l'interface pâte-granulats

Dans le béton, l'interface pâte/granulats est la partie la plus poreuse et la plus fragile. A haute température, cette partie se dégrade progressivement. Ceci est dû au départ de l'eau adsorbée entourant les granulats, qui favorise le développement des fissures au niveau de cette zone, et à la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats. La pâte de ciment se dilate jusqu'à la température de 150°C. Cette dilatation est supérieure à celle des granulats, donc les fissures se développent à l'interface pâte/granulats par décohesion (fissures tangentielles). Au-delà de 150°C, la matrice cimentaire subit un retrait tandis que les granulats subissent une expansion. Cette dilatation différentielle engendre des fissures radiales au sein de la matrice cimentaire. [18]

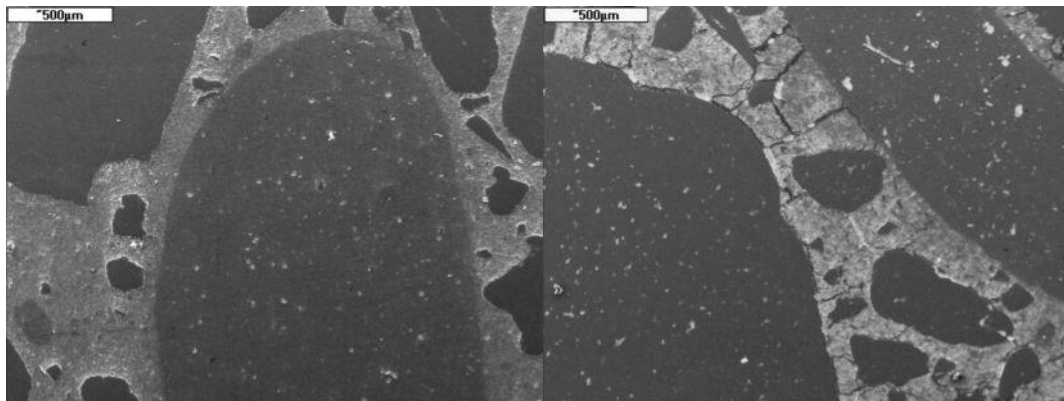


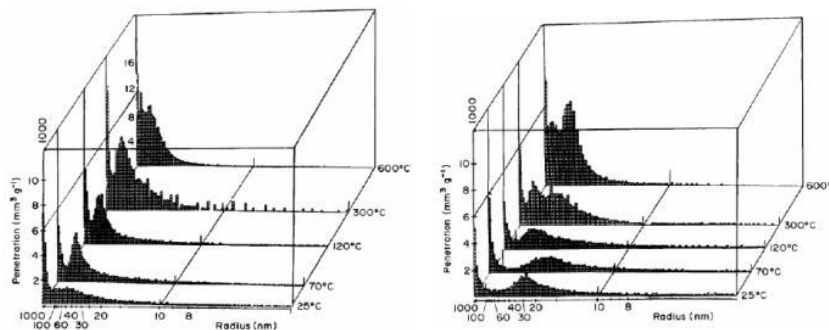
Figure II.7. Comparaison de la structure d'un BHP avant et après L'échauffement à 600°C.[18]

### II.2.5.2. Variation de la porosité

Pour étudier la porosité d'un matériau cimentaire, deux méthodes sont fréquemment utilisées :

**A. Porosité au mercure :** cette technique met en évidence la distribution de la porosité

en fonction de la taille des pores, elle permet de détecter les pores capillaires, dont la taille varie entre 4 nanomètres et quelques microns (7500 nm). L'étude de la variation de la porosité en fonction de la température a été menée par plusieurs chercheurs [Bazant Z.P et al], [Noumowé A] et [Alarcon-Ruiz L et al]. La (**Figure II.8**) présente les distributions des pores au sein d'un béton ordinaire chauffé jusqu'à 600°C par la technique de prosimètre au mercure. La synthèse des résultats obtenus par différents auteurs indique que dans le cas du béton ordinaire, la température engendre une augmentation du volume total ainsi que la dimension des pores. Elle peut être due à la rupture des cloisons capillaires sous l'effet de la vaporisation de l'eau durant le chauffage, ainsi qu'à la microfissuration engendrée par les dilatations différentielles de la matrice cimentaire et des granulats. [19]



**Figure II.8** : Distribution des pores dans les bétons chauffés obtenus par prosimètre au mercure. A gauche BO – à droite BHP. [19]

**C. Porosité à l'eau** : cette technique permet de déterminer le volume de la porosité accessible à l'eau, donc la porosité capillaire. La méthode consiste en la réalisation d'une série des pesés du matériau saturé d'eau, à sec et par pesée hydrostatique. Les résultats des mesures de l'évolution de la porosité totale en fonction de la température réalisée par Kalifa et al. [Kalifa P] par la méthode de saturation d'eau sur un béton ordinaire et un béton à haute performance sont représentés sur la (**Figure II.9**) [19].

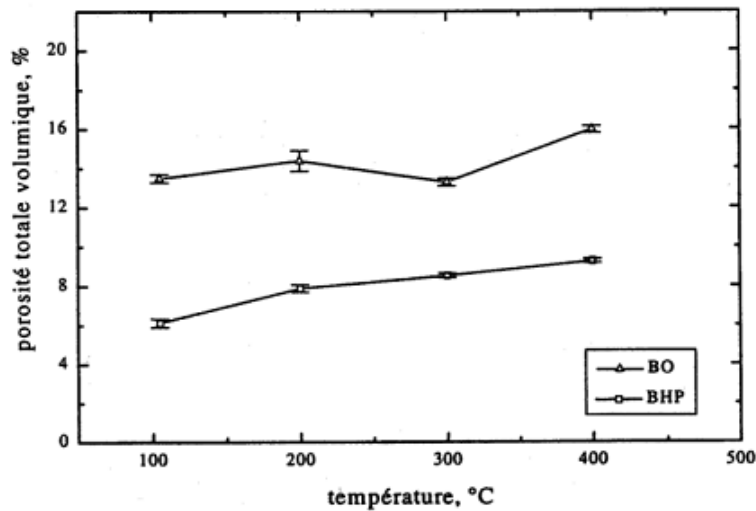


Figure II.9 : Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement. [19]

Entre 105°C et 400°C, la porosité de BHP augmente de 3%. Cette croissance est associée au départ d'eau, qu'elle soit présente dans le réseau ou chimiquement liée.

Kalifa explique que la diminution de porosité du BO entre 200°C et 300°C est associée à la densification due à l'hydratation complémentaire et à une carbonatation de la portlandite en condition d'autoclavage interne, c'est-à-dire sous une pression supérieure à la pression atmosphérique. Par contre, cette densification n'est pas observable dans le BHP qui contient très peu de portlandite grâce à la présence de fumée de silice.

La comparaison des valeurs de la porosité totale déterminée par les techniques d'intrusion de mercure et porosité à l'eau, montre que cette dernière technique conduit aux valeurs de porosité les plus élevées.

### II.3. Effet de la température sur les propriétés mécaniques du béton ordinaire et de haute performance

#### II.3.1. Résistance de compression

La résistance en compression à 28 jours est la principale caractéristique utilisée pour caractériser l'évolution des propriétés mécaniques du béton avec la température. [19]

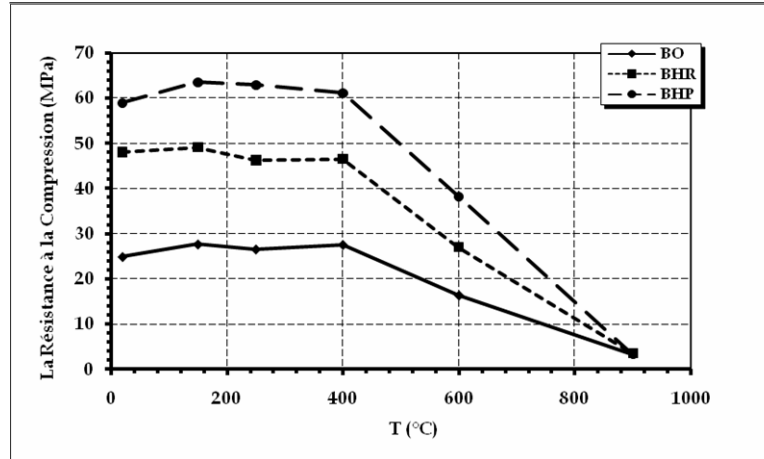


Figure II.10. Evolution de la résistance en compression du béton avec la température [19]

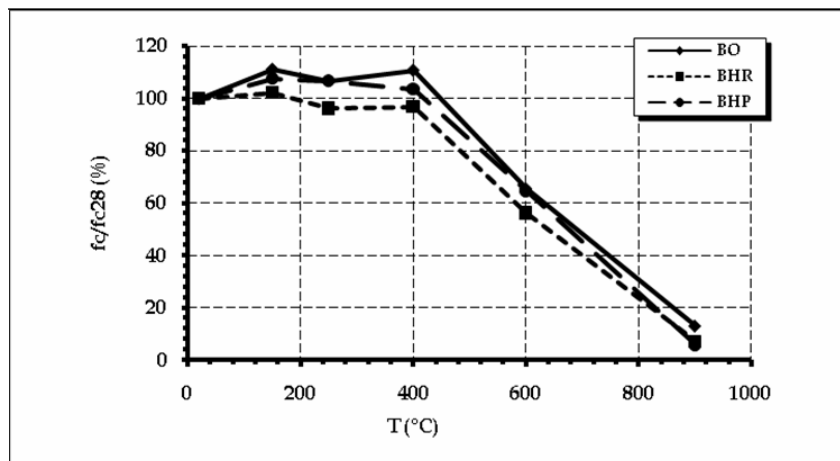


Figure II.11. Evolution de la résistance en compression relative du béton avec la température. [19]

Les figures 10 et 11 présentent les résultats de la résistance en compression résiduelle et relative (normalisée par rapport à la valeur initiale mesurée à 20 °C) des trois types de béton étudié. A partir de ces deux figures, on distingue deux zones de comportement du béton.

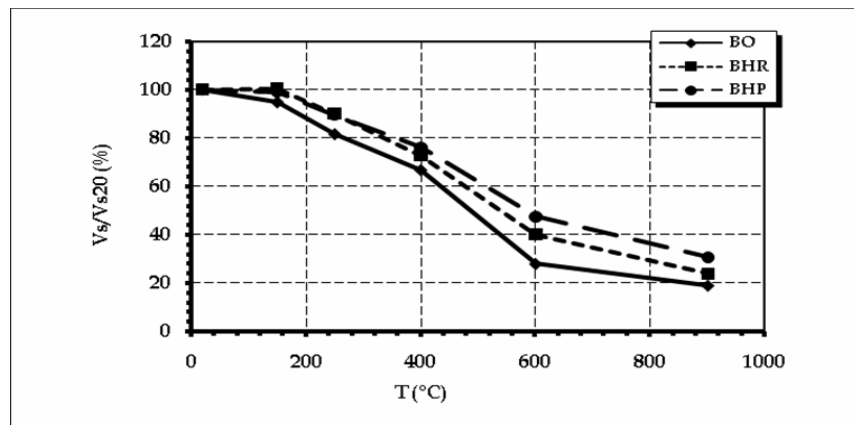
La première zone, qui varie de la température ambiante à 400 °C, on constate une augmentation de la résistance en compression de faible ampleur. Cette augmentation

peu avoir comme origine le départ de l'eau du matériau qui ré-augmente les forces d'attraction par le rapprochement des feuillets de CSH. [19]

Dans la deuxième zone, qui varie de 400 jusqu'à 900 °C, on observe une diminution significative des résistances en compression pour les trois types du béton étudié. Elles demeurent inférieures à 10 MPa lorsque le béton est chauffé à 900 °C.

### II.3.2. La vitesse d'onde longitudinale

L'objectif de cette mesure est d'obtenir le maximum d'informations sur la qualité des bétons soumis à une élévation de température. Dans le cas d'un béton soumis au feu, l'élévation de la température provoque une modification physico-chimique au niveau de la microstructure du matériau. L'auscultation sonique est une méthode bien adaptée à ce type de recherche.



La (figure II.12) présente l'évolution de la vitesse de propagation des ondes longitudinale mesurée sur les différents échantillons du béton étudié après l'exposition à différentes températures d'essai.

Figure II.12. Evolution de la vitesse des ondes soniques avec la température [20].

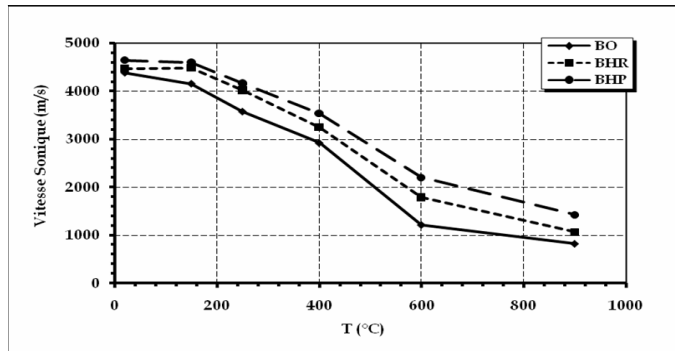


Figure II.13. Evolution de la vitesse des ondes soniques relatives avec la température [20].

La figure montre une diminution progressive des valeurs de la vitesse de propagation des ondes avec l'augmentation de la température. On peut constater que les valeurs de la vitesse de propagation des ondes sonores est presque stable dans la gamme de température de 20 jusqu'à 150 °C, ceci peut être expliqué par l'absence des fissures dans la matrice cimentaire. [20]

A partir de 150 °C, les valeurs de la vitesse de propagation des ondes soniques diminuent progressivement avec l'augmentation de la température, cela peut-être expliqué par l'apparition des microfissures et puis la macro fissure dans la matrice cimentaire et l'augmentation de la porosité à cause de la déshydratation de la pâte de ciment. [20]

### II.3.3. Perte de masse

Les courbes de la perte de masse relative des bétons étudiés ont été rassemblées sur la figure 14. Les valeurs de perte de masse relative ont été représentées en fonction de la température.

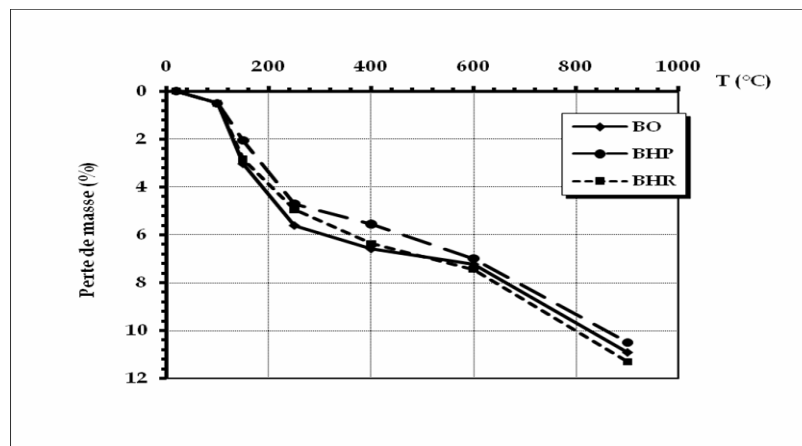


Figure II.14. Evolution de la perte de masse avec la température.

On observe qu'avant 150 °C, la variation de la masse est très faible, elle est très lente pour le BHP par rapport au BO. La perte de masse dans ce domaine de température correspond à un départ d'eau libre contenue dans les pores du béton. Puis elle augmente entre 150 et 250 °C. Celle-ci correspond au départ de la totalité de l'eau libre, capillaire ou liée chimiquement. Chacun des bétons perd environ 5 % pour le BHP et 6 % pour le BO de sa masse initiale. Entre 300 et 500 °C, la variation de la masse devient faible. Puis elle augmente à partir d'une température supérieure à 600 °C. [20]

En comparant l'évolution de la résistance à la compression avec celle de la perte de masse, nous pouvons constater que les baisses de résistance à la compression entre 200 et 300 °C interviennent avec des pertes de masse significatives dans cet intervalle de température. Entre 300 e 400 °C, on observe une légère augmentation de la résistance à la compression. Celle-ci correspond à une perte de masse modérée. Une augmentation de la perte de masse accompagnée d'une chute de résistance est très significative au-delà de 400 °C. Ceci peut être expliqué par une modification de la structure du béton due à la différence du coefficient de dilatation thermique de la pâte de ciment et des granulats, l'augmentation de la porosité, l'apparition de micro et macro fissures et la décomposition du granulat à des températures supérieure à 550 °C. [21]

#### **II.4. comportement au feu du beton**

Le feu est un phénomène qui occasionne chaque année des pertes importantes en vies humaines et en biens matériels. Les causes des incendies sont très diverses, de l'imprudence au court-circuit. Aussi, le mode de construction des bâtiments, leur conception vis-à-vis de la propagation du feu et le choix des matériaux sont très importants dans la limitation des conséquences, notamment dans les immeubles collectifs, les établissements recevant du public ou les établissements classés.

La réglementation s'est progressivement étoffée pour fixer aujourd'hui un ensemble d'exigences portant sur la conception des bâtiments et sur le choix des matériaux, dont le comportement est mieux apprécié grâce à l'expérience acquise lors d'incendies réels et par des recherches en laboratoire, [21]

Les qualités de résistance mécanique, de facilité d'utilisation, de durabilité et la très bonne tenue au feu, font du béton le matériau de construction par excellence. Mais lorsqu'il est exposé au feu, le béton perd graduellement sa résistance mécanique et il se dégrade régulièrement de

l'extérieur vers le cœur. Cependant, ce processus de dégradation est suffisamment lent et progressif pour permettre un maintien de la stabilité des structures pendant un laps de temps, le plus souvent, suffisant à l'évacuation des personnes, mais aussi, pour permettre de retrouver après extinction de l'incendie un ouvrage endommagé mais réparable.[21]

Les dégradations de béton par incendie sont relativement rares pour les ouvrages d'art et affectent d'avantage les bâtiments. A titre d'exemple, l'incendie du gratte-ciel Windsor de 29 étages à Madrid, la tour est restée debout malgré le feu qui s'est propagé à de nombreux étages. Le feu à démarrer au 21<sup>ième</sup> étage et s'est rapidement propagé, il s'est achevé après 26 heures de lutte laissant un bâtiment complètement brûlé. [21]

Néanmoins, il existe quelques cas d'incendie sous des ponts en béton qui ont provoqué un endommagement significatif du matériau. Le viaduc des trois Fontaines, construit en 1981 à Bruxelles, a subi l'agression d'un large feu localisé durant la nuit du 6 au 7 décembre 2003. Une température de 750°C été atteinte à la surface des poutres et le tablier. Les poutres présentent à plusieurs endroits des éclatements de béton au droit des semelles et des âmes. A certains endroits, des armatures et des torons précontraints sont visibles. En face inférieure de la dalle, des éclatements de béton (détachement de morceaux) sont aussi visibles. [22]



**Figure II.15.** À gauche, photo du bâtiment Windsor à Madrid après l'incendie. À droite, dessous du tablier du pont à Bruxelles après l'incendie. [22]

Dans le cas des tunnels routiers, les températures qui s'installent lors des incendies

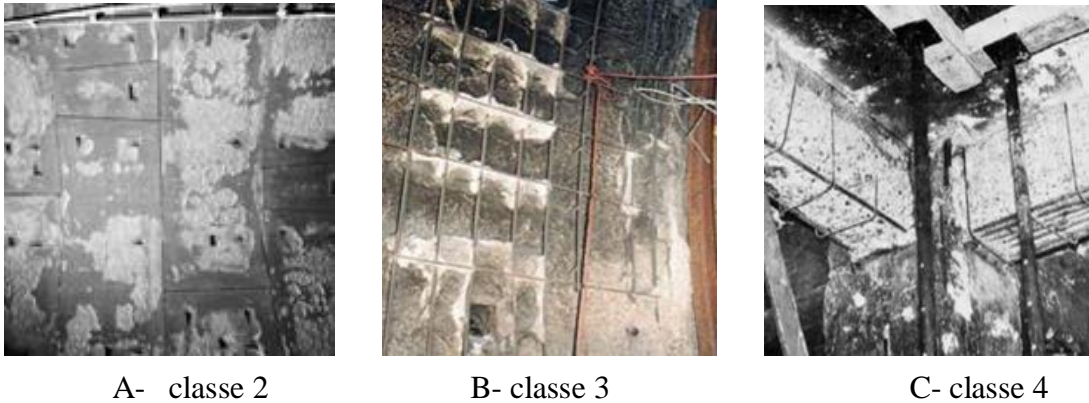
peuvent être supérieures à 1000°C [Denoël, 2007]. On peut citer l'incendie important du tunnel sous laManche, le 18 Novembre 1996. Cet ouvrage a été soumis à un feu d'une durée de près de 9 heures et une température maximale de près de 1100°C. [22]

Après l'incendie du tunnel du Mont-Blanc (24 mars 1999), une investigation in situ, qui a été complétée par une étude en laboratoire, a été menée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC. [22]

Cette investigation a pour objectif d'évaluer les caractéristiques mécaniques résiduelles du béton ainsi que de connaître la profondeur de l'endommagement dans le but d'optimiser les travaux de réparations. Les différents faciès de dégradation du béton sont regroupés dans le

Classe de désordres	0	1	2	3	4
<b>Vue en élévation d'une poutre sous dalle</b>					
<b>Coupe</b>					
<b>Disorders observe</b>	Aucun. état de référence de béton sain.	Dépôts de suies, coloration, traces de micro fissures non orientées (faiencage).	Ecaillage superficiel (0 à 10 mm), Fissures nettes et orientées (>0,5 mm).	Disparition du béton d'enrobage, Les armatures sont visibles, Le béton sous-Jacent est légèrement Feuillet.	Les armatures sont totalement dégagées et présentent des déformations plastiques, Une forte épaisseur de béton a disparu ou est feuilletée et a perdu sa cohésion.

**Tableau II.1.** Classification des dégradations d'ouvrage en béton par incendie[23]



**Figure II.16.** Exemples de désordres de différentes classes, A/ écaillage superficiel, B/disparition du béton d'enrobage des armatures, C/ les armatures sont totalement dégagées et la perte de l'épaisseur de béton atteint 50%. [23]

## **II.5. constituants principaux et additions**

### **II.5.1. Constituants du clinker**

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont :

1. Le silicate tricalcique  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (C3S) (50-70% du clinker).
2. Le silicate bicalcique  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (C2S) (10-30% du clinker).
3. L'aluminate tricalcique  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  (C3A) (2-15% du clinker).
4. L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique)  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  (C4AF) (5-15% du clinker).

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), de la magnésie ( $\text{MgO}$ ), diverses traces de métaux. La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci. [23]

### **II.5.2. Les autres constituants du ciment**

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

Les constituants les plus utilisés sont : [24]

**1. Calcaires :** Les calcaires sont considérés comme un des constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  supérieure à 75% en masse.

**2. Laitier granulé de haut fourneau :** Le laitier est un sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

**3. Cendres volantes (V ou W):** Elles sont les produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue : \* Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques ; \* Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

**4. Schistes calcinés :** Ce sont des schistes que l'on porte à une température d'environ  $800\text{ }^\circ\text{C}$  dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.

**5. Fumée de silice :** Les fumées de silices sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de  $0,1\text{ }\mu\text{m}$ ). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent être présentes pour au moins 85 % (en masse). Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques.

**6. Fillers :** Ce sont des "constituants secondaires" des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

### **II.5.3. Effet des additions :**

L'ajout de constituants secondaires dans le cas du traitement thermique est favorable, surtout si ces constituants sont finement broyés. Ils supportent bien des températures élevées (jusqu'à  $80\text{-}90\text{ }^\circ\text{C}$ ) [25]

## **II.6. Facteurs influant sur le comportement au feu**

L'IRC (L'Institut de recherche en construction) procède actuellement à des études expérimentales et numériques afin de définir des règles de conception d'éléments de structure résistant au feu, lesquelles seront intégrées aux codes et normes. Sur le plan de l'expérimentation, 20 poteaux en BHR vraie grandeur supportant une charge et un certain nombre de blocs en BHR sont exposés au feu dans un four construit à cette fin, le but étant d'étudier l'influence de différents paramètres sur la tenue au feu de ce type de béton. Les

travaux sont accomplis en collaboration avec la Portland Cement Association, l'Association canadienne du ciment Portland, Béton Canada, CANMET, MOBIL et la National Chiao Tung Université de Taïwan. . [25]

Facteurs influant sur le comportement au feu Les recherches menées à l'IRC et ailleurs montrent que la tenue au feu du BHR, en général, et l'effritement, en particulier, sont influencés par les facteurs suivants :

- la résistance initiale du béton à la compression
- sa teneur en humidité
- sa masse volumique
- l'intensité du feu
- les dimensions et la forme des échantillons
- l'armature latérale
- les conditions de chargement
  
- le type de granulat

Les études en cours à l'IRC visent à quantifier l'influence de ces facteurs et à permettre la mise au point de moyens pour améliorer le comportement au feu du BHR. Voici les conclusions qui ont été tirées à ce propos. [26]

**II.6.1. Résistance du béton :** Il est difficile de définir, à partir de l'information dont on dispose, une plage de résistance précise, mais les bétons ayant une résistance supérieure à 55 MPa sont plus sujets à s'effriter et il est possible qu'ils résistent moins bien au feu.

**II.6.2. Teneur en humidité :** La teneur en humidité, exprimée en humidité relative (HR), influe sur le degré d'effritement. Un taux d'HR plus élevé provoque un effritement plus important. Les essais de résistance au feu auxquels ont été soumis des poteaux en BHR vraie grandeur ont montré qu'il y a effritement substantiel lorsque l'HR est supérieure à 80 %. Le délai nécessaire pour atteindre un niveau d'HR acceptable (moins de 75 %), dans le cas des pièces de charpente en BHR, est plus long que dans celui des éléments de structure en BRN en raison de la faible perméabilité du BHR. Dans certains cas, par exemple dans les constructions en mer, les niveaux d'HR peuvent rester élevés tout au long de la période de service de l'ouvrage ; il faut donc en tenir compte lors de la conception. [26]

**II.6.3. Masse volumique du béton :** L'IRC a étudié l'effet de la masse volumique du béton en soumettant à des essais de tenue au feu des blocs en BHR ayant une masse volumique

normale (comportant du granulats de poids normal) et des blocs légers (comportant du granulats léger)<sup>5</sup>. Il a constaté que l'effritement est beaucoup plus marqué lorsqu'on utilise du granulats léger. Cela est surtout dû au fait que ce dernier renferme plus d'humidité libre, ce qui occasionne une pression de vapeur plus forte lors de l'exposition au feu. [26]

**II.6.4. Intensité du feu :** Le BHR s'effrite beaucoup plus lors des incendies caractérisés par des vitesses d'échauffement élevées ou la grande intensité du feu. À cet égard, les feux d'hydrocarbures constituent une menace sérieuse. Lorsque le BHR doit être utilisé dans des ouvrages où se trouvent des combustibles hydrocarbonés, par exemple dans des constructions de forage en mer ou dans des tunnels routiers, il faut tenir compte, lors de la conception, des probabilités d'éclatement du béton. [26]

**II.6.5. Dimensions des échantillons :** L'examen de la documentation révèle que le risque d'effritement thermique explosif augmente avec la taille de l'échantillon. Cela est dû au fait que les dimensions de celui-ci ont un rapport direct avec le transfert de chaleur et d'humidité au sein de la structure, ainsi qu'avec la capacité des grands ouvrages à stocker plus d'énergie. Il faut donc porter une grande attention à la taille des échantillons lorsqu'on évalue le problème de l'éclatement ; les essais de tenue au feu sont souvent effectués sur maquette, ce qui peut donner des résultats trompeurs. [27]

**II.6.6. Armature latérale :** L'espacement et la configuration des attaches ont tous deux un effet important sur la performance des poteaux en BHR. En rapprochant les attaches (du quart de la distance exigée dans le cas des poteaux en BRN) et en les repliant à 135 ° vers l'intérieur du noyau du poteau, comme le montre la figure 4, on améliore la tenue au feu. La mise en place d'attaches transversales accroît aussi la résistance au feu. Les essais de tenue au feu auxquels ont été soumis des poteaux en BHR, un confinement additionnel étant assuré par le repliement des attaches vers le noyau des poteaux et par l'utilisation d'attaches transversales, ont révélé que l'effritement est ainsi réduit considérablement et qu'il est possible d'obtenir une résistance au feu de 266 minutes, même sous charge de service maximale.[27]

**II.6.7. Importance de la charge :** Un élément de structure en BHR qui supporte une charge s'effritera plus qu'une pièce de charpente non mise en charge. La charge ajoute aux contraintes dues à la pression interstitielle produite par la vapeur. Par ailleurs, plus la charge est grande, moins la tenue au feu est bonne, car la perte de résistance qui accompagne la montée en température est plus grande dans le cas du BHR que dans celui du BRN. [27]

**II.6.8.Type de granulat :** Des deux granulats utilisés couramment pour faire du béton, le granulat carbonaté (surtout le calcaire) et le granulat siliceux (surtout le quartz), c'est le premier qui assure la meilleure tenue au feu et la plus grande résistance à l'éclatement<sup>3</sup>. Cela n'est surtout dû au fait que le granulat carbonaté a une capacité calorifique (chaleur spécifique) beaucoup plus grande, ce qui contribue à empêcher l'effritement. Cette plus grande chaleur spécifique est probablement causée par la dissociation de la dolomie dans le béton à granulat carbonaté. [28]

### **Conclusion**

La synthèse bibliographique a été organisée afin de pouvoir présenter d'abord les travaux de recherche concernant les principales caractéristiques des granulats recyclés et leur influence sur les propriétés des bétons à la température ambiante. Ensuite l'attention est portée sur le comportement à haute température des bétons en expliquant les phénomènes qui occurred lors d'exposition à des conditions sévères, avec une attention particulière au phénomène d'écaillage. L'étude bibliographique se termine avec la présentation des études réalisées sur le comportement à haute température des bétons recyclés et surtout sur leurs propriétés après chauffage.

Nous remarquons que les propriétés mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction et module d'élasticité) des bétons sont influencé fortement par les températures élevées, cette influence est remarqué aussi sur l'évolution de la matrice cimentaire en particulier les C-S-H. Les études disponibles sur la résistance des bétons à l'écaillage sous température élevée, ont montré qu'il y a un bon comportement béton avec granulats recyclés, de même pour les bétons à hautes performances. Toutefois, des Études ont traité des bétons avec des gravillons recyclés, d'autres études sur la sensibilité à l'écaillage des bétons avec granulats recyclés fins (autrement dits, sable recyclés). Ces études semblent donner des résultats encourageant sur le développement des propriétés mécaniques et durabilité.

***Chapitre III. Généralité sur le  
Recyclage des déchets***

### **III. Généralité sur le Recyclage des déchets**

#### **III.1. Définition :**

Le recyclage est une méthode de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui admet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables.

- Le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays étendus.
- Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :
- **Réduire**, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets.
- **Réutiliser**, qui regroupe les méthodes admettant de donner produit usé un nouvel usage.
- **Recycler**, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.
- Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine.
- Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large.

#### **III.2. Les type d'élimination :**

Selon le type et la nature du déchet obtenu ; on doit choisir le type d'élimination adapté parmi les types suivants :

- Décharge ou réutilisation du déchet.
- Déchet recycle.
- Valorisation énergétique.
- Incinération.
- Déchet recyclable après de contamination.

#### **III.3. Intérêt du recyclage dans le génie civil :**

Maintenant, en Algérie et dans plusieurs pays, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels originaires de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des

fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu.

Le recyclage des déchets offre une source d'approvisionnement en matières premières

Recycler des déchets dans une utilisation comme granulats pour les routes ou la construction admet :

- Une économie de la ressource naturelle.
- Une réduction du transport des matériaux.
- Une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants.
- La réduction des quantités de matériaux mis en décharge. [29]

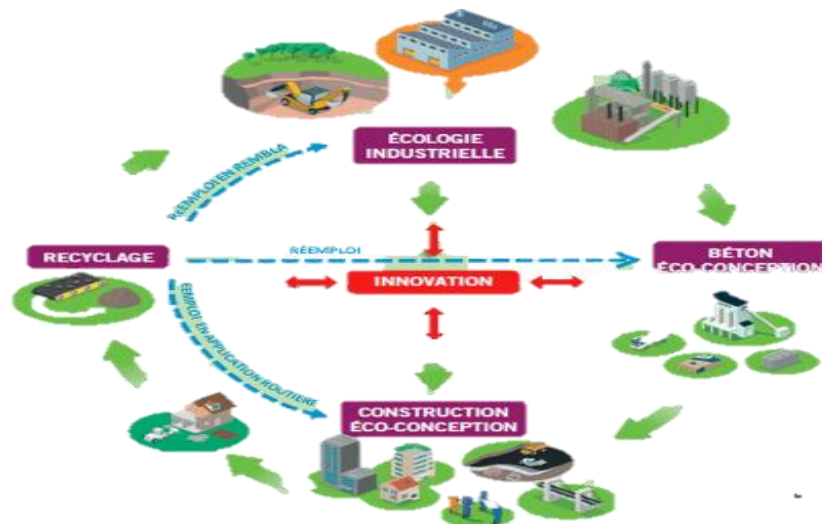


Figure III.1 : recyclage des déchets de construction [29]

#### III.4. LES DÉCHETS DU SECTEUR DE LA CONSTRUCTION

• Les déchets du secteur de la construction ne proviennent pas uniquement des chantiers de construction. Sur l'ensemble de son cycle de vie, un bâtiment contribuera plusieurs fois à alimenter le flux des déchets du secteur :

- Déchets de mise en œuvre initiale (en atelier ou sur chantier)
- Déchets liés à rénovation / maintenance
- Déchets liés à la démolition

– En outre il est important de garder à l'esprit que le processus de fabrication des matériaux et composants de construction alimente aussi le flux des déchets (déchets en phase de production des produits de construction en industrie). Néanmoins une grande majorité de ces déchets sont réinjectés / ré exploités dans les processus de fabrication.

• La diversité des sources de production des déchets implique : [29]

- ❖ Une grande variété dans **la typologie de déchets** (ex : inertes / dangereux /...) avec des caractéristiques très différentes (ex : propreté / pollution / effet de dégradation...)
- ❖ Une grande variété de **nouveaux produits commercialisés** sur le marché avec des spécificités de composition très variables (difficulté de catégorisation de ces produits)
- ❖ Une grande variation **des quantités de déchets**, avec des possibilités et des nécessités de gestion adaptées :
  - Un chantier de construction neuve produit généralement moins de déchets qu'un chantier de démolition ou de rénovation lourde. En outre, une rénovation légère est souvent à l'origine de faibles quantités de déchets.
  - Suivant la quantité de déchets produits, le potentiel et la typologie de gestion des déchets est variable. [29]

Pour de grandes quantités de déchets, il est plus aisé d'organiser la gestion des déchets : choix des filières, études préalables, organisation sur site... La valorisation économique est dans ce cas un point essentiel, car le fait de ne pas 'gérer' implique des coûts (ex : les déchets en mélange partent pour les décharges alors que les déchets triés sont repris à moindre coût, dans certains cas gratuitement ou voire même rachetés – ex : les métaux).

Pour de faibles quantités de déchets, la gestion se résume souvent à mélanger les déchets pour une mise en décharge. En effet, les quantités de chaque type de matériaux étant faible, le prix d'un tri sélectif et d'un transfert vers les différentes filières se révèle souvent plus conséquent ou proche du prix d'une mise en décharge des déchets en mélange. Dans ce cas, l'alternative d'une organisation du tri hors chantier dans un centre de tri peut être envisagée.

• La localisation du site de production des déchets et le contexte géographique impliquent : La localisation des chantiers (construction / rénovation / démolition) peut influencer de manière significative le potentiel de gestion des déchets. Pour exemple, un chantier en périphérie urbaine avec un parcellaire étendu, permettra plus facilement l'implantation des containers destinés au tri sélectifs, l'accessibilité des véhicules pour la dépose et l'enlèvement des containers en sera

facilité. Au final c'est toute la gestion des déchets qui peut être optimisée et la réduction des nuisances assurée. A l'inverse, un chantier localisé en centre urbain offre peu de possibilités pour le positionnement de plusieurs containers destinés au tri sélectif. Cette spécificité liée à la complexité d'accès des camions en ville implique un potentiel de gestion des déchets plus faible et plus complexe à organiser, d'où la nécessité d'une meilleure préparation en base.

Le contexte géographique peut influencer de manière plus ou moins significative le potentiel de recyclage des déchets. Le marché du recyclage et de la récupération parvient à absorber une quantité toujours plus grande et diversifiée de matériaux (déchets), néanmoins il peut apparaître que certains déchets ne trouvent pas de filière de valorisation géographiquement proche du chantier. Dans ce cas, la question du transport et de son coût au regard d'une mise en décharge rentre souvent en ligne de compte. [29]

### **III.5. Les déchets industriels**

Les déchets industriels, appelés déchets d'activités économiques (DAE), sont des déchets produits par l'activité humaine. En effet, homme est tourné vers la production rapide de biens et les déchets générés ont été très longtemps négligés. Par conséquent, le problème de la pollution de l'environnement est de plus en plus perceptible avec cette croissance rapide. Elle a des effets négatifs visibles plus particulièrement sur la production agricole [Reddy, V.R et al]. Au fil des ans, l'effet de la pollution sur la production agricole a été bien étudié dans plusieurs pays développés. De plus, elle peut avoir des effets invisibles, tels que la pollution sonore, le rayonnement thermique et le rayonnement ultraviolet. La forte génération de déchets ou de sous-produits industriels est l'un des principaux problèmes auxquels sont confrontés, aujourd'hui aussi bien, les industries de la construction que d'autres industries. La pollution industrielle est plus observée dans la zone rurale car le contrôle n'y'est pas strict comme dans les zones urbaines Une faible sensibilisation de la population rurale à la protection de l'environnement et aux usines mal planifiées est conçue, sans tenir compte des facteurs environnementaux tels que la direction du vent et la dispersion des gaz sont les principaux facteurs prévalant dans la propagation de pollution dans ces zones rurales. Ainsi il est très opportun de protéger l'environnement et d'économiser les ressources naturelles en employant la plupart des déchets industriels dans le béton de différentes manières, à savoir les différents déchets industriels solides comme les mâchefers, les scories de cuivre, les scories de four, les déchets céramiques, le calcaire, la poussière de marbre,

La poussière de carrière et les granulats de bétons recyclés, ainsi que les déchets industriels toxiques et d'origine végétale, issus de l'agriculture ou de certaines industries particulières, dont nous examinerons le pourquoi et le comment. Ces résidus seront recyclés et nous présenteront notamment les avantages et les inconvénients des matériaux obtenus. [30]

### **III.5.1. Les type de déchets de chantier**

On y trouve aussi bien du béton armé, du ciment-mortier, de la céramique, de la terre cuite, de l'amiante, du plâtre, du bois, du verre, des métaux, des cartons, des plastiques... ainsi que des déchets liquides (huiles, fluides caloporteurs), des piles et accumulateurs, des tubes fluorescents...

Les tailles sont également très disparates.

Les déchets de chantier sont classés, selon leur dangerosité vis-à vis la santé et l'environnement, en trois catégories :

- les déchets inertes ;
- les déchets non dangereux et non inertes appelés aussi industriels banals (DIB), assimilables aux déchets ménagers ;
- les déchets dangereux, appelés aussi déchets industriels spéciaux (DIS) ;

Auxquels s'ajoutent les déchets d'emballages, tels que des palettes, des cartons, des films plastiques, des fûts [30].

### **III.5.2. Déchets ménagers et assimilés (DMA)**

Tout déchet produit par des ménages (OM) ainsi que les déchets similaires provenant des activités industrielles, artisanales et commerciales, des écoles, des services publics, du secteur tertiaire, des hôpitaux et autres qui, par leur nature et leur composition, sont assimilables aux déchets ménagers . À l'échelle mondiale, environ un tiers de la nourriture que nous produisons pour la consommation est perdu ou gaspillé quelque part le long de la chaîne alimentaire. Dans les pays industrialisés, plus de 40% des aliments sont gaspillés au stade de la vente et aussi par le consommateur, d'où un énorme gaspillage de ressources précieuses qui s'accompagne également de pollutions environnementales. [31]



**Figure III .2 : Déchets ménagers**

### **III.5.3. Déchets encombrants**

Tous les déchets issus des ménages qui, en raison de leur caractère volumineux, ne peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les DMA. On y trouve les équipements ménagers usagés (électroménager, vieux meubles et literie, textiles et vêtements, gros cartons, vélos.....), les déblais, les gravats, les déchets verts (espace aménagé, gardienné, clôture). Cela peut être aussi des déchets de chantier : bâtiment (bois, matières plastiques, métaux, briques, béton, tuiles), génie civil (asphalte, revêtements routiers et matériaux d'excavation) ou divers tels que les déchets d'origine animale, voiture usagées, batteries d'automobiles ; déchets électroniques). [31]



**Figure III.3 : déchet encombrants**

### III.5.4. Déchets spéciaux

Tous les déchets issus des activités industrielles, agricoles, de soins, de services et toute autre activité qui en raison de leur nature et de la composition des matières qu'ils contiennent ne peuvent être collectés, transportés dans les mêmes conditions que les DMA. Ils sont appelés aussi toxiques, ces déchets présentent un risque physique, biologique et un risque environnemental. Le traitement de ces déchets nécessite des installations adaptées car leur élimination demande des précautions particulières pour la protection de l'environnement. Par ailleurs, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a défini les déchets dangereux comme "des substances ayant des caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques imposant des procédés de manipulation et d'évacuation éliminant les risques sanitaires et/ou d'autres effets nocifs sur l'environnement". Bien que plusieurs initiatives existent pour la collecte séparée des déchets spéciaux des ménages, certains déchets spéciaux sont généralement égarés et sont gérés avec les déchets ménagers résiduels. Les déchets spéciaux sont parfois collectés en tant que déchets résiduels, et le tout est incinéré. Les conséquences environnementales des déchets spéciaux des ménages égarés sont relativement inconnues. Astrup et al. ont mené des essais sur l'effet de l'incinération des déchets de batterie et ont constaté que les batteries entraînaient une augmentation du mercure (Hg) et du cadmium (Cd) dans les gaz de combustion, ainsi qu'une augmentation du nickel (Ni) et du soufre (S) dans les résidus solides. Dans notre pays, le transport des déchets spéciaux dangereux est soumis à l'autorisation du ministre chargé de l'environnement après avis du ministre chargé des transports. [32]



Figure III.4 : décher spéciaux organiser

### **III.5.5. Déchets des activités de soins**

Tout déchet issu des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif ou curatif, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire. Ces déchets sont classés comme des déchets dangereux et doivent être séparés des autres déchets.

Les déchets générés par l'amélioration des soins aux patients ont posé un grave problème, un défi au monde entier. Aujourd'hui, le défi de l'élimination des déchets de soins d'une manière écologiquement, socialement et économiquement durable est devenu encore plus compliqué avec des déchets hautement infectieux provenant de patients atteints de Covid- 19. En effet, la pandémie de la Covid-19 a exercé une pression extrêmement élevée sur les mouvements des équipements chirurgicaux due aux perturbations de la chaîne d'approvisionnement et au recul des activités d'élimination et de recyclage. [32]



**Figure III.5 : déchet des activités de soins**

### **III.5.6. Déchets inertes**

L'exploitation continue de diverses ressources naturelles pour la construction conduit à la génération de millions de tonnes de déchets de construction et de démolition chaque année. Ces déchets sont généralement définis comme des déchets solides inertes. Ils sont classés inertes lorsqu'ils ne peuvent pas subir de transformations importantes, physiquement, chimiquement ou biologiquement. La définition précédente des déchets inertes est conforme à la loi Algérienne du 15 décembre 2001. Ces déchets se composent principalement de terre, de pierres et de galets, de béton, de briques, de bois, de matériaux de toiture, ... etc. Les principaux travaux responsables de l'augmentation de la quantité des déchets de construction et de démolition sont la rénovation, la nouvelle construction, la démolition des anciennes structures, l'élargissement des routes et la reconstruction du réseau de transport. Ces différents secteurs dégagent des quantités importantes. A titre d'exemple, aux Etats-Unis, environ 136 106 tonnes de débris de construction et de démolition liés au bâtiment sont générées sur lesquelles 20% à 30% seulement sont recyclés chaque année. Ces déchets composés principalement de béton, de maçonnerie, de calcaire, de grès, de métal, de bois, etc. peuvent varier selon le type de construction. Ces types de déchets peuvent affecter la santé publique et l'environnement en raison de la présence d'autres polluants secondaires qui sont pour la plupart toxiques comme les métaux lourds. Par conséquent, il y a lieu de recycler ces déchets. En effet, on peut trouver plusieurs utilisations comme du béton à base de déchets de briques ou la production de blocs de ciment en utilisant du béton en poudre, ou bien encore des bétons verts en utilisant des granulats en céramique. Ce béton présente des caractéristiques mécaniques similaires à celles du béton ordinaire.

Ce béton présente des caractéristiques mécaniques similaires à celles du béton ordinaire. En raison de la disponibilité des ressources de déchets, le potentiel de réutilisation et de recyclage de ces résidus est élevé.

Afin de mettre fin aux décharges anarchiques et illicites en Algérie, la loi relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets interdit le dépôt, le rejet et l'abandon des déchets inertes sur tout site non désigné à cet effet et notamment sur la voie publique. Le générateur des déchets doit prendre en charge la collecte, le tri, le transport et la mise en décharge de ces déchets inertes.

Quant aux déchets urbains, ils couvrent les DMA et les déchets que la collectivité collecte tels que les boues de station d'épuration, les matières de vidange, les déchets d'espaces verts, les résidus de nettoyage des rues, les papiers divers des locaux administratifs...etc. Les déchets plastiques, les papiers-cartons, les textiles, le bois non traité, les métaux, les verres et matières organiques appartiennent, en général, à la catégorie des déchets banals (non dangereux) qui sont des déchets non inertes et non dangereux que produisent aussi bien les ménages que les entreprises .[33]



**Figure III.6 :** Déchets inertes

#### **III.5.6.1. Valorisation des déchets industriels dans la fabrication des ciments**

L'utilisation des déchets industriels en béton est très répandue pour réduire au minimum l'impact des activités humaines sur l'environnement et la planète et ainsi réduire considérablement la consommation d'énergie et par conséquent, le coût de la fabrication et l'émission de CO<sub>2</sub>. La réutilisation des déchets inorganiques générés par l'industrie tels que le laitier de haut fourneau, la fumée de silice et la cendre volante est la meilleure dans la fabrication du ciment et du béton vert. En effet, les résultats montrent que l'introduction des cendres volantes augmente la résistance à la pénétration de chlorure comparé au béton ordinaire [33].

#### **III.5.7. Le laitier de haut fourneau**

Le laitier est un sous-produit des aciéries. Les industries métallurgiques génèrent environ 300 kg de laitier par tonne de fonte. Le refroidissement appliqué et le procédé de fabrication déterminent les variétés de laitier, Les variétés de laitier de haut fourneau dépendent essentiellement du refroidissement. Lorsque le laitier liquide est refroidi très lentement, on

obtient un laitier rocheux (cristallisé). Ce matériau est ensuite arrosé pour obtenir un laitier cristallisé de masse volumique apparente de 1,2 à 1,4 t/m<sup>3</sup>. Ce déchet minéral possède une porosité variant de 3 à 20% due à l'oxydation du soufre. Par conséquent, la masse volumique absolue et la conductivité thermique du laitier sont plus faibles. Par comparaison, ce matériau présente une masse volumique et une conductivité thermique inférieures à celles du calcaire et du granite. Le béton confectionné avec les granulats de laitier constitue un excellent isolant thermique. Le refroidissement du laitier liquide, suivi par une injection d'air et de vapeur d'eau, produit un laitier expansé de masse volumique apparente de l'ordre 0,3 à 1,1 t/m<sup>3</sup>. Ce procédé de fabrication du laitier génère une structure poreuse et, par conséquent, une faible conductivité thermique variant de 0,1 à 0,18 W/m.K et une faible résistance mécanique, variant de 1 à 8 MPa, à la compression. L'utilisation de ce matériau peut être bénéfique pour l'isolation thermique. Il existe aussi le laitier de haut fourneau vitrifié (granulé ou bouleté). Le laitier liquide est dirigé, après séparation avec la fonte, vers un dispositif dans lequel il va subir un refroidissement par arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression (trempe) afin d'obtenir le laitier vitrifié ou granulé. Le laitier granulé doit présenter des propriétés hydrauliques latentes, c'est-à-dire qui se manifestent quand le laitier subit une activation convenable. La densité apparente de ce matériau est de l'ordre de 0,7 à 1,4 et sa densité absolue est de l'ordre de 2,6 à 2,8. Par contre, le laitier bouleté est obtenu par arrosage et exposition à l'air libre et prend une forme sphérique sous l'effet de tension superficielle. Cela produit un laitier bouleté, de granulométrie variant de 0-20 mm, de masse volumique absolue de 1,4 à 1,6 t/m<sup>3</sup>, avec une porosité de 45 à 50%. Ce matériau peut également améliorer les caractéristiques thermiques du béton par sa faible conductivité thermique qui tourne autour de 0,15 W/ m.K.

Ce déchet industriel a des propriétés hydrauliques, et son utilisation améliore l'ouvrabilité du béton frais et le rend plus plastique et de meilleure cohésion. Les caractéristiques de surface des grains de laitier, plus lisses, absorbent un peu d'eau au cours du malaxage. Le laitier granulé peut être broyé à la finesse désirée, mais habituellement à une finesse supérieure à 350 m<sup>2</sup>/kg, plus fine que celle du ciment Portland. Une augmentation de la finesse conduit à une augmentation de l'activité à jeune âge. Une étude réalisée par [montre que la surface spécifique de Blaine de 250 m<sup>2</sup>/kg à 500 m<sup>2</sup>/kg augmente la résistance du béton plus que du double. En ce qui concerne la prise du béton contenant du laitier, la présence du laitier conduit à un retard de prise variant entre 30 à 60 minutes ont également examiné l'évolution du temps de prise en fonction de la teneur en laitier. Ces auteurs ont pu montrer que l'augmentation du pourcentage du laitier a un effet retardateur sur le temps de prise et une diminution de la résistance initiale

par rapport à celle du béton à base de ciment Portland. [34]

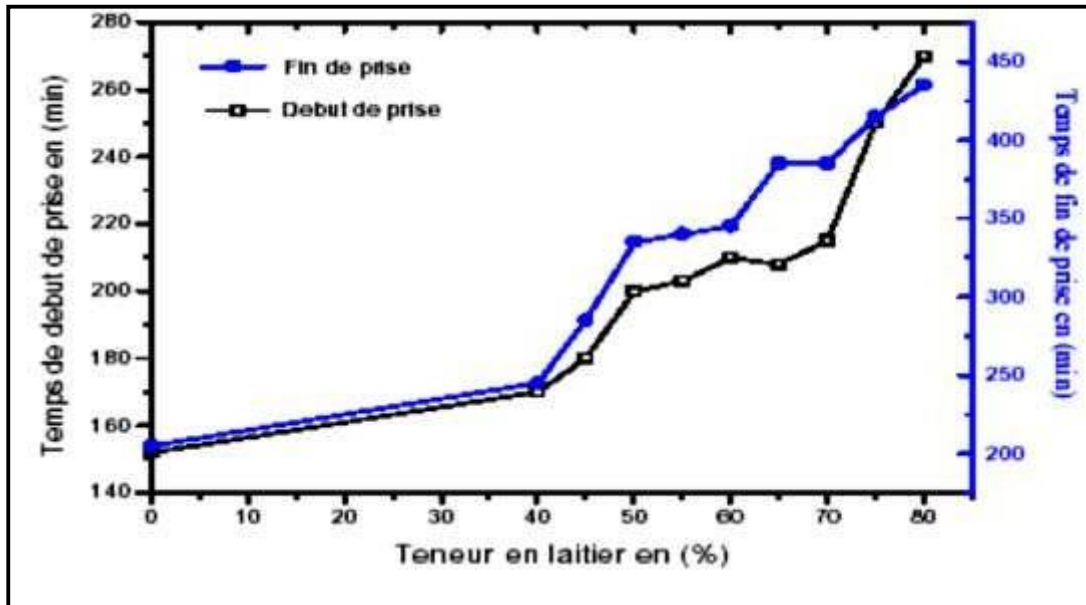


Figure.III.7 : Temps de prise des ciments avec ajout du laitier [34]

La résistance du béton durci est influencée par le pourcentage de laitier. A moyen terme, pour obtenir une résistance élevée, le pourcentage du laitier à mettre en œuvre est de 50% de liant. La norme ACI 318-89 impose une limite de la teneur en laitier de 50% du total du liant. Lorsque le laitier et les cendres volantes sont ajoutés ensemble dans le béton, la masse totale de ces deux matériaux doit être limitée à 50% de la masse initiale du liant ; la limite de la teneur en cendres volantes étant de 25% [34]

[Sivasundaram et Malhotra] ont présenté une étude où ils ont accredité la possibilité d'utiliser des pourcentages de laitier plus importants variant entre 50 et 75%. Dans cette étude, les auteurs ont démontré une bonne évolution de la résistance du béton pour un dosage en liant compris entre 300 et 420 kg/m<sup>3</sup>. La résistance du béton à base de ciment et de laitier est également influencée par le mode de conservation. En effet, la conservation humide prolongée doit être importante en raison de la faible vitesse initiale d'hydratation qui provoque une perte d'eau dans le système des pores capillaires sous l'effet des conditions de séchage [Neville AM].

En ce qui concerne la perméabilité, les essais réalisés sur les mortiers à base de laitier de haut fourneau ont montré que ces derniers sont moins perméables à l'eau. L'utilisation du laitier de haut fourneau dans la confection des mortiers, selon Bakker, réduit fortement la diffusion des chlorures. À ce propos, on doit noter que, pour le béton ayant au moins 60% de teneur en laitier avec un rapport Eau/Ciment de 0,50, la diffusion de ce matériau exposé aux chlorures est

au moins, 10 fois plus faible que dans le cas où le liant est constitué de ciment Portland. Par conséquent, la durabilité du béton contenant du laitier de haut fourneau est plus marquée que celle d'un béton confectionné avec du ciment Portland seul. En effet, l'incorporation du laitier a un effet bénéfique sur la microstructure. La pâte de ciment hydratée est plus dense, l'espace poreux étant rempli par des C-S-H par rapport à la pâte de ciment Portland seul. Par conséquent, la résistance aux sulfates de ce béton à long terme est particulièrement durable. [35]

### **III.5.8. La fumée de silice**

La fumée de silice est un sous-produit d'industrie provient de la réduction du quartz de grande pureté du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la fabrication de silicium et d'alliages de Ferro silicium. Ces particules sont sphériques très fines contenant une forte teneur en silice amorphe ( $\text{SiO}_2$ ). La fumée de silice est aussi appelée micro-silice ou fumée de silice condensée, mais l'expression « fumée de silice » est plus utilisée. Les fumées de silices sont utilisées en remplacement du ciment. En général, la densité de la fumée de silice est de 2,20, mais elle est peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Le diamètre de la fumée de silice varie entre 0,03 et 0,3 $\mu\text{m}$  et habituellement le diamètre de ces particules fines est inférieur à 0,1 $\mu\text{m}$ . Par conséquent, la surface spécifique de la fumée de silice est plus élevée, elle est d'environ de 20 000  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Cette surface spécifique ne peut pas être déterminée par la méthode de Blaine, elle est déterminée par la méthode d'absorption d'azote. La silice est très réactive et le raffinement des particules accélère la réaction avec l'hydroxyde de calcium engendrée par l'hydratation du ciment Portland. Les très petites particules des sphères permettent généralement de diminuer la perméabilité à l'air et à l'eau. Les propriétés du béton frais sont influencées par la présence de fumée de silice. En effet, les bétons contenant de la fumée de silice ont très peu de ressuage. En revanche, la diminution du ressuage peut provoquer le retrait plastique. Par ailleurs, ce béton peut être facilement pompé et bétonné sous l'eau, il peut être utilisé comme un béton fluide. L'incorporation de la fumée de silice augmente la résistance du béton durci jusqu'à environ 7 jours (jeune âge). En effet, la fumée de silice agit comme un filler qui améliore l'interface avec les granulats et particulièrement avec les gros granulats. Une augmentation de la résistance est également constatée, à long terme, avec un ciment contenant de la fumée de silice. En effet, la résistance augmente respectivement de 7 MPa et de 16 MPa avec une teneur de 10% et de 20% de fumée de silice. Le taux de remplacement

optimal de la fumée de silice se situe aux environs de 10% de la masse totale du liant. La perméabilité de la pâte de ciment est réduite avec ce pourcentage et l'augmentation de ce pourcentage conduit à de faibles changements. [36]

### **III.5.9. Les cendres volantes**

Les cendres volantes sont des résidus nuisibles à l'environnement. Ce sont des particules minérales, très fines et de forme sphérique, recueillies dans des installations de dépoussiérage de gaz de combustion des centrales thermiques alimentées au charbon. La finesse des cendres est très élevée, la surface spécifique de Blaine varie entre 250 et 600m<sup>2</sup>/kg. Par conséquent, les cendres volantes réagissent facilement avec l'hydroxyde de calcium et leur forme contribue à l'amélioration de la maniabilité. Il existe deux types de cendres volantes, les cendres volantes de classe F provenant de charbon bitumineux, principalement siliceuses et les cendres de classe C provenant des charbons et lignite sous-bitumineux. On a pu constater, lors de la substitution une partie du ciment Portland par de la cendre volante d'une teneur de 5 à 15%, dans la confection du béton, une réduction du besoin en eau, réduction autant plus importante pour un rapport Eau/Ciment plus élevé. La présence de cendres volantes dans un béton frais retarde la prise du béton d'environ une heure. Par conséquent, cela peut être avantageux par temps chaud. Les cendres volantes sont moins sensibles aux agents agressifs et ont la capacité de réagir avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment Portland (réaction pouzzolanique). La présence de la cendre volante améliore également d'autres aspects des propriétés du béton : porosité capillaire plus fine et hydratation plus lente. De ce fait, un tel résidu présente des bénéfices forts intéressants qui méritent d'être évoqués [37]

### **III.5.10. Les déchets agricoles**

Le secteur agricole dispose de ressources considérables pour fournir des matériaux d'origine végétale. En effet, divers matériaux ont été appliqués avec succès dans la confection des composites tels que les copeaux de bois, les déchets de menuiserie, la coque de palmier, la coque de noix de coco, le bambou, etc. Plus récemment, la coque d'abricot et de pêche ont été utilisées pour le béton léger d'origine biologique. La pêche est un fruit originaire de Chine, elle est largement cultivée dans le monde, principalement en Chine, en Italie, en Grèce, en Espagne

et aux États-Unis. L'abricot est également l'un des principaux fruits au monde. En 2017, la superficie de plantation d'abricotiers dans le monde était d'environ  $5,4 \times 10^5$  ha, avec une production annuelle d'environ  $4,26 \times 10^6$  tonnes [Wennberg A]. En dehors de leur consommation comme fruits, la plupart des pêches et des abricots sont transformés en jus en conserves, etc. Par conséquent, les coques de pêche et d'abricot sont utilisées dans la fabrication du béton léger en raison de leur légèreté et de leur rigidité. D'autres déchets comme le liège ont suscité beaucoup d'intérêt pour la production de matériaux composites isolants. [38]



**Figure III .8** : déchet agricole

### **III.6. Influence des granulats de béton de ciment recyclé dans la fabrication des bétons de ciment**

Les bétons de ciment recyclés sont peu utilisés dans les bétons de ciment. Ce type de granulat est pourtant un produit de démolition très répandu. De plus, les nouveaux bétons comportant ces matériaux recyclés sont encore peu étudiés. Pour faire un béton avec de bonnes résistances mécaniques et une bonne durabilité. Il est essentiel de respecter quelques règles de fabrication, comme d'utiliser un bon granulat, une quantité d'air suffisante pour résister aux cycles de gel/dégel, un rapport E/C adéquat. [38]

Comme vu précédemment, l'utilisation de bons granulats est essentielle dans la confection d'un bon béton. Ce sont eux qui vont régir une bonne partie de la résistance mécanique. Dans notre cas, mentionnons qu'il faut utiliser les meilleurs granulats recyclés possibles pour ne pas affaiblir le nouveau béton.

Une étude effectuée par [Quebaud], à l'université d'Artois, démontre que les mélanges fabriqués avec ce type de granulat aboutissent à des bétons plus exigeants en eau et un peu moins résistants mécaniquement que les bétons classiques. [38]

Un béton doit posséder de bonnes résistances mécaniques, une qualité importante pour les

bétons. D'après une étude menée par [Bérubé et al], les bétons fabriqués avec des granulats de béton recyclé obtiennent de bonnes résistances mécaniques. Ces nouveaux bétons peuvent atteindre des résistances à la compression équivalente à celle d'un béton normal, soit des résultats de 30 à 40 MPA. Bien sûr, plus la quantité d'air entraîné et le rapport E/C augmentent dans un mélange, plus la résistance mécanique ne va baisser.

L'autre facteur pouvant influencer la performance d'un béton est sa quantité d'air entraîné dans le mélange. Cette quantité est très importante au niveau de la durabilité du béton face au gel. Il faut donc en entraîner suffisamment dans le mélange, soit de 5 à 8 % selon son utilisation. D'après [Bérubé et al], il est plus difficile d'entraîner de l'air dans un mélange comportant des granulats de béton recyclé. Il faudra alors utiliser des mesures pour remédier à ce problème, comme par exemple utiliser un agent entraîneur d'air en quantité appréciable pour que le béton résiste mieux au climat du gel/dégel.

De plus, d'après ces mêmes auteurs, les prismes de béton conçus avec du béton recyclé sans air entraîné réagissent assez mal aux cycles de gel/dégel, soit l'essai d'expansion ASTM C666. Les prismes ont tendance à prendre de l'expansion et à se fissurer facilement. Notons que l'utilisation dans le mélange, d'un béton recyclé avec air entraîné mène à de meilleurs résultats. Ces prismes ainsi construits se fissurent moins et prennent beaucoup moins d'expansion.

Pour conclure, d'après [Quebaud], les bétons conçus avec des granulats de béton de ciment recyclé présentent des caractéristiques bien particulières si on les compare aux bétons classiques. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- Des résistances à la compression et à la traction inférieures d'environ 10 à 30 %;
- Des modules élastiques inférieurs d'environ 15 à 40 %;
- Une moins bonne adhérence entre la pâte de ciment et le granulats.
- Des retraits plus élevés de l'ordre de 50 à 100 %.

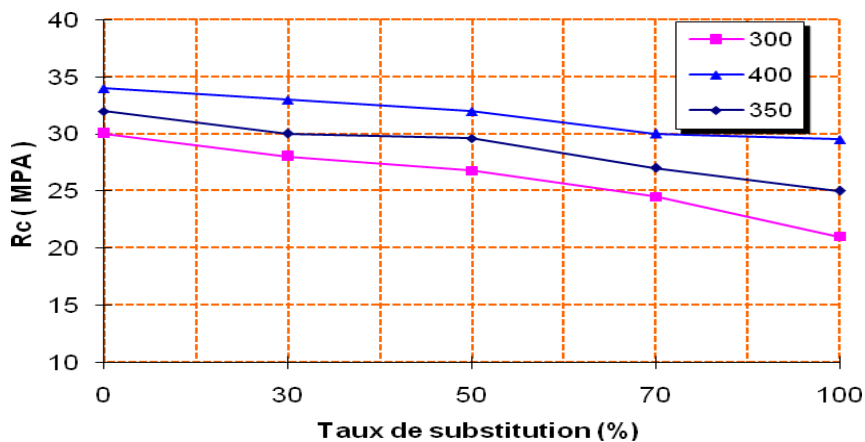
### **III.6.1. Essai de la résistance à la compression :**

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété bien que, dans de nombreux cas pratiques, d'autres caractéristiques telles la durabilité et la perméabilité puissent en effet être plus importantes. Néanmoins, la résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est

directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté. De plus la résistance du béton est presque universellement utilisée lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité.

[Hachana] à trouver comme présente les **figures III-9**

- ✓ Pour les bétons à base des agrégats issus du concassage de béton de démolition, avec un taux de substitution plus de 30% une chute de résistance excède :
  - ❖ 11% pour un dosage de ciment de 300 kg /m<sup>3</sup>,
  - ❖ 8% pour un dosage de 350 kg/m<sup>3</sup>
  - ❖ 6% pour un dosage de 400 kg /m<sup>3</sup>
  
- ✓ Pour les bétons à base des agrégats de concassé de brique dont le taux de substitution dépassant 30% une chute de résistance de plus de :
  - 21% pour un dosage de ciment de 300 kg /m<sup>3</sup>,
  - 14% pour un dosage de 350 kg/m<sup>3</sup>
  - 12% pour un dosage de 400 kg /m<sup>3</sup>



**Figure III.9 :** Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction du pourcentage de substitution en granulats de béton de démolition pour des dosages de ciment respectifs 300, 350, 400 kg/m<sup>3</sup>. [39]

[Benaichi] à trouver que les bétons recyclés présentent des résistances à la compression plus faible que les bétons ordinaires : une chute de 8 à 27% pour les bétons de sable de béton concassé et de 14 à 33% pour les bétons de brique concassé. [40]

[Oubibet et Slama et Benaichi] ont trouvé :

- ✓ Pour les bétons à base des sables issus du concassage de béton de démolition, avec un taux

de substitution plus de 25% une chute de résistance excède :

❖ 10 % pour un dosage de 350 kg/m<sup>3</sup>

❖ 9 % pour un dosage de 400 kg/m<sup>3</sup>

✓ Pour les bétons à base des sables de concassé de brique dont le taux de substitution dépassant 25% une chute de résistance de plus de :

❖ 17% pour un dosage de 350 kg/m<sup>3</sup>

❖ 11% pour un dosage de 400 kg/m<sup>3</sup>

## **Conclusion :**

Le recyclage est une pratique importante et nécessaire pour préserver l'environnement et les ressources naturelles de notre planète. Le recyclage permet de réduire la quantité de déchets envoyée en décharge et de limiter la consommation de matières premières en les réutilisant. Il contribue ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la lutte contre le changement climatique. De plus, le recyclage permet de créer des emplois dans les secteurs de la collecte, du tri et du traitement des déchets, contribuant ainsi à l'économie locale. Cependant, pour que le recyclage fonctionne de manière efficace, il est essentiel que chacun d'entre nous fasse sa part en triant correctement les déchets et en les déposant dans les bacs de collecte appropriés. Enfin, il est important de souligner que le recyclage doit être considéré comme une solution de dernier recours, après la réduction et la réutilisation. En diminuant notre consommation et en optant pour des produits durables et réutilisables, nous pouvons réduire notre impact sur l'environnement et diminuer le besoin de recycler.

Les bétons conçus avec des granulats de béton de ciment recyclé présentent des caractéristiques bien particulières si on les compare aux bétons classiques. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- Des résistances à la compression et à la traction inférieures d'environ 10 à 30 %;
- Des modules élastiques inférieurs d'environ 15 à 40 %;
- Une moins bonne adhérence entre la pâte de ciment et le granulat.
- Des retraits plus élevés de l'ordre de 50 à 100 %.

# **Chapitre IV: Programme expérimental**

## *A/ présentation et Caractéristiques des matériaux utilisés*

### **IV.1 Introduction :**

L'objectif de ce travail est l'étude du comportement à haute température du béton confectionné à base de sable de carrière et de brique concassée. L'étude expérimentale est effectuée sur des échantillons prismatiques de micro béton soumis à des températures élevées, des tests de résistance à la compression, de flexion et de traction ainsi que des mesures de perte de masse ont été effectués. En effet, notre recherche a pour objet l'étude de la possibilité d'utiliser les déchets de brique concassée comme sable dans le béton en substitution massique de sable, avec des taux de substitution de (**0%, 25%, 50% ,75%, 100%**). Ensuite, évalué l'effet de l'incorporation de fumée de silice et d'un adjuvant super plastifiant sur les caractéristiques du béton soumis à des hautes températures.

Ajoutons enfin que la caractérisation physique des matériaux et les différents essais sur les échantillons de bétons ont été réalisés dans le Laboratoire pédagogique de génie civil de l'université Mohamed Boudiaf - M'silla- et le Laboratoire de recherche des géo matériaux de l'université de M'silla.

### **IV.2 Caractérisation des matériaux utilisés :**

Les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection des différents échantillons de micro béton et la méthode de formulation nous permet de suivre l'évolution des différentes propriétés des éprouvettes réalisées

Les matériaux utilisés sont:

- ✚ Sable concassé (0/5)
- ✚ Le ciment : ciment portland NA 442/2013.GICA
- ✚ Un gravier (3/8)
- ✚ Granulats recyclé (SDBR)
- ✚ Eau de gâchage (l'eau de robinet du laboratoire).
- ✚ Fumée de silice
- ✚ L'adjuvant : Le Super plastifiant (MEDAFLOW 30).

### **IV.3. Essais sur les granulats**

#### **IV.3.1 Analyse Granulométrique :**

On appelle granulat un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, de provenance naturelle ou artificielle, destinés à la confection :

- ✚ Des mortiers, des bétons
- ✚ Des couches de fondation, des couches de base et de roulement des chaussées,

Les granulats sont appelés fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballast suivant leurs dimensions. [41]

#### **A.Principe de l'essai :**

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les masses des différents refus et tamisas sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique. [41]



**Figure IV.1 : Analyse granulométrique**

### A.Mode opératoire :

- ↪ Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant de l'ouverture des mailles en ajoutant le couvercle et le fond.
- ↪ Verser le matériau sec dans la colonne de tamis.
- ↪ Agiter automatiquement cette colonne
- ↪ Reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture, en adaptant un fond et un couvercle.
- ↪ Nous prenons le poids de chaque tamis à l'aide d'une balance électronique.
- ↪ Varier la validité de l'analyse granulométrique imposée par la Norme NF EN 933-1 (différence entre la somme des masses de refus et de tamisats et de la masse initiale).

### c.Les résultats des analyses granulométriques

Les résultats de l'analyse granulométrique sont représentés sur le (Tableau 4.1), les courbes granulométriques sont représentées dans la (Figure IV.2).

**Tableau IV.1** : l'analyse granulométrique de (3/8) du gravier concassé

Poids initial sec :		2000	G		
Module	Maille tamis	Refus partiel (gr)	Refus cumulé (gr)	% Refus	% Tamisât
	8	2.5	2.5	0.125	99.88
	6.3	142	144.5	7.23	92.78
	5	729.5	874	43.70	56.30
	4	732	1606	80.30	19.70
	2.5	379	1985	99.25	0.75
<b>Fond</b>	<b>0</b>	15	2000	100.00	0.00

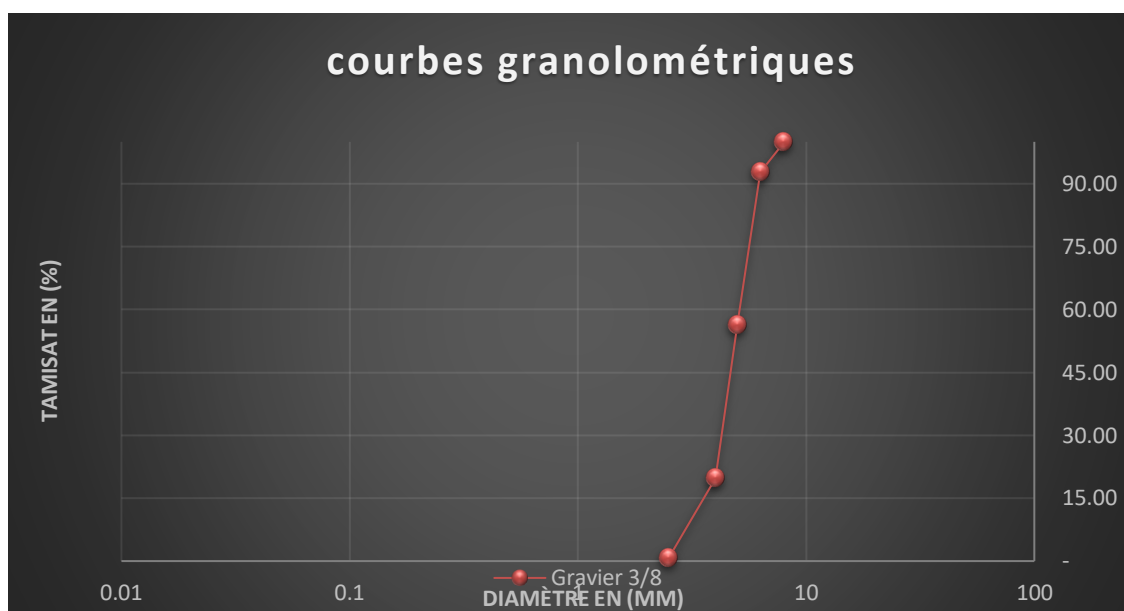


Figure IV.2 : Analyse granulométrique Gravier 3/8.

### IV.3.2 : Masse volumique apparente :

#### A : Définition l'essai : NF P 18-554

- ✚ La densité apparente d'un matériau est la densité d'un mètre cube de matériau Prenez le tas, y compris les vides perméables et imperméables des particules ainsi que vides entre les particules.
  - ✚ La densité apparente d'un matériau peut avoir des valeurs différentes selon qu'il Sera déterminé par le matériau compacté ou non compacté.
  - ✚ La densité apparente sèche  $P_d$  est la masse du volume occupé par le granulat sec ( $M_s$ ) Apparent (volume solide :  $V_s$  + volume de vide  $V_v$ ).
- Déterminer le volume du conteneur =  $V$
  - Notez la masse du récipient vide propre =  $M_0$
  - Mettez le récipient dans le bac en plastique
  - Couler le granulat sec couche par couche sans décanter : à la main Entonnoir naturel
  - Déplacez-vous horizontalement d'avant en arrière avec une règle en métal pour le nivellement
  - Notez la masse du récipient rempli =  $M_1$
  - Verser l'agrégat dans un autre bac en plastique

- Répétez la procédure au moins deux (2) fois avec un autre échantillon du même type.
- Résulta (La masse volumique apparente est donnée par :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

**Tableau IV. 2 Masse volumiques apparente de Gravier 3/8.**

Fraction	Essai	M1 (Kg)	Fraction	Essai	ρ app moyen  (kg/l)
3/8 V <sub>r</sub> =71	<b>1</b>	<b>2.924</b>	<b>10.068</b>	<b>1.020</b>	<b>1,011</b>

### IV.3.3 : Masses volumiques absolues :

L'essai est régi par la norme NFP 18-301 ; il est défini comme la masse volumique du matériau composant le granulat, quels que soient les vides pouvant exister avec les particules.

#### A. But de l'essai :

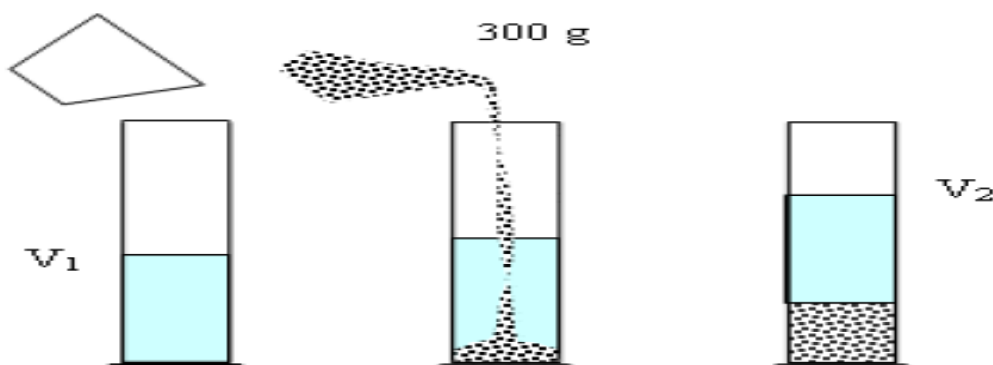
Le but de ce test est de pouvoir connaître la qualité de la fraction particulière lors par exemple de l'élaboration d'une composition de béton. Ce paramètre détermine notamment la masse ou le volume de différentes classes de particules mixtes. Obtenir un béton aux propriétés imposantes. Dans ce travail, nous avons utilisé la méthode du cylindre gradué, qui est simple, rapide et utilise un équipement de laboratoire courant.

b. Procédure :

- ✚ Placez le tube à essai dans un récipient en plastique.
- ✚ Versez de l'eau dans le tube à essai (presque à mi-hauteur) et notez V1.
- ✚ Préparer un échantillon de granulat sec de masse M (environ 400 g).
- ✚ Utilisez l'entonnoir pour verser l'échantillon dans le tube à essai et remuez le mélange avec une barre d'agitation pour libérer les vides (air).

- ✚ Notez la nouvelle quantité d'eau dans le tube V2.
- ✚ Versez l'agrégat dans un seau en plastique et jetez le contenu.
- ✚ Répétez l'opération au moins 3 fois. La densité absolue est donnée par la formule

$$\rho_{abs} = \frac{M}{(V_2 - V_1)}$$



**Figure IV.3 :** La Masse Volumique absolues

**Tableau IV.3 :** Masse volumiques absolue de Gravier 3/8.

Fraction	Essai	M1 (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	$\rho_{abs}$ (g/ml)	$\rho_{abs}$ moyen (g/ml)
3/8	1	400	400	550	2.66	2.60
	2			560	2.50	
	3			550	2.66	

#### IV.3.4: Absorption d'eau:

La connaissance du coefficient d'absorption d'eau du granulat permet d'ajuster la teneur en eau de gâchage entrant dans la composition du béton. Ainsi, l'absorption d'eau des granulats a été mesurée selon la procédure de la norme [NF EN 1097-6, 2001]. Le coefficient d'absorption

d'eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon après absorption d'eau à la masse sèche de l'échantillon. Par conséquent, le coefficient d'absorption Abs est défini comme:

$$Abs = \frac{M_{humide} - M_{sech}}{M_{sech}} * 100$$

Humide - Msec désigne la masse de l'eau absorbée après 48 heures d'immersion. Msec la masse sèche de l'échantillon après passage à l'étuve à 105°C.

**Tableau IV.4 :** coefficient d'absorption d'eau des (3/8).

Fraction	Essai	M1(g)	M2 (ml)	Abs%	Abs% moyen
3/8	1	500	526	5.2	5.4
	2		528	5.6	

### IV.3.5: La porosité

La porosité des échantillons de granulats est un paramètre important dans la formulation du béton car elle affecte sa compacité et donc ses propriétés mécaniques. Les valeurs P de porosité pour différents agrégats ont été calculées à l'aide de l'équation suivante :

$$P\% = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) * 100$$

**A : gravier de 3/8.**

**Tableau. IV.5 :** La porosité de (3/8)

Graviers	(P %)
3/8	61.11

### IV.3. 6 : La Compacité :

$$C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}$$

**Tableau IV.6 :** Compacité des fractions (3/8)

Graviers	La compacité C (%)
3/8	38.88

**IV.3.7 : Indice des vides :**

$$I = \frac{P}{C}$$

**Tableau IV.7 :** Indice de vide des (3/8).

Fraction	Indice de vide
3/8	1.57

**IV.3.8 : Résistance à la fragmentation :**

Introduire l'échantillon (M=5000 g) avec la charge de boulets (Diamètre important) 500 rotations (30 à 33 tours/min). Mesurer la masse « m » d'élément < 1,6 mm Coefficient de los Angeles « LA »

$$LA = \frac{m}{5000} * 100$$

Si LA<20 : le gravier très dur.

Si 20<LA< 30 : le gravier dur.

Si LA>30 : le gravier friable

**Tableau IV.8 :** los Angeles des (3/8)

Nature	Fraction	M1(g)	M2(g)	Number des boules	L <sub>A</sub>
<b>G. concassé</b>	3/8	5000	1205	7	24.4

**IV.4 : Sable concassé 0/5 :**

**IV.4.1 : Composition granulométrique :**

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau.

Tableau IV.9 : l'analyse granulométrique d'un sable concassé 0/5

Poids initial sec :		2000 g			
Module	Maille tamis	Refus partiel (gr)	Refus cumulé (gr)	% Refus	% Tamisat
	5	4	4	0.20	99.80
	4	4	8	0.40	99.60
	2.5	220.8	228.8	11.44	88.56
	1.25	543.7	772.5	38.63	61.38
	0.63	439	1211.5	60.58	39.43
	0.315	418	1629.5	81.48	18.53
	0.16	252.5	1882	94.10	5.90
<b>Fond</b>	<b>0</b>	<b>118</b>	<b>2000</b>	<b>100</b>	<b>0.00</b>

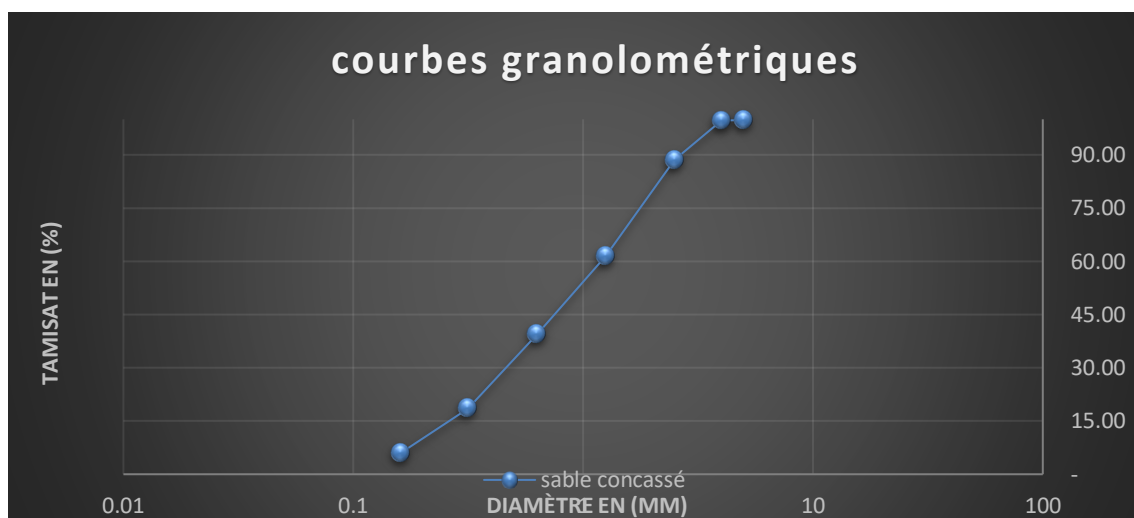


Figure IV.4 : L'analyse granulométrique d'un sable concassé 0/5

#### IV.4.2 : Module de finesse (EN 196-6) :

Le module de finesse (MF) est une facture très importante qui nous permet de juger la qualité du sable, il est donné par la relation suivant :

$$M_f = \sum \frac{R_c}{100}$$

**RC** : Refus cumulé.

Les normes soviétiques spécifient le  $M_f$  des sables comme suit :

- Sable gros  $M_f \geq 2.5$
- Sable moyen  $2 < M_f < 2.5$
- Sable fin  $1.5 < M_f < 2$

Sable très fin  $1 < M_f < 1.5$

Donc, dans notre cas  $M_f = 2.86$ . Le sable concassé avec  $M_f > 2,5$  : C'est un sable gros

#### IV.4.3 : Masse volumique apparente : NF P 18-55

##### 1-À l'état lâche :

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique apparente du sable concassé.

Volume de récipient  $V_r = 1000 \text{ cm}^3$ .

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

**Tableau IV.10** : Masses volumiques apparentes de sable 0.5 Concassée l'état lâche.

N° d'essais	$M_1$ (g)	$M_2$ (g)	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{app}$ moye (g/cm <sup>3</sup> )
01	900	1197	1,33	1,34
02	900	1215	1,35	
03	900	1201	1,33	

##### 2- À l'état compact:

La masse volumique à l'état compact est la masse du matériau par unité de volume après Compactage y compris les vides restants entre les grains, elle est souvent supérieure à la masse Volumique à l'état lâche.

Même procédure que celle à l'état lâche. Après remplissage du récipient (après tassement) on soumet ce dernier à 30 secousses manuelles. On complète le remplissage du

réceptient après le tassement du sable, puis on nivelle ce dernier et l'on pèse. Soit  $M_2$  le poids de l'ensemble (sable+

Réceptient) la masse volumique à l'état compact est donnée par la formule suivante où :

$M_1$  : masse du réceptient à vide.

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

**Tableau IV.11 : Masse volumique apparente du sable concassé à l'état compact**

N° d'essais	$M_1$ (g)	$M_2$ (g)	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{app}$ moyenne (g/cm <sup>3</sup> )
01	900	1365,1	1,51	1,49
02	900	1356,5	1,50	
03	900	1330,4	1,48	

#### IV.4.5 : Porosité :

La porosité d'un matériau est le rapport du volume total, elle représente donc le degré de remplissage de son volume occupé par les vides. Cette propriété ou notion de porosité est importante car elle influe sur certaines caractéristiques fondamentales telles que :

- Résistance mécanique élevée, donc porosité faible.
- Capacité d'absorption d'eau (A) élevée, donc la porosité grande.

La porosité est donnée par la relation suivante :

$$P (\%) = [1 - \rho_{app} / \rho_{abs}] \times 100$$

On distingue deux cas pour le sable concassé :

- Etat lâche :  $p_l = 50,73\%$
- Etat compacte :  $p_c = 45,22\%$

#### IV.4.6 : Compacité :

La compacité d'un matériau est la proportion du volume que le matériau occupe réellement La matière solide qui la compose, c'est-à-dire le rapport du volume absolu des particules au volume L'apparence du matériau.

$$C = ( \rho_{app} / \rho_{abs} ) = 100 - P$$

On distingue deux cas pour le sable concassé :

- Etat lâche : CL= 49,27 %
- Etat compacte : Cc = 54,78 %

#### IV.4.7: Indice des vides:

L'indice des vides est le rapport entre le volume du vide et le volume de solide.

$$e = V_v / V_s = P / (100 - P)$$

Avec P en pourcent (%).

On distingue deux cas pour le sable concassé :

- ✚ Etat lâche : e= 1,02 %
- ✚ Etat compacte : e= 0,82 %

Les résultats de la porosité, la compacité et l'indice de vide sont regroupés dans le tableau suivant pour le sable concassé :

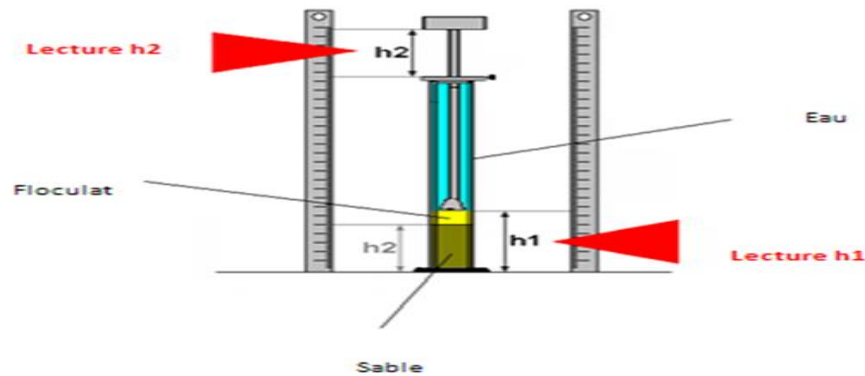
**Tableau IV.12** : La porosité, la compacité et l'indice de vide pour le sable concassée

Porosité P (%)		Compacité C (%)		Indice des vides e	
Lâche	Compact	Lâche	Compact	Lâche	Compact
50.73	45.22	49.27	54.78	1.02	0.82

#### IV.4.8 : Equivalent de sable NF-18-598 :

But : Cet essai a pour but de mesurer la propreté d'un sable, c'est-à-dire la quantité de particules fines et éléments fins présents dans le sable.

Principe de l'essai : L'essai consiste à laver l'échantillon de sable puis à déterminer la quantité d'éléments fins (herbe argileuse et impuretés) contenue dans cet échantillon, par rapport à la quantité d'élément sable. Est un multiple du pourcentage de la hauteur de la partie sédimentaire à la hauteur (100) Total partie floc et sédiment, nous avons :



**Figureur.IV.5** : Essais Equivalant de sable

- ↪ Équivalent sable piston : mesure piston (E.S.P)
- ↪ Équivalent sable : (E.S.V)

Les tests ont été effectués à 20°C sur une petite portion de sable passé au tamis de 5 mm

**A : Equivalent de sable visuel (E.S.V) :**

- ↪ Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h1 du niveau supérieur du floculant Jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règlette.
- ↪ Mesure également avec le règlette la hauteur h2 comprise entre le niveau supérieur de la partie Sédimentaire et fond de l'éprouvette.

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} * 100$$

Où  $h_2 < h_1$ .

$h_1$  la hauteur du sable + élément fins.

**B : Equivalent de sable par piston (E.S.P) :**

- ↪ Introduire le piston dans l'éprouvette et descendre doucement

Jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.

- ↪ Introduire le réglet dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston. Soit  $h_2$  la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée

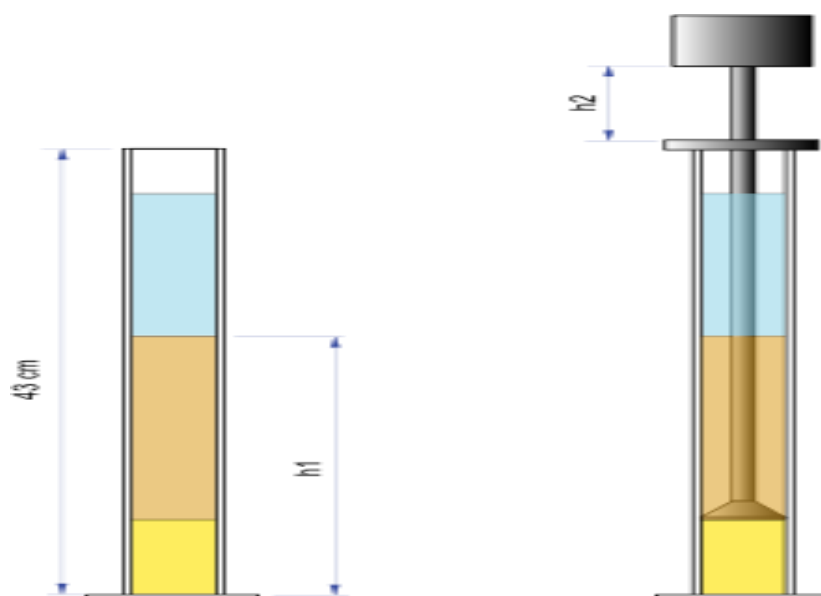


Figure IV.6 : Essai d'équivalent de sable

Tableau IV.13 : Equivalent du sable de sable concassé.

<i>N<sup>o</sup></i> <i>d'essais</i>	$h_1$ (cm)	$h'_2$ (cm)	ESV (%)	$h_2$ (cm)	ESP (%)
1	12.45	9.6	77.1	8.6	69.07
2	13.1	9.5	72.5	8.6	65.64
3	12.75	8.7	68.23	8.8.6	66.66

(ESV)  $_{moye} = 72.61\%$

(ESP)  $_{moye} = 67.12\%$



Figure IV.7 : Essai d'équivalent de sable

Tableau IV.14 : Comparaison des résultats

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
ES<65	ES<60	Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65<ES<75	65<ES<70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75≤ES≤85	70≤ES≤80	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
E.S ≥85	E.S >80	Sable très propre : L'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

**On a:**

<b>ESV moy</b>	<b>72,61%</b>	<b>65% ≤ ESV &lt; 75%</b>
<b>ESP moy</b>	<b>67,33%</b>	<b>65% ≤ ESP &lt; 70%</b>

Pour le sable concassé c'est un sable légèrement argileux de propriété admissible poudres bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.

#### **IV.5 : Briques concassés et ajouts :**

##### **IV.5.1. Sable de brique concassé :**

##### **IV.5.1.1. Analyse Granulométrique :**

L'analyse granulométrique correspondant à un sable : Faire l'analyse granulométrique du sable en suivant le mode opératoire de l'analyse granulométrique du gravier. Mais différentes séries de tamis.

**Tableau IV.15 : L'analyse granulométrique d'un sable de brique concassé**

<b>Poids initial sec :</b>		<b>2000 g</b>			
<b>Module</b>	<b>Maille tamis</b>	<b>Refus partiel (gr)</b>	<b>Refus cumulé (gr)</b>	<b>% Refus</b>	<b>% Tamisat</b>
	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>0.20</b>	<b>99.80</b>
	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>0.45</b>	<b>99.55</b>
	<b>2.5</b>	<b>214.5</b>	<b>223.5</b>	<b>11.16</b>	<b>88.84</b>
	<b>1.25</b>	<b>308</b>	<b>531.5</b>	<b>26.55</b>	<b>73.45</b>
	<b>0.63</b>	<b>280</b>	<b>811.5</b>	<b>40.53</b>	<b>59.47</b>
	<b>0.315</b>	<b>364</b>	<b>1175.5</b>	<b>58.72</b>	<b>41.28</b>
	<b>0.16</b>	<b>660</b>	<b>1835.5</b>	<b>91.68</b>	<b>8.32</b>
<b>Fond</b>	<b>0</b>	<b>166.5</b>	<b>2002</b>	<b>100</b>	<b>0.00</b>

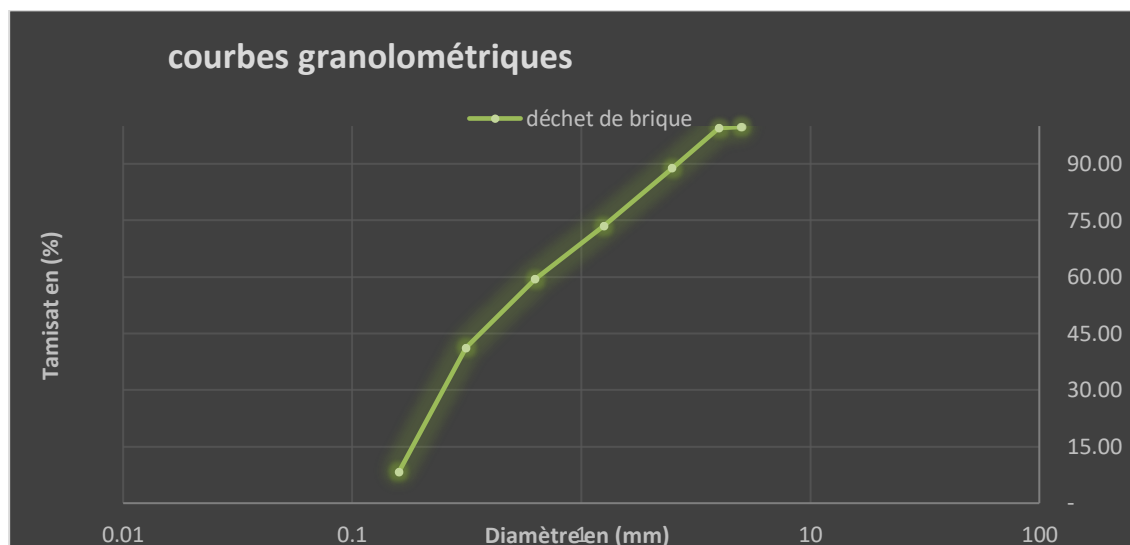


Figure IV.8 : L'analyse granulométrique de la brique concassé

#### IV.5.3 : La Fumée de silice (FS) :

La fumée de silice est un type de poussière très fine, composée de particules de silice cristalline, qui peut être générée lors de la manipulation de matériaux contenant du silicium. Elle est souvent utilisée dans la production de ciment, de verre, de céramiques, de peintures et de revêtements muraux. La fumée de silice peut être dangereuse pour la santé si elle est inhalée, car les particules extrêmement fines peuvent atteindre les poumons et causer des problèmes respiratoires tels que la silicose ou le cancer des poumons. Pour cette raison, il est important de prendre les mesures de protection appropriées lors de la manipulation de matériaux contenant de la silice cristalline et de suivre les directives de sécurité de l'industrie.



Figure IV.9 : Poudre de la fumée de silice






**Tableau IV.16 :** Caractéristiques chimiques et physique de la fumée de silice

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Valeurs	Unité
SiO <sub>2</sub>	85 – 95	Masse volumique absolue	2.2	g/cm <sup>3</sup>
CaO	0.8 – 1.2			
MgO	1 – 2	Densité	250	kg/cm <sup>3</sup>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05 – 1	Surface spécifique de Blaine	15000	m <sup>2</sup> /kg
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 – 3			
Pert au feu	0.5 – 1	Taille des particules	<1	µm

#### IV.6: Le ciment:

C'est un Ciment Portland CEM I 42,5 N Conforme à la Norme algérienne NA 442 (EN 197-1)  
(Gica béton)

Domaine d'application:

-  Béton étanche.
-  Béton résistant au gel
-  Béton pompé.
-  Mortier.
-  Chapes.

#### Dosages:

Sauf pour composition spécifique, dosage moyen pour béton courant.

#### Conditionnement :

Sac et vrac

### Caractéristiques techniques Analyses chimiques :

- + Teneur en sulfates (SO<sub>3</sub>) < 2,5%
- + Teneur en Chlorures (Cl) < 0,1%
- + Teneur en (MgO) < 1%
- + Perte au feu (PAF): 0,5–1,5%

### Composition minéralogique du clinker (Selon BOGUE) :

C3S > 60±3% C3A: 3 – 7, 5 %

### Propriétés physiques:

- + Consistance normale : 26 à 28%
- + Début de prise ≥ 60min
- + Fin de prise : 200 à 350min
- + Expansion <5mm
- + Finesse (SSB) : 3200-3800 (Cm<sup>2</sup>/g).

### Résistance à la compression:

2 jours (EN 196-1) ≥ 10 Mpa

28 jours (EN 196-1) ≥ 42.5 Mpa

### Consignes de sécurité:

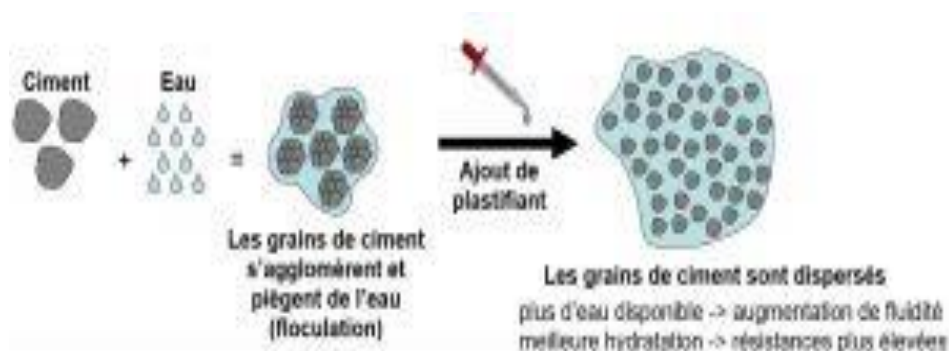
- + Mettre hors de portée des enfants
- + N'inhalez pas la poussière
- + Eviter tout contact avec la peau et les yeux.
- + Utiliser des équipements adaptés : gants, chaussures de sécurité

### IV.7 : L'adjuvant :

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on incorpore dans le béton en faible quantité au moment de sa fabrication et qui ont pour objectif d'améliorer ses propriétés à l'état frais et/ou à l'état durci. Voici tout ce qu'il faut savoir sur les adjuvants pour béton. Les super plastifiants : ces adjuvants ont les mêmes fonctions que les plastifiants/réducteurs d'eau mais leur effet est plus important. Ils permettent de réduire fortement la teneur en eau d'un béton

donné sans modifier sa consistance, ou ils augmentent considérablement l'affaissement ou l'étalement sans modifier la teneur en eau. Ils peuvent aussi être utilisés pour produire les deux effets à la fois. Ces adjuvants sont utilisés pour confectionner des bétons fluides, des bétons autobloquants ou autonivelants et des bétons à hautes performances.

**Figure IV.10** : Mécanisme d'action des plastifiants et super plastifiants



#### **IV.7.1 : Description :**

Le MEDAFLOW 30 est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de Poly carboxylates d'Ether qui améliore considérablement les propriétés des bétons. Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet sans modifier la consistance, de réduire fortement la teneur en eau du béton. Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet de retard de prise.

#### **Propriétés**

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :

##### **Sur béton frais :**

- ✚ Obtention d'un rapport E/C très faible
- ✚ Amélioration considérable de la
- ✚ Une très bonne maniabilité
- ✚ Éviter la ségrégation
- ✚ Faciliter la mise en œuvre du béton



FigurIV.11 : Super plasticant MEDAFLOW 30

### IV.7.2 : Caractéristiques

Tableau IV.17 : Caractéristiques de MEDAFLOW 30

Super plasticant	MEDAFLOW 30
Forme	Liquide
Couleur	Brun clair
PH	6 – 6,5
Densité	1,07 ± 0,01
Teneur en chlore (g/l)	< 0,1 g/l
Extrait sec (%)	30

### IV.8 L'eau de gâchage:

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

#### **IV.9 : La formulation des bétons :**

Le calcul de la composition du béton a pour but de déterminer le dosage en ciment, granulats (fins et gros) et en eau pour un dosage de 1m<sup>3</sup> de béton frais, afin d'obtenir un mélange homogène et d'une capacité élevée, ainsi qu'une résistance mécanique acceptée. Il existe plusieurs méthodes de détermination la composition du béton proposé et appliqué dans les différentes payes du monde, permis ces méthodes on peut citer :

- Méthode de BOLOMEY (méthode à granularité continue).
- Méthode de FAURY
- Méthode de JOISEL
- Méthode de VALETTE
- Méthode de DREUX GORISSE □ Méthode des volumes absolus
- Méthode générale du CES (centre d'essai des structures)

L'objectif de toutes les méthodes de formulation des bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible. Dans notre travail nous utiliserons la méthode pratique de DREUX – GORISSE

##### **IV.9.1 : Méthode de formulation de Dreux- Grise :**

Cette méthode française est de nature fondamentalement empirique qui date de 1970. Dreux a mené une large enquête pour recueillir des données sur des bétons satisfaisants, sur la base D'une analyse statistique de ce grand nombre de bétons et en combinant les courbes granulaires obtenues, ils ont pu fonder une approche empirique pour déterminer une courbe granulaire de référence ayant la forme de deux lignes droites dans un diagramme Semi-logarithmique Elle est d'autre part très simple d'utilisation puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés [42]

Données de base :

##### **IV.9.2. Dosage en ciment et en eau :**

###### **❖ Résistance visée :**

Par sécurité, la résistance visée, représente une majoration de 15% de la résistance désirée. Ainsi la résistance visée,  $F'_c = F_{c28} + 15\% F_{c28}$

$$F'_C = 1.15 \times F_{c28}$$

❖ **Dosage en ciment et en eau :**

Le dosage en eau et ciment dépend de la résistance visée, et de la qualité du ciment et des granulats. Ainsi expérimentalement, on établit une relation entre l'ensemble de ces paramètres.

$$F'C = \sigma_c \cdot G \cdot (C/E - 0,5)$$

Avec :

- F'C : résistance visée à 28 jours
- C : dosage du ciment en kg/m<sup>3</sup> de béton
- E : dosage de l'eau en l/m<sup>3</sup> de béton
- $\sigma_c$ : C lasse vraie du ciment en MPa
- G : coefficient granulaire.

Ce coefficient représente qualité des granulats. Expérimentalement, il est établi que cette Qualité dépend du granulat, mais également de son diamètre selon les valeurs suivantes

**Tableau IV.18 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire**

Qualité des granulats	Dimension des Granulats		
	D < 12,5	20 < D < 31,5	D < 50
	Fins	Moyens	Gros
<b>Excellente</b>	<b>0,55</b>	<b>0,60</b>	<b>0,65</b>
<b>Bonne</b>	<b>0,45</b>	<b>0,50</b>	<b>0,55</b>
<b>Passable</b>	<b>0,35</b>	<b>0,40</b>	<b>0,45</b>

Cette relation permet de déterminer le rapport C/E :

$$C/E = F'C / (\sigma_c G) + 0,5$$

Il est à observer au travers cette relation que le dosage en ciment est d'autant plus important que la résistance visée du béton soit forte. Inversement, le dosage en ciment diminue lorsque la résistance du ciment augmente. Pour une résistance visée, Il y a également moins besoin

de ciment lorsque la qualité ou la dimension des granulâtes augmentent. Le problème consiste à délier le dosage en ciment du dosage en eau. Le dosage en eau dépend également de l'ouvrabilité désirée. Ainsi en intégrant l'ouvrabilité désirée, expérimentalement, et à partir du rapport C/E, il est possible de déterminer le dosage en ciment par l'abaque suivant. La détermination du dosage en ciment s'obtient par cet abaque à double entrée. En abscisse, la valeur de l'affaissement désirée est entrée et en ordonnée le rapport, C/E. L'intersection des deux entrées, indique la sortie, la courbe donnant le dosage en ciment en kg. Par exemple, pour un béton classique, c'est-à-dire

**Un B25P, le rapport C/E=1.76 A=8cm.**

L'intersection de ces deux entrées se fait sur la courbe du dosage à 350kg de ciment. Le dosage en ciment pour obtenir 1m<sup>3</sup> de béton en place est de 350kg. Le dosage en eau s'en déduit : C/E=1.76 avec C=350kg, E=C/1.71=> E=350/1.76=198.86kg d'eau, soit 204.6 d'eau. Il est à observer que plus l'ouvrabilité désirée est importante plus il faut d'eau et plus il faut de ciment. De même le dosage en ciment est limité à 400 kg/m<sup>3</sup> de béton en place. Au-delà le ciment et l'eau seraient en trop forte concentration dans le béton. Cela aurait pour effet de produire des fissures de retrait. Ainsi, pour des rapports C/E et une ouvrabilité à atteindre qui nécessiteraient plus de 400 kg de ciment, le dosage en ciment est limité à 400 kg et l'ouvrabilité désirée est atteinte en ajoutant un fluidifiant au béton.

### **IV.9.3. Ajustement du dosage en eau :**

Le dosage en eau est à ajuster. En effet l'eau doit pouvoir humidifier tous les grains du mélange. Or pour humidifier un grain, il faut d'autant plus d'eau que son diamètre est petit. La quantité d'eau dépend donc également du diamètre des grains à humidifier. Le dosage en eau déterminé est indiqué pour mouiller tous les grains du mélange granulaire d'un diamètre représentatif maximal, D=8mm. Pour les autres diamètres, il faut majorer ou minorer ce dosage selon ce diamètre D.

**Tableau IV.18 :** Correction du dosage en eau selon le diamètre, D du mélange granulaire

<b>Diamètre en (mm)</b>	<b>10</b>	<b>12.5</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>31,5</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>Correction en (%)</b>	+9	+6	+4	+2	0	- 2	-4	-6

Ainsi, pour un mélange granulaire de diamètre, D=8mm, il faut majorer le dosage en eau de 9%. Pour un dosage initial de 206 litres d'eau le dosage doit être augmenté à

$$E = E_{calculée} + 0.04 \times E_{calculée} = 198.86 + 0.09 (198.86) = 216.76 \text{ Litre}$$

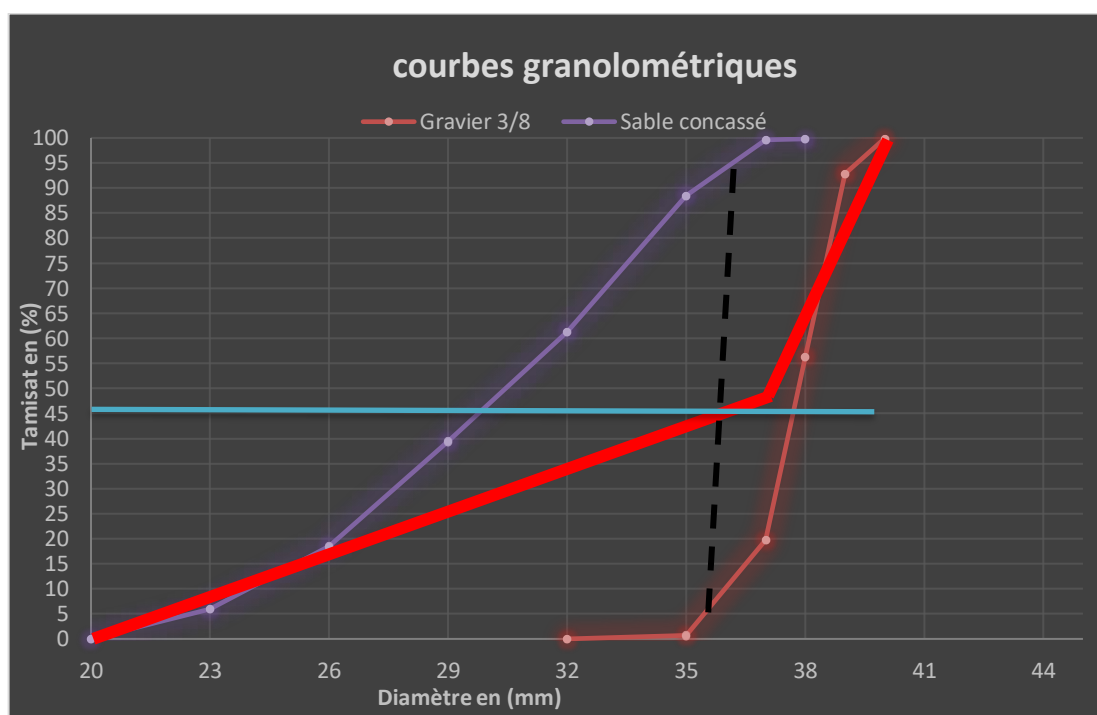
E après correction = 216.76 Litres

#### IV.9.4. Dosage des granulats :

La granularité du mélange obtenu peut être représentée et approchée par deux segments de droite. Cette courbe simplifiée une modélisation de la courbe réelle

Cette modélisation est intéressante car cette courbe théorique est suffisamment proche de la courbe réelle pour être significative et elle peut être entièrement déterminée à partir de seulement trois points appelés respectivement O origine, A point de brisure, B extrémité. Pour les granulats à béton, il apparaît que les points O, A et B, sont invariable quel que soit les proportions du mélange.

Figur IV.12 : courbes de calcul de la composition du béton



Le point d'origine, O est fixé à 0% de tamisât sur le plus petit tamis (0.08 mm). Ce point est repéré par ses coordonnées : O [0.08 ;0] de même, le d'extrémité, B se situe le tamis, D du gravier, avec 100% de tamisât. Ce point est repéré par ses coordonnées :

B [D ; 100]. Pour le point de brisure A, il apparaît que le tamis sur lequel il se situe est invariable quel que soit les proportions du mélange. En observant de plus après, il apparaît que ce tamis se situe à  $D/2$ , si  $D \leq 20$ mm, et au milieu de l'intervalle [5 ; D] si

$D > 20$  il reste à déterminer le pourcentage de tamisât du point de brisure. Cette position dépend des proportions du mélange. Or, les proportions du mélange influent sur la compacité du béton

et par conséquent sur sa résistance. La meilleure compacité au béton. Cette position est optimisée par la méthode dite

#### IV.9.4.1. DREUX-GORISSE.

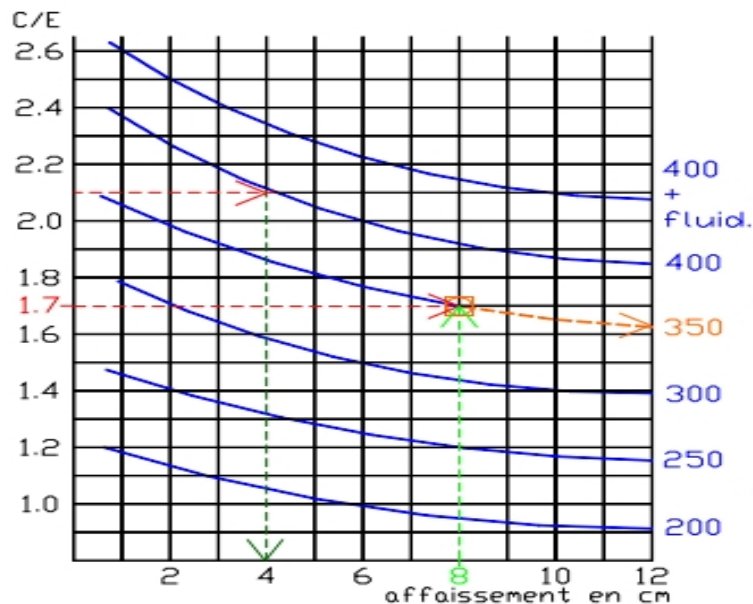
L'ordonnée optimisée du point de brisure, YA est déterminée par la relation suivante :

$$YA = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

Cette relation prend en compte l'influence de la forme des granulats, du dosage en ciment, de la vibration, de la finesse du sable et de la mise en œuvre du béton par une pompe à béton sur

la compacité du béton et sa facilité de mise en œuvre. K, optimisation de la compacité en fonction du type de vibration, de la forme des granulats, et du dosage en ciment. Voir tableau

ci-contre



**Figure IV.13** : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment prévoir en fonction du rapport C/E

**Tableau IV.19 : valeur du terme correcteur k**

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Format des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
<b>Dosage ciment</b>	<b>400</b> +f	<b>-2</b>	<b>0</b>	<b>-4</b>	<b>-2</b>	<b>-6</b>	<b>-4</b>
	<b>400</b>	<b>0</b>	<b>+2</b>	<b>-2</b>	<b>0</b>	<b>-4</b>	<b>-2</b>
	<b>350</b>	<b>+2</b>	<b>+4</b>	<b>0</b>	<b>+2</b>	<b>-2</b>	<b>0</b>
	<b>300</b>	<b>+4</b>	<b>+6</b>	<b>+2</b>	<b>+4</b>	<b>0</b>	<b>+2</b>
	<b>250</b>	<b>+6</b>	<b>+8</b>	<b>+4</b>	<b>+6</b>	<b>+2</b>	<b>+4</b>
	<b>200</b>	<b>+8</b>	<b>+10</b>	<b>+6</b>	<b>+8</b>	<b>+4</b>	<b>+6</b>

La valeur trouvée est  $K=+2$

$K_s$ , ajustement de la granularité du sable

- Pour FM est varié de 2 à 3  $K_s=6$  MF-15

On a  $M_f = 2.947$   $K_s = (6 \times 2.947) - 15 = 2.682$

$K_p$ , ajustement du dosage en sable pour faciliter le transfert par pompes à béton

$K_p = 0$  si le béton est non pompable

Donc :  $K_p = 0$

Pour un béton non pompable réalisé avec des granulats roulés dont le gravier a un diamètre,

$D = 8$  mm, le sable a un module de finesse  $MF = 2.947$ , un dosage en ciment de 350 kg

$K = 0$ ,

$K_s = (6 \times 2.947) - 15 = 2.682$

$K_p = 0$ ,

$Y_A = 50 - \sqrt{8} + 2 = 49.18\%$

$X_A = 8/2 = 4$  mm

Le point A à pour coordonnées : A [4 ; 49.18]

Ainsi la courbe du mélange optimum, c'est-à-dire du mélange permettant d'obtenir la meilleure compacité est complètement déterminée.

#### IV.9.4.2. La ligne de partage :

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe des plus petits granulats au point d'ordonnée 5% de la courbe granulaire des plus gros granulats. Le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et de gravier. Ces proportions sont lues sur le pourcentage de tamisât correspondant à ce point d'intersection. Ce pourcentage indique la proportion de sable, le complément donne la proportion de gravier. Le mélange optimal est obtenu avec un volume absolu de 40% de sable et 60% de gravier (15% gravier 3/8 et 49.6% et sable concassé 35.4%).

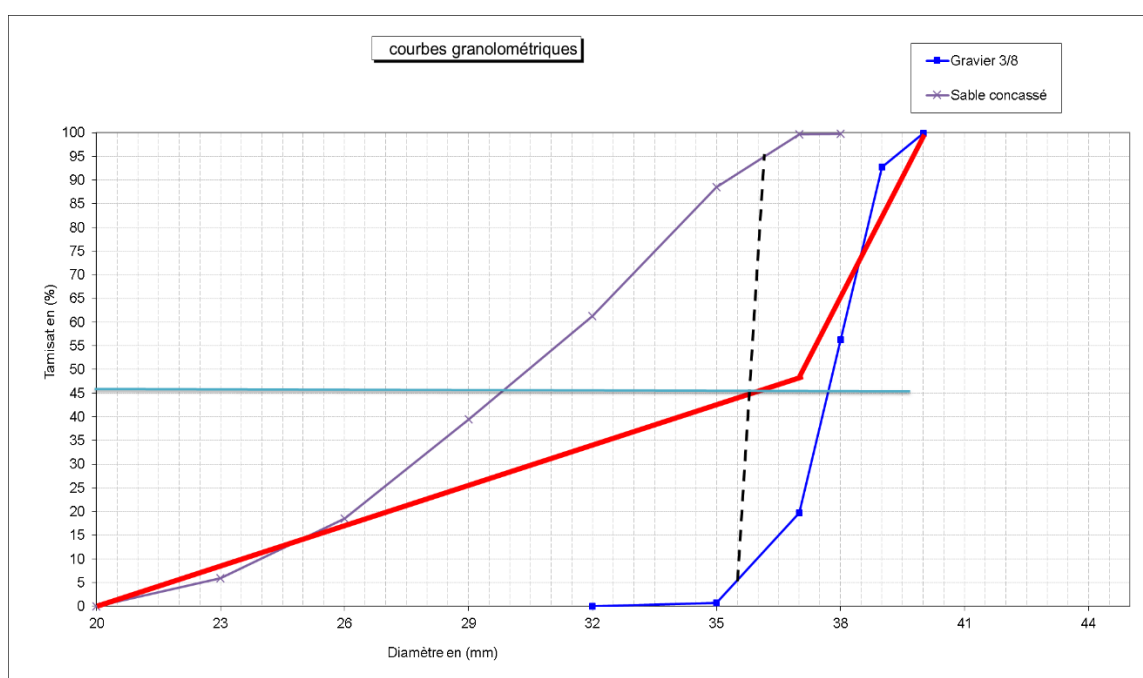


Figure IV.14 : les lignes de partage

#### III.7.4 3. Dosage en masse des granulats :

La connaissance de la compacité du béton et des masses volumiques absolues des matériaux. La meilleure compacité est obtenue en vérifiant les proportions du mélange granulaire. Mais indépendamment de cela, elle dépend également du diamètre D des granulats, des conditions de vibration du béton et de sa plasticité. L'expérience permet de prévoir approximativement la compacité du béton selon les valeurs suivantes

IV.9.4.4. Coefficient de compacité :

Tableau IV.20 : Valeurs du coefficient de compacité  $\gamma$

Consistance	Serrage	Coefficient $\gamma$ en fonction du diamètre D des granulats						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

La correction effectuée, on trouve  $\gamma = 0.785$

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter la correction suivante :

Sable et gravier concassé = -0.03

Alors :  $\gamma = 0.785 - 0.03 = 0.755$

Toutes les masses des constituants du béton ont été déterminé pour obtenir un béton conforme aux attentes. Il est maintenant nécessaire de réaliser des éprouvettes, pour vérifier et ajuster les dosages expérimentalement afin de garantir la qualité du béton.

**IV.9.4.5. Quantité des agrégats en pourcentage :**

Sable concassée (%)=46%.

Gravier 3/8 (%)=54%.

**IV.9.4.6. Volume absolu de l'ensemble des granulats :**

On a :  $V = (1000 \times Y) - c =$

$C = c/3.1 = 350/3.1 = 112.90l$

Volume absolu de l'ensemble des granulats

$V = (1000 \times Y) - c = (1000 \times 0.755) - 112.9 = 642.1l / m^3$

$V_{\text{sable}} = 642.1 \times 46/100 = 295.36l$

$V_{3/8} = 642.1 \times 54/100 = 346.73l$

**IV.9.4.7. Dosage des granulats en kg dans 1 m<sup>3</sup> :**

Sable concassée [kg] =  $776.79 \times 2.63 = 637.1$

Gravies 3/8 [kg] =  $0.15 \times 692.1 \times 2.6 = 269.9$  litres

Gravies spécifiques sont :

Constituants	Les dosages
Sable concassée	637.1
Gravies 3/8	269.9

**Les dosages en matériaux secs seront donc en kg/ m<sup>3</sup> :**

Constituants	Les dosages kg/ m <sup>3</sup>
<b>Ciment</b>	350
<b>Sable</b>	776.79
<b>Gravier</b>	911.89
<b>Au total</b>	$\Sigma 2255.44$

➤ Au total =  $2038.68l / m^3$

$\Sigma 2255.44 Kg / m^3$

Notre béton a été formulé d'après la méthode de **DREUX GORISSE**

En plus de cela, nous avons ajouté

<b>Fumée de silice</b>	<b>10 % (poids de ciment)</b>
<b>Adjuvant super plastifiant</b>	<b>2 % (poids de ciment)</b>

**IV.9.4.7 Programmes expérimentale:**

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des mélanges réalisés dans la présente étude.

**Tableau IV.21 : l'ensemble des essais réalisés**

N	Sable %		Fumée de silice %	Adjuvant %	Température de traitement °C	Essais
	Sable concassé	Brique concassé				
1	100	0	0	0	20	- Compression
2	75	25	0	0	100	- Flexion
3	50	50	0	0	200	- Flexion
4	25	75	0	0	400	- Flexion
5	0	100	0	0	600	- Perte de masse
6	100	0	10	2	800	- Perte de masse
7	100	0	10	2	20	- Compression
8	75	25	10	2	100	- Flexion
9	50	50	10	2	200	- Flexion
10	25	75	10	2	400	- Flexion
11	0	100	10	2	600	- Perte de masse

#### **IV.10. Matériels et essais :**

Le malaxage : [NA EN 12390-2]

- Introduire gravier 3/8, ciment, sable 0/5 et brique concassé.
- Malaxer pendant 1 min et 30 secs
- Introduire la quantité d'eau. Le premier mix, pour moi, s'ajoute au second mix l'adjuvant et fumée silice.
- Malaxer pendant 1min et ajouter l'eau tout attentivement.

#### **IV.11. Vibration : [NA EN 12390-2] :**

La vibration est la méthode de compactage la plus rependue, le degré de compactage d'un béton frais par vibration dépend de la fréquence et de l'amplitude des oscillations, ainsi que de la durée de vibration

La vibration des éprouvettes est effectuée sur une table vibrante. Les éprouvettes sont ensuite maintenues à l'air libre au laboratoire pendant 24h puis décoffrées et marquer par peinture et conserver dans l'eau pendant 28 jours.

#### **IV.12. : Conduite des essais sous températures élevées :**

Après démoulage, les éprouvettes prismatiques de béton (**4x 4 x16**) **c m<sup>3</sup>** sont conservées dans l'eau pendant 28 jours à l'intérieur du laboratoire (température  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ), puis elles sont extraites de l'eau et pesées avant d'être placées dans l'étuve à différentes températures de (**100 °C, 200°C, 400°C, 600°C et 800°C**), lorsque la température voulue est atteinte, les échantillons sont retirés du four, pesés (perte de masse). Ensuite les différents des essais de résistance ont été effectués.



**Figure IV.15** : Four à béton

**IV.13. : Essai de Flexion et Traction :**



**Figure IV.16** : Appareil d'essai de flexion et de traction

#### **IV.14 : Essai de compression :**

L'appareil d'essais de compression sont utilisés pour déterminer le comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à une pression uniformément croissante jusqu'à rupture de l'échantillon.



**Figure IV.17 :** Machine d'essai de compression

## **B/ Représentation et interprétation des résultats :**

### **1. Introduction :**

Dans ce chapitre, on présente le comportement mécanique et la perte de masse des échantillons d'un béton ordinaire et de micro béton confectionnés à base du sable de brique concassée. Ces échantillons sont réalisés en variant le pourcentage de sable issu de brique concassé de (**0%**, **25%**, **50%**, **75%** et **100%**) et en incorporant ensuite un adjuvant et de la fumée de silice.

Les échantillons de micro béton ont une forme prismatique (**4x4x16**) **c m<sup>3</sup>**. Ces échantillons sont soumis à des températures de 100, 200, 400, 600 et 800°C après une période de cure dans l'eau de 28 jours à l'intérieur du laboratoire

Une synthèse des résultats des caractéristiques mécaniques (résistance à la compression, à la flexion et à la traction) obtenus est présentée dans ce chapitre. En ce qui concerne la perte de masse les résultats sont mesurés pour chaque type de béton entre la température de 20°C et la température atteinte (100, 200, 400,600 ou 800°C)

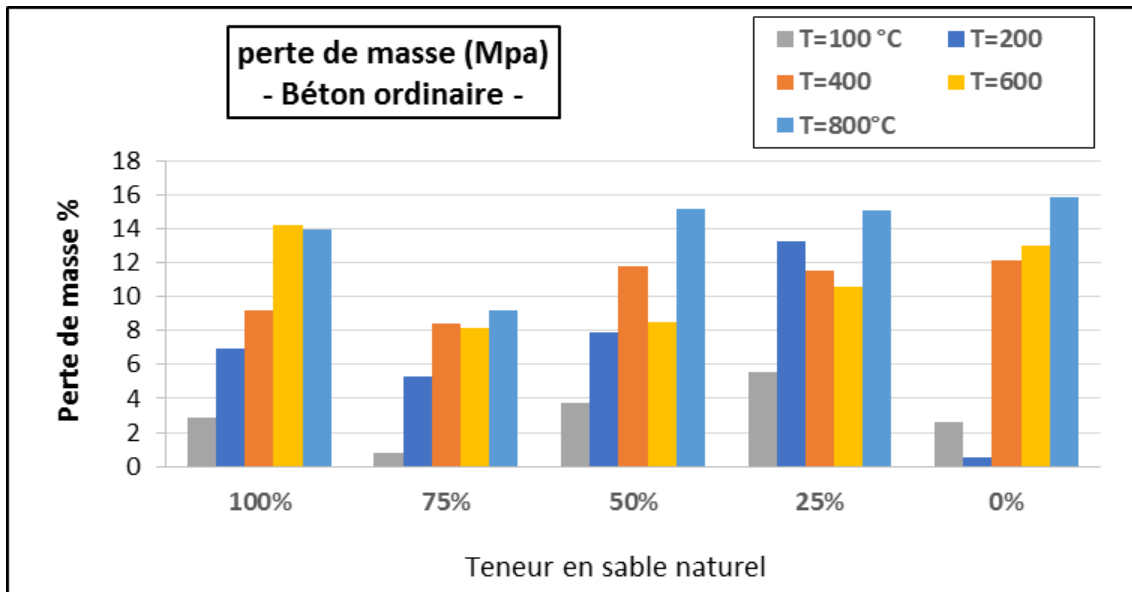
### **2. Perte de masse :**

L'essai consiste à déterminer la perte de masse qu'ont subie les éprouvettes lors du chauffage par rapport à leur état initial (béton témoin conservé dans l'eau à 20°C).

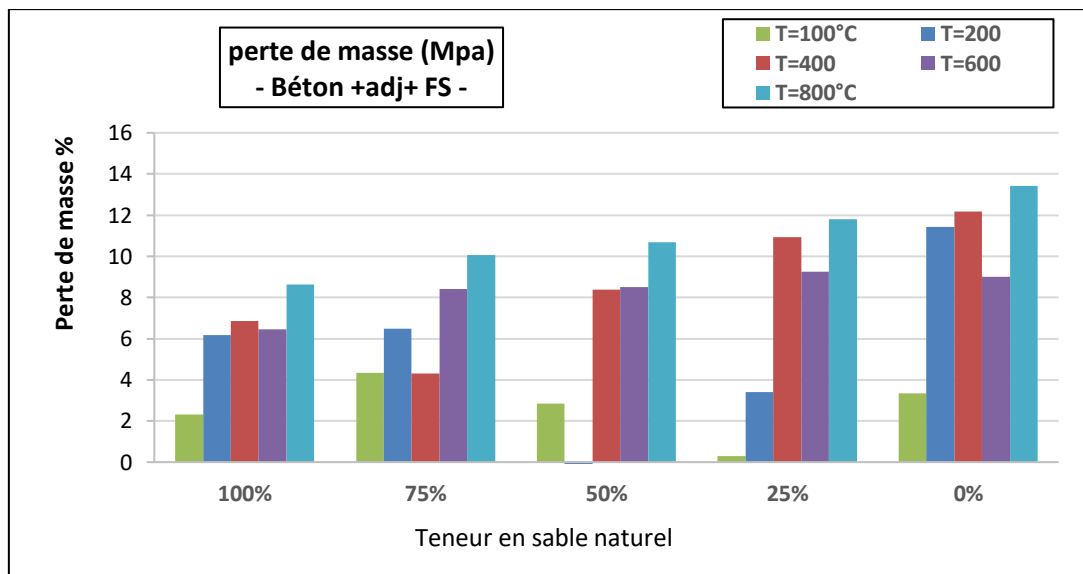
La perte de masse exprimée en pourcentage est obtenue de la façon suivante :

$$PM (\%) = [(M1-M2/M1)] \times 100\%$$

Avec : M1, M2 les masses des éprouvettes avant et après chauffage, respectivement.



**FigureIV.18** : Perte de masse sous différentes températures pour le béton ordinaire



**FigureIV.19** : Perte de masse sous différentes températures pour le avec Adjuvant et fumée de silice

**Commentaire :**

**1. Béton ordinaire:** Les résultats de la perte de masse est une moyenne de trois valeurs effectuée sur les éprouvettes prismatiques, on remarque que (**La FigureIV.18**):

- Plus la température augment la perte de masse augment.

- L'utilisation de granulats de briques concassé conduit à une réduction de la perte de masse jusqu'à la température de 600°C.

- la perte de masse minimale est obtenue avec 75% de granulats de sable concassé pour les températures qui dépassent 400°C.

**2. Béton + Adjuvant + Fumée de silice** : d'après les résultats de **La Figure IV.19**, on peut dire que :

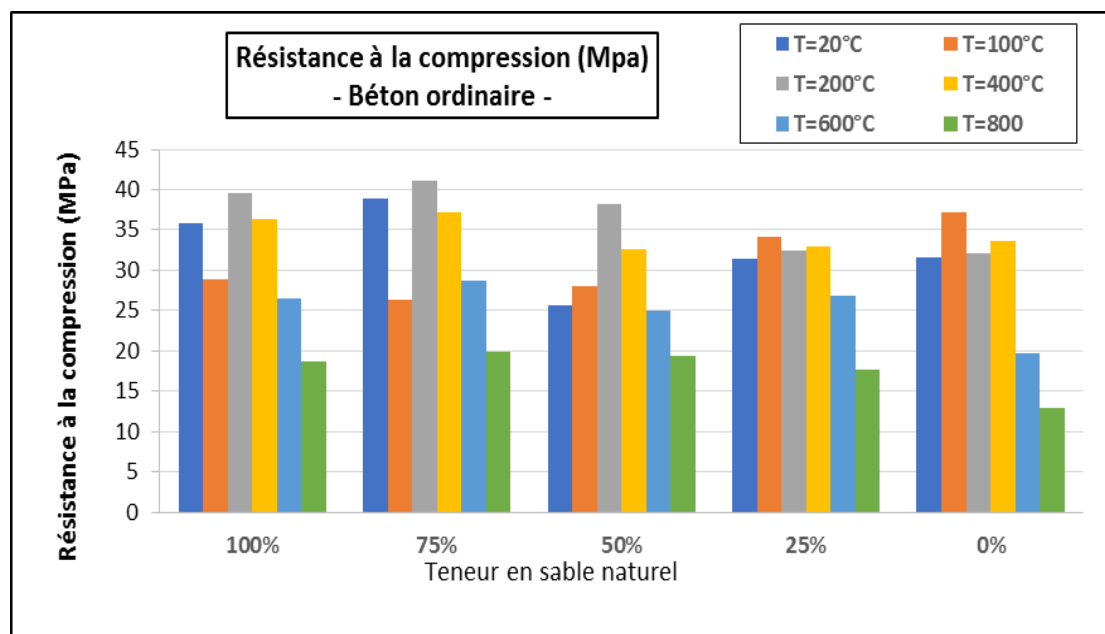
- les pertes de masses des bétons comportant l'adjuvant et la fumée de silice, sont inférieures à ceux pour les bétons ordinaires.

- la perte de masse minimale est obtenue avec 0% de granulats de briques concassé (100% de sable naturel ou sable concassé) pour les hautes températures.

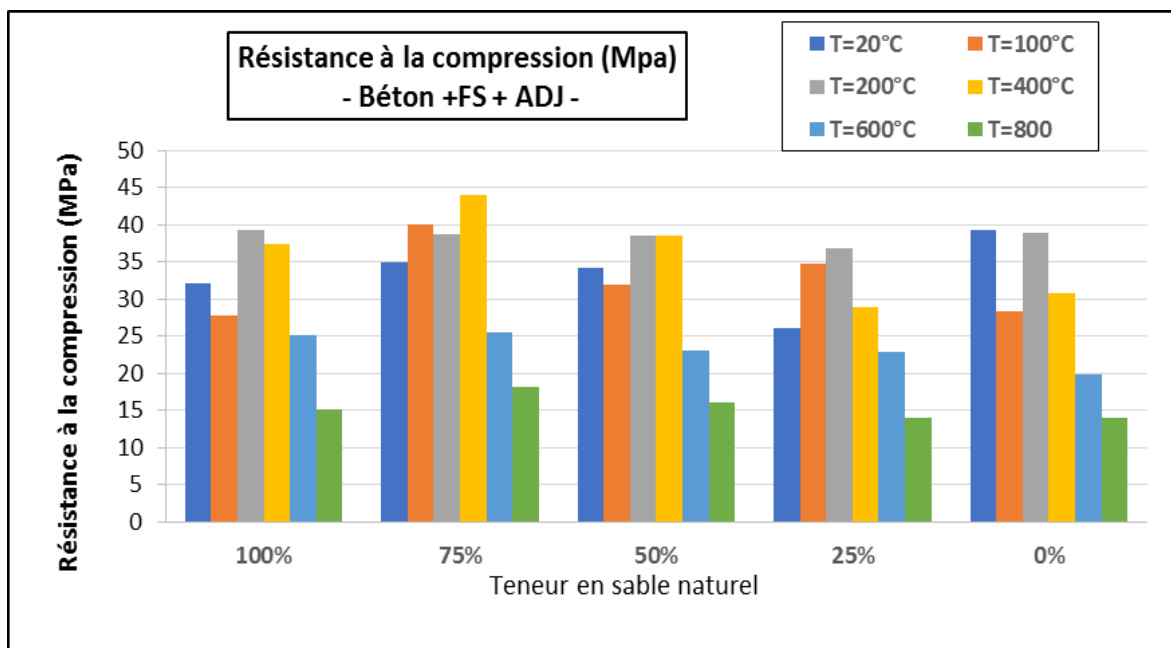
### 3. Essai de compression :

#### 3.1 : Résistance à la compression :

Les résultats des essais de compression des différents échantillons sont représentés dans les figures 3 et 4 ci-dessous.



**Figure IV.20** : Résistance à la compression sous différentes températures Pour le béton ordinaire



**Figure IV.21** : Résistance à la compression sous différentes températures pour le avec Adjuvant et fumée de silice.

### Commentaire :

#### 1. Béton ordinaire :

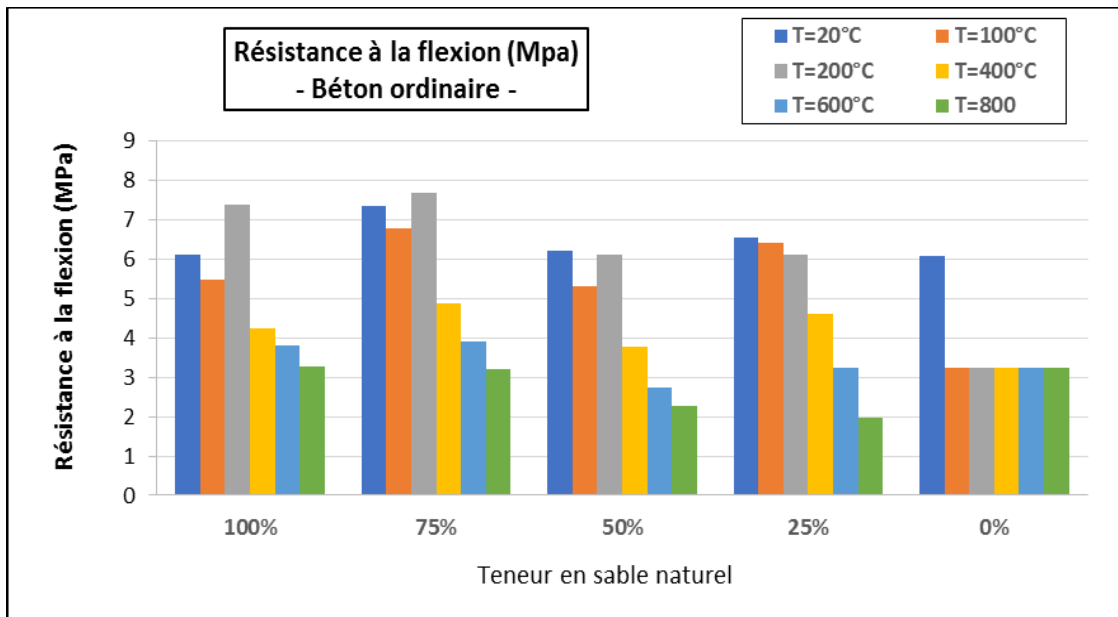
- Pour le béton de référence (20°C), la résistance maximale est obtenue avec 75% de granulats de sable concassé.
- La résistance maximale des bétons testés, est obtenue avec 75% de granulats de sable concassé sous une température de 200°C.
- Avec 100%, 75% et 50% de sable concassé dans les mélanges, on remarque une augmentation de résistance jusqu'à 200°C ensuite une chute de résistance jusqu'à 800°C.
- Pour les mélanges comportant 25% et 0% de sable concassé, on remarque des résistances presque stables jusqu'à la température de 400°C ensuite une chute de résistance

#### 2. Béton + ADJ + FS : on remarque que

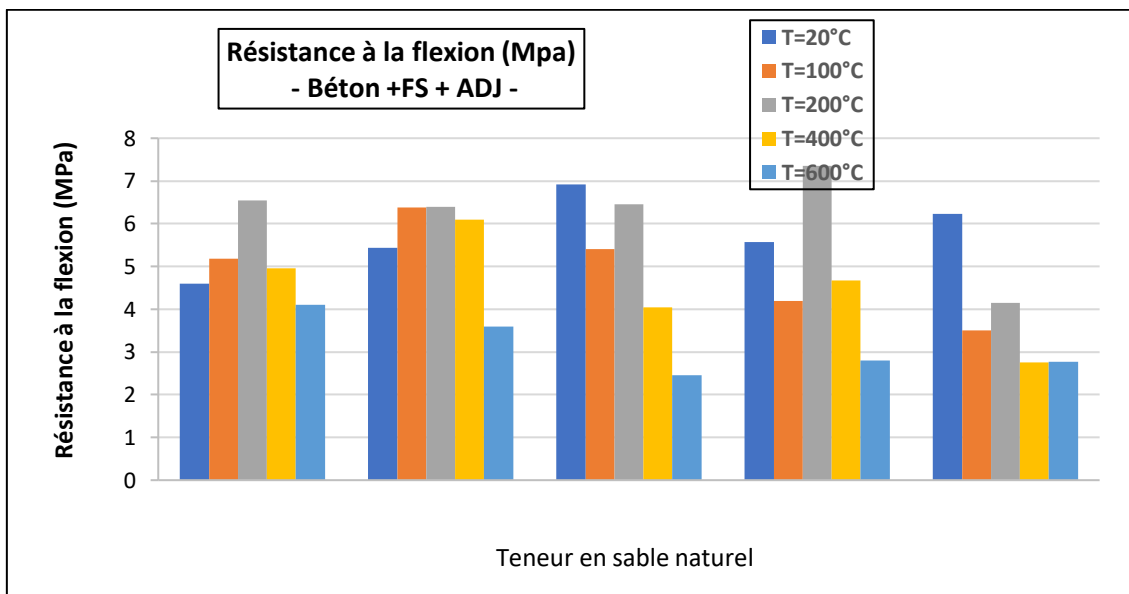
- En générale, les résistances élevées sont obtenues avec 75% des granulats de sable concassé.
- pour un même pourcentage de sable naturel (concassé), les résultats augmentent généralement jusqu'à la température de 200°C ensuite une chute de résistance.
- l'incorporation d'un adjuvant et de la fumée de silice n'a pas influé sur la résistance à la compression au contraire, on remarque une réduction faible de résistance dans quelques mélanges.

4. Essai de flexion :

4.1 : Résistance à la flexion :



**Figure IV.22:** Résistance à la flexion sous différentes températures Pour le béton ordinaire



**Figure IV.23 :** Résistance à la flexion sous différentes températures pour le avec Adjuvant et fumée de silice

## Commentaire :

### 1. Béton ordinaire :

- La résistance maximale est obtenue avec 75% de granulats de sable concassé sous une température de 200°C.
- pour les différents mélanges, on remarque une chute de résistance après la température de 200°C.
- Les résistances faibles sont dans le cas d'une température de 800°C.

### 2. Béton + ADJ + FS :

- pour les mélanges avec adjuvant et fumée de silice, les résistances augmentent généralement jusqu'à la température 200 °C ensuite une chute de résistance.
- Les résistances maximales à la flexion sont obtenues dans le cas d'une température de 200°C.

## 5. Essai de Traction :

### 5.1 : Résistance à la traction :

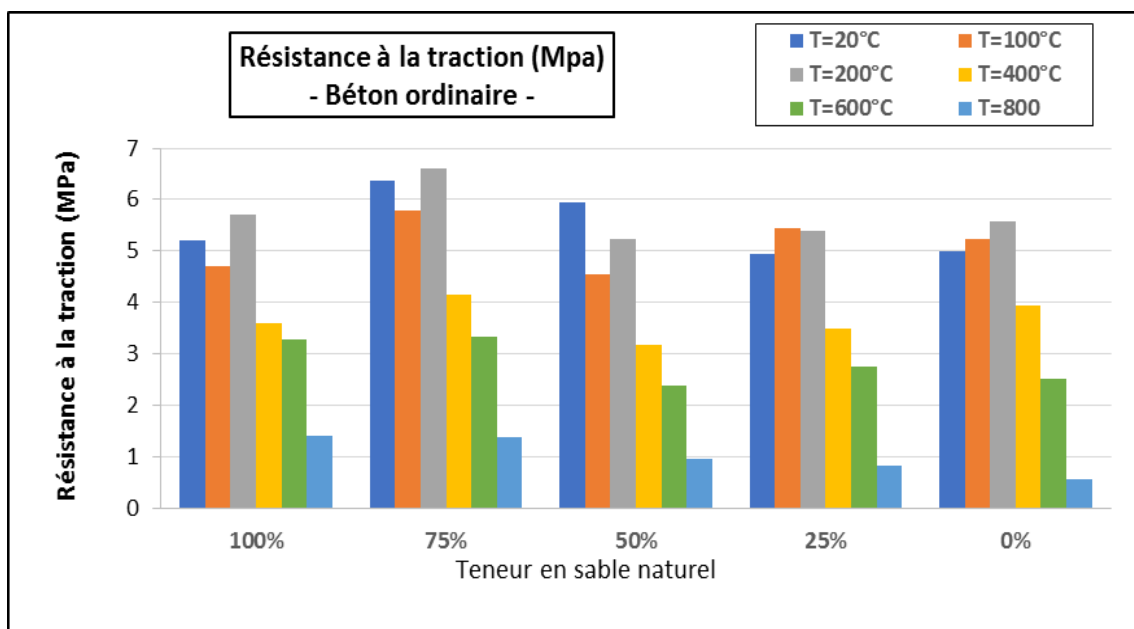
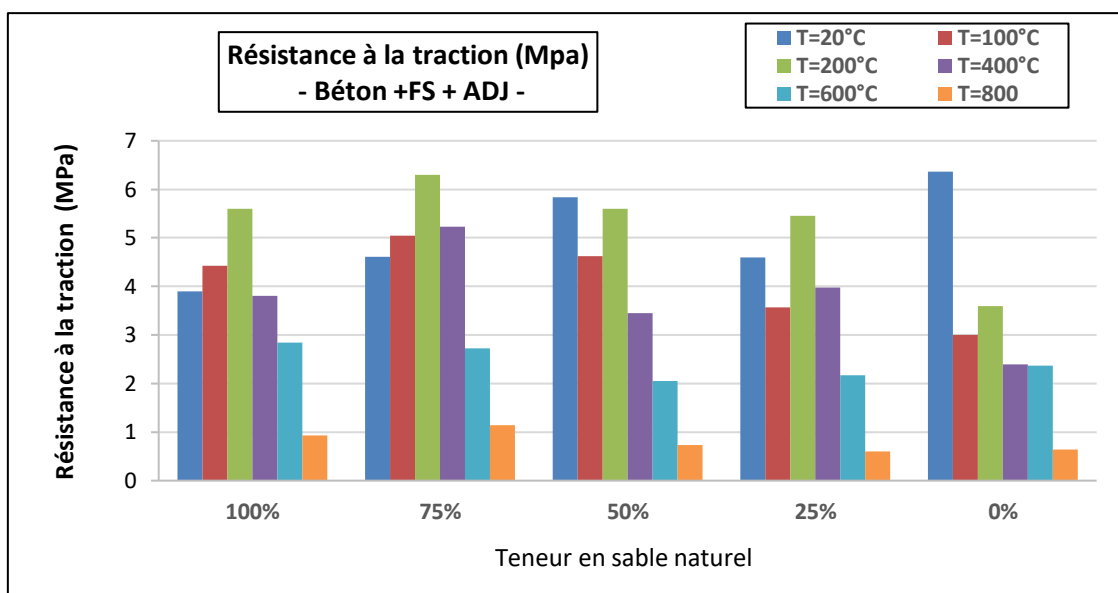


Figure IV.24 : Résistance à la traction sous différentes températures  
Pour le béton ordinaire



**Figure IV.24 :** Résistance à la traction sous différentes températures pour le avec Adjuvant et fumée de silice

**Commentaire :**

- Les résistances maximales à la traction sont obtenues dans le cas d'une température de **200°C**.
- les résultats de résistance à la traction augmentent généralement jusqu'à la température de **200°C** ensuite une chute de résistance.
- les résistances faibles sont enregistrées dans le cas d'une température de **800°C**.
- l'incorporation d'adjuvant de la fumée de silice n'a pas généralement influée sur la résistance.



**Figure (IV.24) :** micro fissures apparents sur la surface d'une éprouvette chauffée à **800°C**.

**La figure IV.9** représente, l'apparition de fissures dans les échantillons sous une température élevée (**600 et 800 °C**). Ces fissures ont conduit à une chute de résistance de ces échantillons.

## **Conclusion :**

L'objectif de ce travail de recherche était de contribuer de façon expérimentale à une meilleure connaissance du comportement mécanique du micro béton porté à hautes températures. Les micros béton sont confectionnés à base de sable concassé remplacé partiellement par des granulats issus de briques concassés. En fin incorporation d'un adjuvant et de la fumée de silice pour augmenter la compacité et réduire la quantité d'eau.

Sur la base des résultats obtenus nous avons établi les conclusions suivantes :

- La perte de masse a augmenté avec l'augmentation de la température pour tous les bétons étudiés. Une température de **600°C** se caractérise par une forte augmentation de perte de masse. Cette forte perte de masse correspond au départ de l'eau liée chimiquement, la perte de masse est provoquée par la dégradation de la matrice cimentaire dans des températures élevées.
- Pour un même pourcentage de sable naturel (concassé), les résultats augmentent généralement jusqu'à la température de **200°C** ensuite une chute de résistance.
- L'incorporation d'un adjuvant et de la fumée de silice n'a pas influé sur la résistance à la compression au contraire, on remarque une réduction faible de résistance dans quelques mélanges.
- A des températures élevées (**plus de 600°C**), des microfissures apparaissent dans les éprouvettes. Ces fissures ont conduit à une chute de résistance pour l'ensemble des mélanges.

# *Conclusion générale*

## **Conclusion générale**

L'étude de l'influence de températures sur le béton d'agrégats recyclés est une question importante en matière d'ingénierie civile et de développement durable. Les résultats montrent que les caractéristiques du béton d'agrégats recyclés varient en fonction de l'élévation de la température, ce qui peut affecter la durée de vie et la performance du béton.

Plus précisément, l'augmentation de la température a un effet négatif sur la résistance mécanique et la durabilité du béton et principalement du béton d'agrégats recyclés sujet de notre étude. Cela peut être dû à une modification de la structure des granulats de béton recyclé et à une diminution de l'adhérence entre les granulats et la matrice de ciment.

La présente étude expérimentale de l'effet de la haute température sur les caractéristiques du béton à base d'agrégats recyclés en incorporant par la suite de la fumée de silice et un adjuvant super plastifiant. Cette étude nous permet de tirer les conclusions suivantes:

- Une température élevée conduit à une perte de masse élevée.
- Les pertes de masses des bétons comportant l'adjuvant et la fumée de silice, sont inférieures à ceux pour les bétons ordinaires (sans adjuvant et sans fumée de silice).
- La perte de masse minimale est obtenue dans les échantillons confectionnés avec 0% de granulats de briques concassé (100% de sable de carrière concassé).
- Généralement les résistances augmentent jusqu'à la température de 400°C ensuite on remarque une réduction de résistance
- Les résistances faibles sont obtenues dans le cas d'une température élevée (800°C).
- Apparition de fissures à la surface des échantillons dans le cas de température élevée (600 et 800 °C). Ces fissures sont la cause de la chute de résistance de ces échantillons.

## *Reference*

### Reference

- [1] **ATILH CNRS**. Ecole thématique 'physique, chimie et mécanique des matériaux cimentaires', 2003.
- [2] **E. MOUDILOU**. Cinétiques de mécanismes de relargage des métaux lourds présents en traces dans les matériaux cimentaires. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France, 2000.
- [3] **S. BRAULT**. Modélisation du comportement à la lixiviation à long terme de déchets stabilisés à l'aide de liants hydrauliques. Thèse de doctorat, Université Paris 6, France, 2001.
- [4] **Y. F. YOUNG**. Volume relationships for C – S – H formation based on hydration stoichiometries. L.J. Struble P.W. Brown, editor, Microstructural development during hydration of cement, pages 313–322. Material Research Society Symposium, vol 85, 1987.
- [5] **V. MATTE**. Durabilité des bétons à ultra hautes performances : rôle de la matrice cimentaire. Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 1999.
- [6] **H.F.W. TAYLOR**. Proposed structure for calcium silicate hydrate gel. Journal of the American Ceramic Society, 69(6): 464–467, 1986.
- [7] **P. LONGUET L. BURGLÉN A. ZELWER**. La phase liquide du ciment hydraté, 1974. Publication technique CERILH n°219.
- [8] **H. MINARD**. Etude intégrée des processus d'hydratation, de coagulation, de rigidification et de prise pour un système C3S, C3A, sulfates alcalins. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, France, 2003.
- [9] **M. REGOURD H. HORNAIN**. Applications de la microscopie électronique à balayage. Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87, 1975.
- [10] **COLLEPARDI S, CORINALDESI V, MORICONI G, NONORA G, COLLEPARDI M**, « Durability of high-performance concretes with pozzolanic and composite cements », ACI Special Publication, 159 172, 2000.
- [11] **SISOMPHON K, FRANKE L**, « Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials », Cement and Concrete Research, 37, 1647-1653, 2007.

- [12] **KULAKOWSKI MP, PEREIRA FM, DAL MOLIN DCC**, « Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete », *Construction and Building Materials*, 23, 1189-1195, 2009.
- [13] **PAPADAKIS VG**, « Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress », *Cement and Concrete Research*, 30, 291-299, 2000
- [14]: **Stéphanie BONNET** et **Abdelhafid KHELIDJ** : La durée de vie des ouvrages en béton armé situés sur la façade atlantique Report N°2-1 « Concrète in marine environment ».
- [15] **Feldman R .FSeredaP.J. (1968)** A model of hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. *Revue des Matériaux de Construction, RILEM*, vol.6, pp.509-519.
- [16] **SierraR., (1974)** Contribution à l'étude de l'hydratation des silicates calciques hydrauliques, Rapport de recherche n°39, Laboratoire des Ponts et Chaussées.
- [17] **NoumowéN.A., (1995)** Effet de hautes températures (20°C-600°C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon.
- [18] **HarmathyT.Z., (1965)** Effect of moisture on the fire endurance of building elements. National Research Council, Research paper n°270 of the division of building research, Ottawa Canada.
- [19] **BazantZ.P., KaplanM. (1996)** Concrete at high temperature: material behaviour and mathematical modelling. London: Longman Concrete Design and Construction Series, pp. 412.
- [20] **PiastaJ., SawiczZ. RudzinskiL. (1984)** Changes in the structure of hardened paste due to high temperature. *Materials and Structures*, vol.17, n°100, pp. 291-296.
- [21] **BazantZ.P., WittmannF.H. (1982)** Creep and Shrinkage in Concrete Structures. John Wiley & Sons.
- [22] **DiasW.P.S., KhouryG.A. Sullivan P.J.E., (1990)** Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700°C (1292°F). *ACI Material Journal*, vol. 87, Issue 2, pp. 160-165.

- [23] **Harmathy T.Z., Allen L.W. (1973)** Thermal properties of selected masonry unit concretes. Journal of American concrete Institute, vol. 70, n°2, pp.132-142.
- [24] **Noumowé A. (2003)** Temperature Distribution and Mechanical Properties of High Strength Silica Fume Concrete at Temperatures up to 200°C. ACI Materials Journal, n°100-M39, pp.326-330.
- [25] **Kalifa P., Tsimbrovska M., (1998)** Comportement des BHP à hautes températures, état de la question et résultats expérimentaux. Cahier de CSTB, 3078. ■
- [26] **Kodur, V.K.R.** Spalling in high strength concrete exposed to fire – Concerns, causes, critical parameters and cures, actes du congrès de l'ASCE sur les structures, Philadelphie (PA), 2000
- [27] **Divet et al, 2005** Divet L., Arnaud S., Derobert X., Fasseu P., Faure R.-M., Larive C., Naquin B., Olivier G., Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie-Méthodes d'essai n°62, techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 2005
- [28] **Mamery Serifou** « Béton à base de recyclât : influence du type de recyclât et rôle de la formulation ». Université de Bordeaux département de GENIE CIVIL, Option Géomatériaux 2013
- [29] **Ramanaiah K., Ratna Prasad A.V. Hema Chandra Reddy K. (2012).** Thermo physical properties of elephant grass fiber-reinforced polyester composites. Materials Letters, vol.89, pp.156-158.
- [30] **Kuik, O.J., Helming, J.F.M., Dorland, C., Spaninks, F. (2000).** The economic benefits to agriculture of flow velocity pollution in The Netherlands. European Review of Agricultural Economics, vol. 27, No. 1, pp. 75-90.
- [31] **Ivanov D. (2020).** Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: a simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/ SARS-CoV-2) case. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101922>.
- [32] **Bakker R.F.M. (1985).** Diffusion within and into concrete. 13th Annual Convention of the institute of concrete Technology, University of Technology, Loughborough,

Angleterre, 21pp.

[33] **Hadj sadok A.** (2010). Comportement des mortiers et bétons à base de ciments au laitier d'Elhadjar dans les milieux agressifs, Thèse de Doctorat en génie civil, Université de Blida, Algérie.

[34] **Shankar, B** and Neeliah H. (2005). Tropospheric ozone and winter wheat production in England and Wales: a Note. *Journal of Agricultural Economics*, vol. 56, No. 1, pp. 145-151.

[35] **Bentz D.P.**, Stutzaman P.E., Garboczi E.J. (1992). Experimental and simulation studies of the interfacial zone in concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 22, N° 5, pp. 891-902.

[36] **Sharma V.**, Giri A., Thakur S., Pant D. (2020). Chapter 13 - Resource recovery from inert municipal waste, *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, In book: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, doi: 10.1016/B978-0-444-64321-6.00013-6.

[37] **Kartam N.** Al-Mutairi N., Al-Ghusain I., Al Humoud J. (2004). Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait. *Waste Manag*, vol. 24, No. 10,

[38] **Jean Bernard L.** (1997). Les déchets et leur traitement-les déchets solides industriels et ménagers, 3<sup>e</sup> édition, pp. 6-7, Paris.

[39] **Journal** officiel de la république Algérienne et populaire. Loi du 15 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, No. 77, Algérie

[40] <https://www.planete-tp.com/genie-civil-a1439.html>

[41] COURS DE TECHNOLOGIE de Construction Les matériaux de construction ECOLE INTER-ETATS DES TECHNICIENS SUPERIEURS DE L'HYDRAULIQUE ET DE L'EQUIPEMENT RURAL.

